



études et recherches

**écoulements et charges  
induits par le vent  
sur les bâtiments**

**application aux capteurs solaires**

par Jacques Gandemer  
ingénieur au CSTB



du centre scientifique et technique du bâtiment  
établissement public 4, avenue du recteur poincaré, paris 16

livraison 265 décembre 1985 cahier 2045

écoulements et charges  
induits par le vent  
sur les bâtiments  
application aux capteurs solaires

RÉSUMÉ

L'étude menée en soufflerie atmosphérique (reproduction du vent naturel et sa turbulence notamment) quantifie les écoulements de contournement vent au passage des obstacles bâtis dans leur contexte réaliste d'implantation ainsi que les champs de pression associés.

Pour différents types de bâtiments (pavillons individuels et collectifs), l'article présente, sous forme illustrée, la cartographie de ces écoulements et des pressions dans leur situation générale (valeurs moyennes, écarts types, valeurs extrêmes) mais traite plus précisément de la tenue au vent des capteurs solaires.

Cette étude aérodynamique présente une contribution déterminante sur la tenue au vent des ouvrages ou parties de ces derniers, sur l'étanchéité des façades et des toitures, sur les échanges thermiques des parois, sur la fatigue des constituants des bâtiments, sur le fonctionnement et la tenue au vent des éléments rapportés tels qu'extracteurs, cheminées ou « mobilier » de toiture.

SUMMARY

The study, carried out in an atmospheric wind tunnel (reproduction of natural wind conditions, particularly turbulence), quantifies wind flows around built-up obstacles in their realistic location context, and the associated pressure fields.

For various types of building (detached houses and blocks of flats), the article presents in illustrated form the chart of these flows and pressures in general (mean values, standard deviations, extreme values), but deals more specifically with the wind resistance of solar collectors.

This aerodynamic study makes a decisive contribution to our knowledge of the wind resistance of structures and structural elements, façade and roof air- and water-tightness, wall heat exchanges, building component fatigue, and the operation and wind resistance of attached elements such as exhaust outlets, chimneys and roof "furnishings".

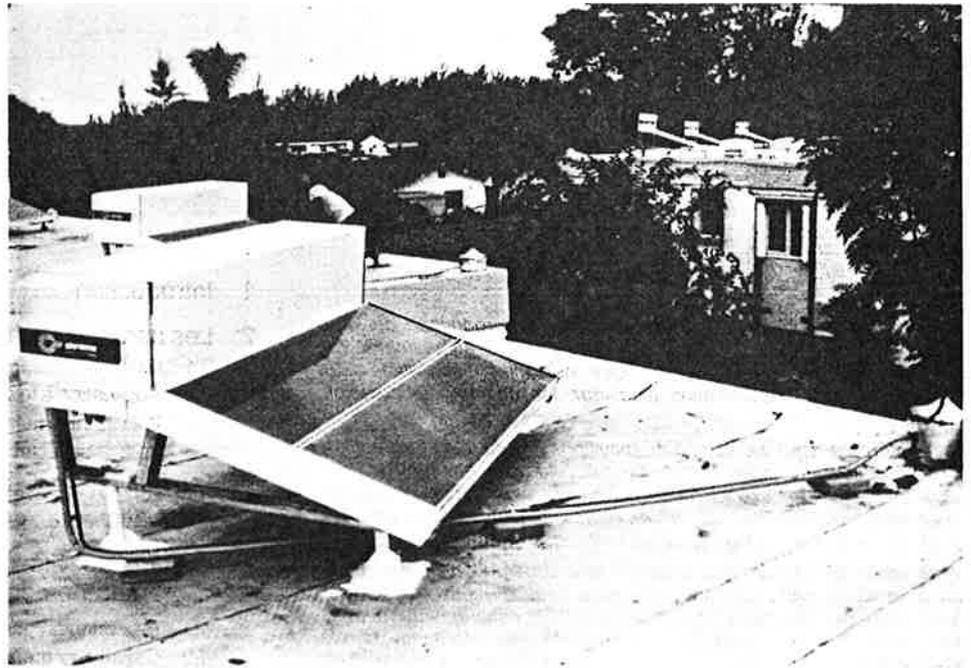
RESUMEN

El estudio llevado a cabo en tunel atmosférico (reproducción del viento natural y particularmente de su turbulencia) determina la magnitud de los flujos de evitamiento del viento a su paso a través de obstáculos construidos en un contexto realista de emplazamiento así como los campos de presión asociados.

El artículo presenta en forma ilustrada, para diferentes tipos de edificios (viviendas aisladas individuales y colectivas), la cartografía de dichos flujos y de las presiones en cuanto a su situación general (valores medios, márgenes tipos, valores extremos) pero trata más precisamente del comportamiento al viento de los captadores solares.

Este estudio aerodinámico presenta una contribución determinante sobre el comportamiento al viento de las obras o partes de las mismas, sobre la estanquidad de fachadas y cubiertas, sobre los intercambios térmicos de las paredes, sobre la fatiga de los constituyentes de los edificios, sobre el funcionamiento y comportamiento al viento de los elementos añadidos tales como extractores, chimeneas o "mobiliario" de cubiertas.

1	Introduction .....	2
2	Les caractéristiques du vent .....	2
2,1	Le vent .....	2
2,2	Application à la simulation du vent en soufflerie .....	4
2,21	La simulation réalisée en soufflerie .....	4
2,22	Le facteur correctif .....	5
3	Vitesse et pression au contournement des bâtiments : généralités .....	6
4	Champ de vitesse et de turbulence au contournement des bâtiments .....	8
4,1	Présentation générale des résultats .....	8
4,2	Calcul des grandeurs réelles en fonction des données météorologiques .....	9
4,3	Pavillon individuel .....	9
4,4	Collectif R + 4 .....	14
4,5	Application au fonctionnement thermique d'un capteur solaire .....	16
5	Champ de pression sur les éléments de façade et toiture ou sur les capteurs solaires .....	17
5,1	Généralités .....	17
5,11	Champ de pression externe .....	17
5,12	Charge du vent sur un élément de paroi ou sur un capteur solaire .....	17
5,13	Détermination des champs de pression en soufflerie .....	18
5,14	Calcul de la charge externe subie par un élément de surface S en fonction des données météorologiques .....	18
5,2	Présentation des champs de pression pour le pavillon et le collectif .....	19
5,21	Le pavillon .....	19
5,211	Élément de surface S ou du capteur solaire collé de manière à peu près étanche à la paroi .....	19
5,212	Élément ou capteur solaire décollé de la toiture .....	23
5,213	Cas du capteur en appui au sol (pente 45°) .....	26
5,214	Influence de l'environnement immédiat (interaction entre bâtiments) .....	27
5,215	Commentaires et conseils pratiques pour l'implantation des capteurs solaires sur un pavillon .....	27
5,22	Le collectif (R + 4) .....	27
5,221	Élément de surface S (4 m <sup>2</sup> ) ou de capteur solaire collé de manière à peu près étanche à la paroi .....	27
5,222	Élément de surface ou de capteur décollé de la paroi en lui restant relativement parallèle .....	29
5,223	Capteur solaire décollé en terrasse (plan du capteur environ à 45° par rapport au plan terrasse) .....	29
5,224	Commentaires et conseils pratiques pour l'implantation des capteurs solaires sur les collectifs .....	29
6	Remarque sur la compatibilité des zonages de moindre sollicitation du vent et de bon fonctionnement thermique pour les capteurs solaires .....	30
7	Conclusion de l'étude .....	30
	Bibliographie .....	30
	Annexe	
	Correspondance entre les écarts types (version adimensionnelle) des écoulements en vent de banlieue et en vent de campagne .....	31



Capteur solaire  
en toiture-terrasse

---

## introduction

---

Le vent induit sur les constructions des écoulements de contournement associés à un champ de pression [réf. 1]. Ces deux notions sont liées, mais la connaissance de l'une ne permet pas d'accéder à l'autre (sauf en quelques zones particulières).

Les écoulements ou pressions sont fluctuantes dans le temps (nature turbulente du phénomène). Localement, et sur une période donnée assez longue (10 min, par exemple), on peut définir une valeur moyenne, des valeurs extrêmes ainsi qu'une dispersion (caractérisée par l'écart type) par rapport à la moyenne. Outre l'instantanéité des phénomènes, ces champs aérodynamiques (vitesse et pression) sont difficiles à appréhender, car fonction d'une combinatoire importante des paramètres climatiques (force de la tempête, texture du vent incident [réf. 2]) et aérodynamiques (nature de l'environnement, géométrie et dimension du bâtiment, perméabilité, etc.).

Ces champs de vitesse et de pression conditionnent les actions aérodynamiques sur et autour du bâtiment. Ainsi, ils seront déterminants sur la tenue au vent de l'ouvrage ou parties de ce dernier, sur l'étanchéité des façades et toitures [réf. 3], sur les échanges thermiques des parois, sur la fatigue des constituants des bâtiments, sur le fonctionnement et la tenue au vent des éléments rapportés, tels extracteurs, cheminées ou capteurs solaires.

Il est, par conséquent, très important pour le concepteur de disposer d'informations quantitatives réalistes sur ces phénomènes si l'on veut mieux les contrôler. Leur complexité impose une démarche essentiellement expérimentale et les études effectuées en vraie grandeur et en soufflerie turbulente (reproduction du vent naturel) contribuent grandement à la détermination de ces grandeurs.

Pour différents types de bâtiments (pavillon individuel, collectif), dans des conditions réalistes de vent et d'environnement, l'article présente sous forme illustrée la cartographie de ces écoulements et des pressions dans les situations générales, mais traite précisément le cas des *capteurs solaires* (collés ou non aux parois du bâtiment), ce qui suppose pour les

pressions (et, par suite, les charges qui en découlent), une intégration spatiale instantanée à l'échelle du capteur, soit de l'ordre de 4 m<sup>2</sup> (intrados et extrados si le capteur est décollé).

Ces résultats reposent essentiellement sur une étude financée par le MUL pendant plusieurs années, menée en soufflerie turbulente (CSTB-Nantes). Cet article présente une synthèse opérationnelle pour les concepteurs, mais nous renvoyons aux publications spéciales pour le détail de l'étude et plus précisément à la thèse de M. Lakdar Kairouani [réf. 4].

---

## 2 les caractéristiques du vent

---

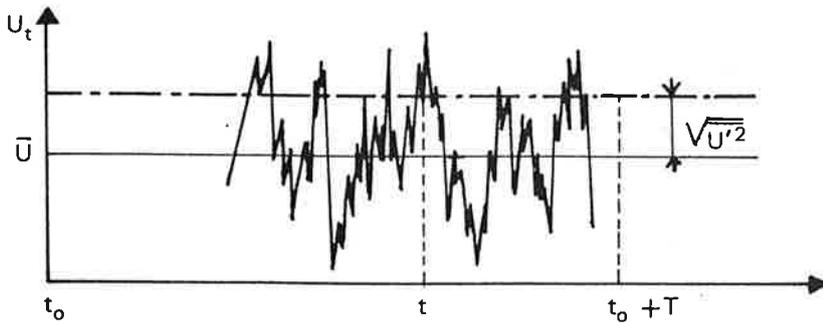
### 2,1 le vent [réf. 2]

Dans les basses couches atmosphériques (0 à 300 m au-dessus du sol), le vent est modelé par les reliefs, la topographie et la rugosité du sol (ville, forêt, etc.). Au contact du sol, les rugosités freinent le vent avec création d'une forte agitation ou turbulence. Localement, l'écoulement vent variera donc en grandeur et direction au cours du temps.

L'écoulement turbulent vent ne peut pas être décrit instantanément et l'on adopte une formulation du type statistique : le vent sera considéré alors comme la superposition d'un écoulement moyen (vitesse  $\bar{U}$  à la hauteur  $z$ ) sur une période  $T$  assez longue (10 min, par exemple, pour les enregistrements météorologiques) et d'un écoulement fluctuant fonction du temps (composante fluctuante  $U'$  de la vitesse au temps «  $t$  » parallèle au vent moyen ; dans les applications, on néglige généralement les composantes perpendiculaires au vent moyen).

A l'instant  $t$  et à la hauteur  $z$ , la vitesse vaut :

$$U_{(t)} = \bar{U} + U'_{(t)}$$



« Enregistrement du vent instantané »  
en fonction du temps

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 :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U'^2 dt}$$

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

La vitesse moyenne du vent varie avec la hauteur z, la rugosité du sol et la topographie éventuelle des sites.

La turbulence (caractérisée par  $\sigma$ ) est essentiellement fonction de la rugosité et de la force de la « tempête » à l'origine du vent considéré (cf. fig. ci-dessous).

Comme on le voit, le phénomène vent est de nature complexe et il n'est pas possible de parler simplement de la « vitesse du vent ». Il s'agit en réalité d'un champ de vitesse, variable à la fois dans l'espace et dans le temps, dont la description n'est possible qu'en terme statistique. Parler d'un vent de 100 km/h, par exemple, n'a pas de sens si l'on ne précise pas le type de vitesse considérée (moyenne, pointe), la hauteur au-dessus du sol, la rugosité du site, etc.

Le profil de vitesse moyenne peut être exprimé en fonction de la hauteur, de la rugosité amont (supposée relativement homogène) définie par son paramètre  $z_0$ , et la vitesse météorologique à la station (à 10 m au-dessus du sol) :

$$\bar{U}_z = k \text{Log}_e \left( \frac{z}{z_0} \right) \cdot \bar{U}_{10 \text{ météo}}$$

avec :

k : coefficient fonction de la rugosité

$\bar{U}_{10 \text{ météo}}$  : vitesse moyenne à 10 m du sol à la station météorologique (supposée placée dans des conditions de site normales (site plat et pas rugueux).

Le niveau de turbulence, fonction de la rugosité (coefficient K) peut aussi être relié à la vitesse météorologique :

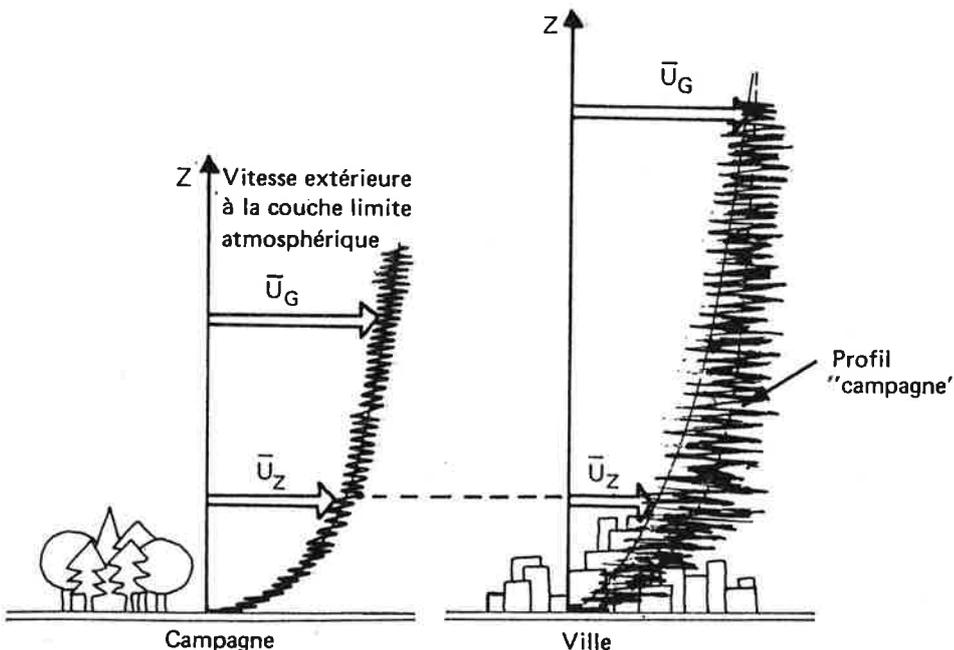
$$\sigma = K \bar{U}_{10 \text{ météo}}$$

Par suite, la vitesse de pointe s'exprimera de la façon suivante :

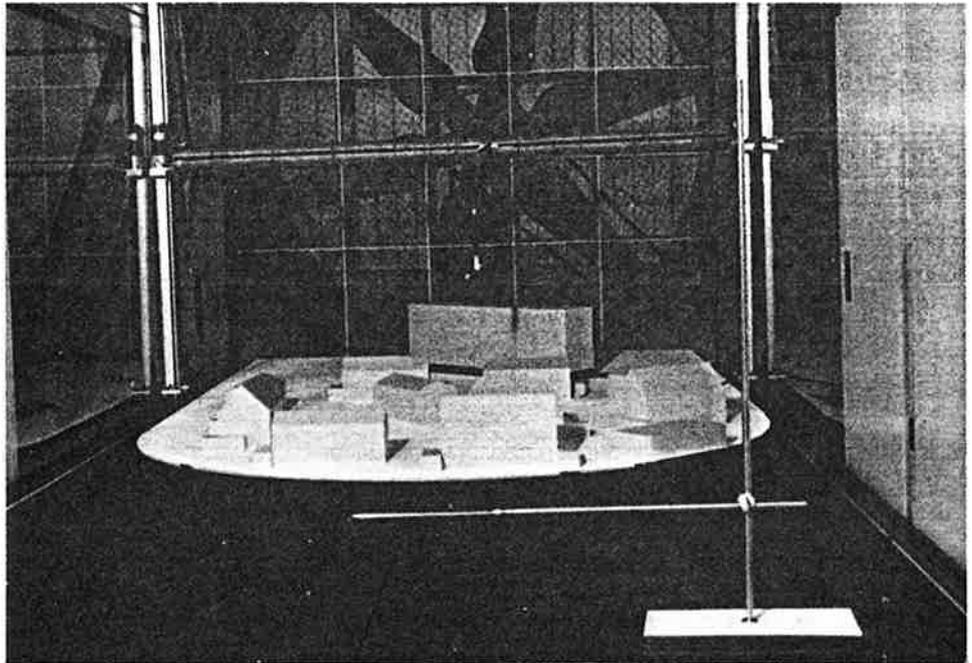
$$\hat{U}_z \approx (k \text{Log}_e \frac{z}{z_0} + 3,5 K) \bar{U}_{10 \text{ météo}}$$

A titre d'indication, nous fournissons le tableau donnant les valeurs  $z_0$ , k et K en fonction de la rugosité.

	Classe de rugosité				
	Mer plan d'eau	Rase campagne (référence météo)	Zone rurale bocage	Zone urbanisée industrielle ou forestière	Centre de grande ville
$z_0$ (m)	0,005	0,07	0,3	1	2,5
k	0,166	0,202	0,234	0,266	0,292
K	0,166	0,202	0,212	0,234	0,234



Turbulence accrue par rapport à celle de campagne



*La maquette d'étude dans son environnement*

## 2,2 application à la simulation du vent en soufflerie [réf. 2 et 5]

### 2,21 la simulation réalisée en soufflerie

En référence aux sites d'urbanisation les plus courants, un vent amont de type statistique « banlieue pavillonnaire » a été retenu pour l'étude. Dans certains cas, l'influence immédiate pavillonnaire a été considérée.

Pour des raisons de précision de positionnement des sondes anémométriques et de miniaturisation des mesures de pression instantanée sur les deux côtés d'un capteur solaire, la dimension des maquettes n'a pas pu être envisagée à une échelle plus petite que le 1/50 (cf. fig. ci-dessus).

Dans la soufflerie turbulente du CSTB, les caractéristiques de l'écoulement vent (banlieue pavillonnaire) à cette *grande échelle* (1/50) n'ont pu être reproduites que de manière

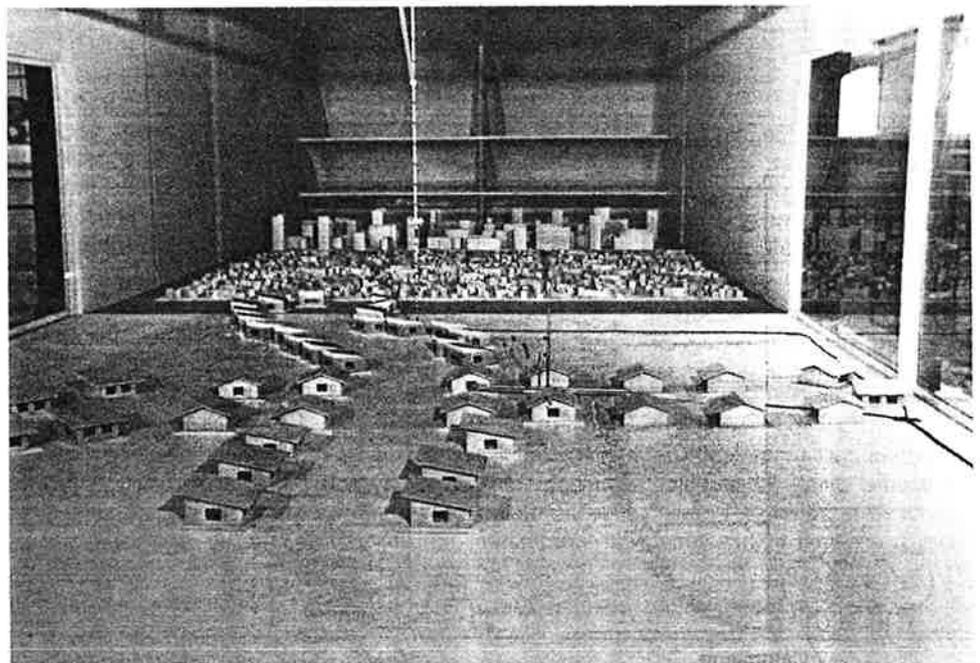
approchée (problème notamment des dimensions de la chambre <sup>(1)</sup> d'expérience incompatible avec des échelles de turbulence supérieure au 1/250) (cf. fig. ci-dessous).

Si le profil de vitesse moyenne et le paramètre de rugosité ( $z_0 \approx 0,5$  m) sont tout à fait compatibles avec un vent de type banlieue, le taux de turbulence obtenu :

$$\frac{\sigma}{\bar{U}_2} \approx 15 \% \text{ à } z = 15 \text{ m}$$

est relativement trop faible par rapport à la vraie grandeur où l'on attend plutôt 26 %.

1. A partir de 1984, cette chambre a été agrandie. Actuellement, le CSTB dispose également d'une soufflerie atmosphérique de grande dimension autorisant une reproduction exacte du phénomène vent jusqu'à l'échelle du 1/100.



*Nouvelle chambre d'expérience de la soufflerie à couche limite (agrandissement 1984) (voir aussi photos p. ci-contre)*

2,22 le facteur correctif

On peut montrer que le rapport entre les écarts types des

écoulements de contournement d'un bâtiment  $\frac{1}{n} \sum \sigma_{ei}$  et l'écart type du vent incident à la référence  $\sigma_{ref}$  ( $z = 15$  m) évolue très lentement en fonction du taux de turbulence amont (cf. Annexe), voir figure ci-dessous.

En prenant en compte cette constatation expérimentale, on a pu déduire par calcul les écarts types réels des écoulements de contournement de ceux obtenus avec notre simulation approchée ; la correction à apporter s'exprime alors par :

$$\left( \frac{\sigma_e}{\sigma_{ref}} \right)_{\text{vent réel de type banlieue pavillonnaire}} \approx 0,92 \left( \frac{\sigma_e}{\sigma_{ref}} \right)_{\text{vent simulé}}$$

ou

$$\sigma_e \approx 0,92 \frac{\frac{\sigma_{ref}}{U_{ref}}}{\frac{\sigma_{ref \text{ soufflerie}}}{U_{ref}}} \sigma_e \text{ soufflerie}$$

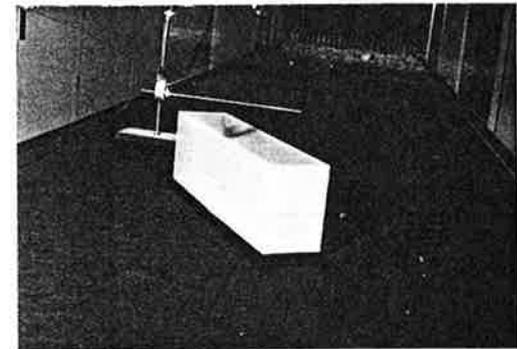
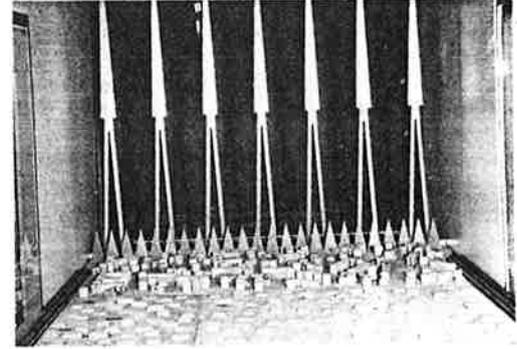
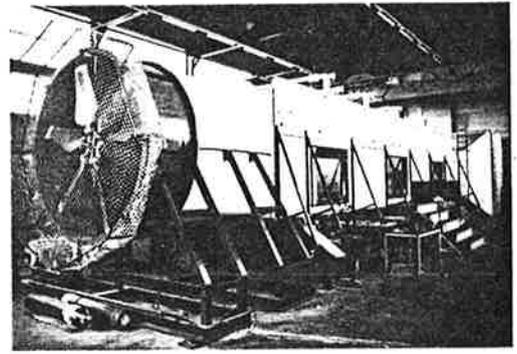
soit

$$\sigma_e \text{ réel} \approx \underbrace{0,92 \times \frac{0,26}{0,15}}_{1,6} \sigma_e \text{ soufflerie}$$

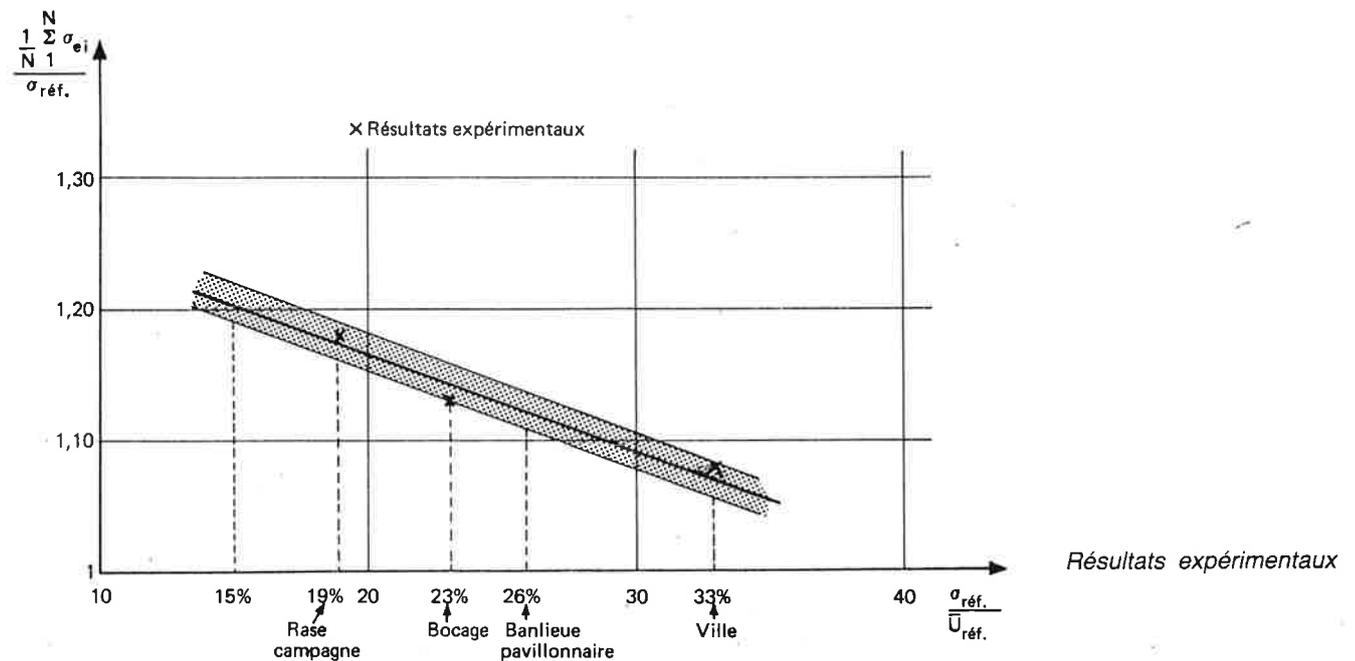
Finalement, l'écart type que nous devons obtenir s'exprime par :

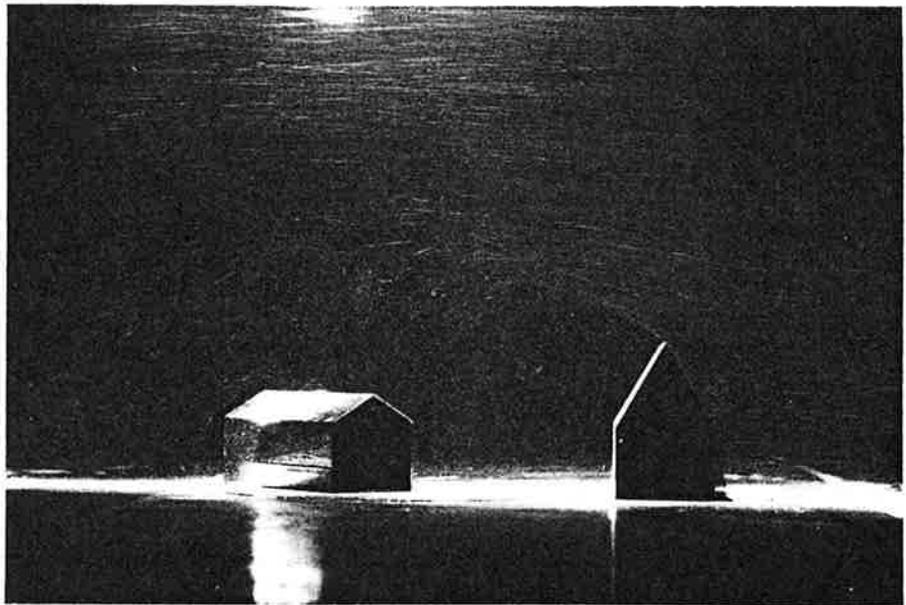
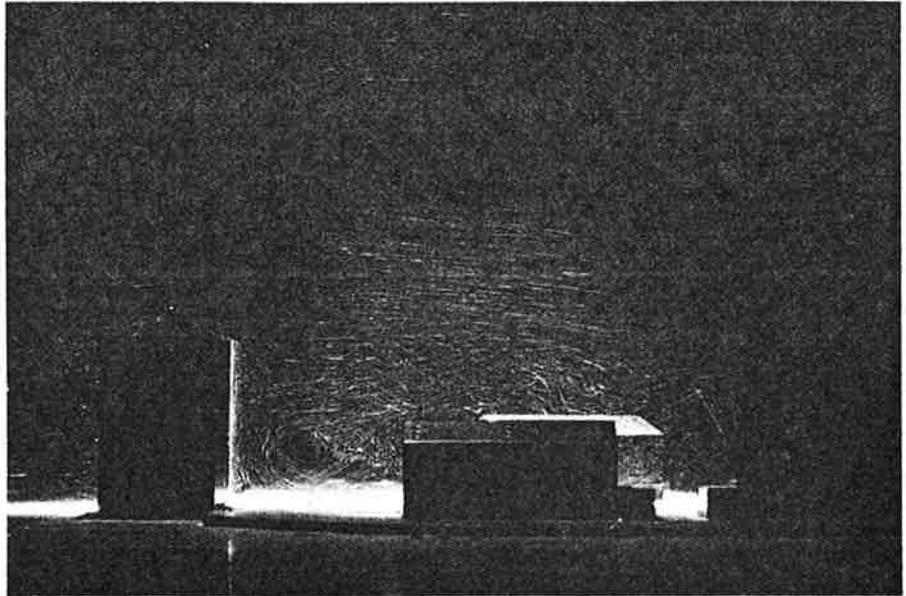
$$\sigma_e \approx 1,6 \sigma_e \text{ soufflerie}$$

Cette correction a été systématiquement introduite dans la présentation de nos résultats.



Vue extérieure et intérieure de la soufflerie à couche limite équipée de son dispositif de simulation (générateur de tourbillons et rugosités)






---

### 3 vitesse et pression au contournement des bâtiments : généralités

---

Au contournement d'une construction, le vent crée, sur la face au vent, une zone en surpression avec échappement de l'écoulement latéralement et vers le haut ; un tourbillon de pied (interaction avec le sol) peut aussi apparaître. Latéralement, les filets fluides sont fortement accélérés et décollent au niveau des arêtes en induisant, le long des parois, des zones dépressionnaires. L'écoulement décollé peut venir se rattacher sur la forme.

*Nota :* Ces phénomènes de décollement peuvent apparaître aussi au voisinage des corniches suivant la pente du toit.

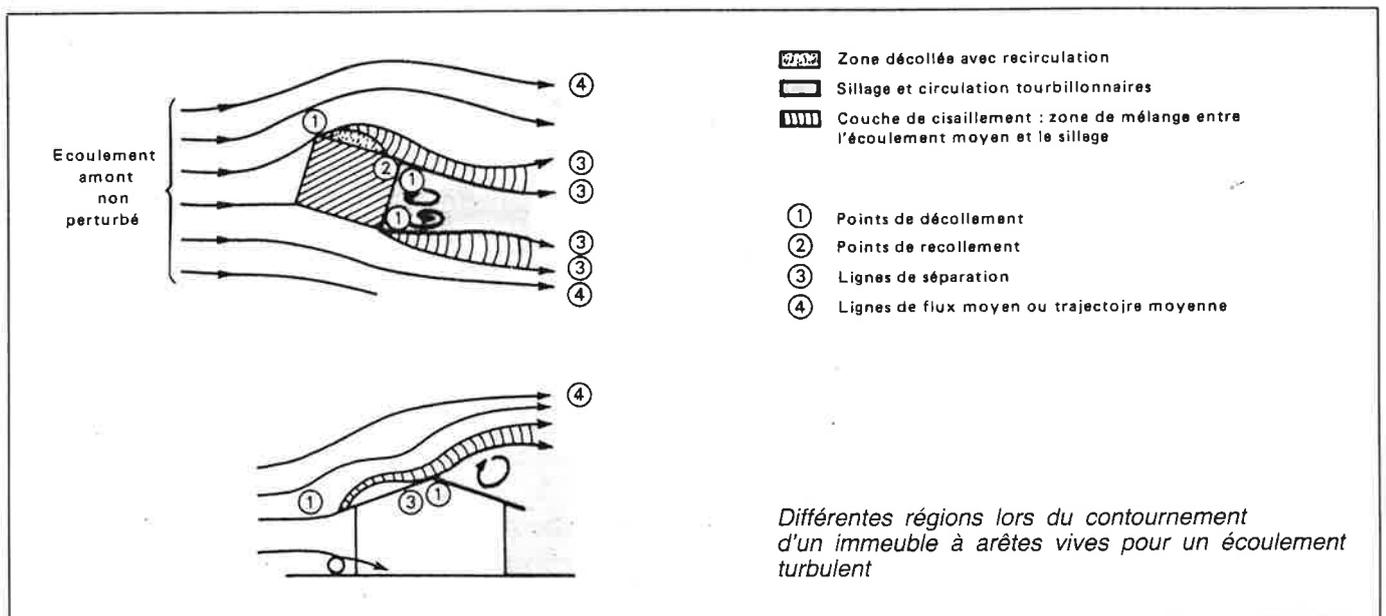
Sous le vent de l'obstacle (zone dépressionnaire), des mouvements tourbillonnaires importants se développent pour former le sillage.

La schématisation présentée ne doit pas être vue comme un état figé, mais plutôt comme une situation moyenne dans le temps, autour de laquelle l'ensemble fluctue plus ou moins suivant les zones. On peut noter le caractère particulièrement instable des zones de recollement ou des lignes de séparation. Les pressions se développant sur le bâtiment présenteront donc, de la même manière que les écoulements, une nature profondément fluctuante.

Les visualisations par chronophotographie laser, réalisées en soufflerie atmosphérique, expriment bien la complexité et la nature particulièrement instable des phénomènes.



Visualisation par chronophotographie des écoulements au contournement d'obstacles bâtis



## 4 champ de vitesse et de turbulence au contournement des bâtiments

### 4,1 présentation générale des résultats

Les écoulements mesurés au voisinage des parois correspondent à une couche comprise entre 0 et 0,4 m et parallèle au plan de la paroi.

*Nota :* Les mesures ont été réalisées à l'aide de sondes anémométriques à fil chaud placées systématiquement orthogonalement aux plans des parois. Le fil chaud n'est pas sensible au sens de l'écoulement et aucune indication de sens de l'écoulement n'a donc pu être relevée.

Nous rappelons que la simulation de l'écoulement vent est du type « banlieue corrigée » avec et sans environnement immédiat.

La présentation des résultats est faite sous forme de coefficients adimensionnels :

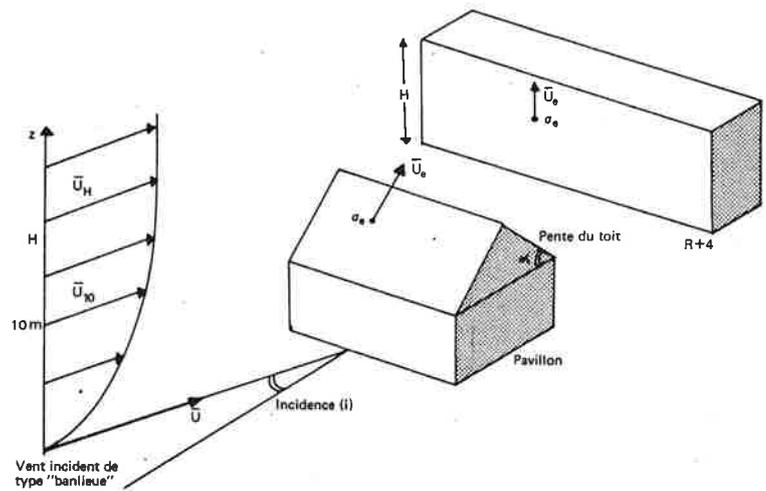
- coefficient de vitesse moyenne :

$$U_+ = \frac{\bar{U}_e}{\bar{U}_{\text{réf}}}$$

- coefficient de turbulence réel :

$$\sigma_+ = \frac{\sigma_e}{\sigma_{\text{réf}}}$$

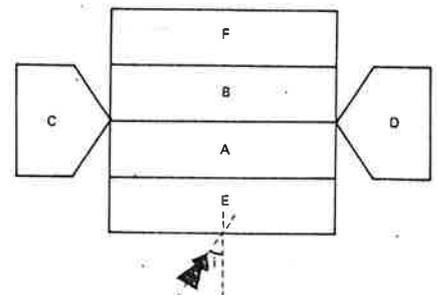
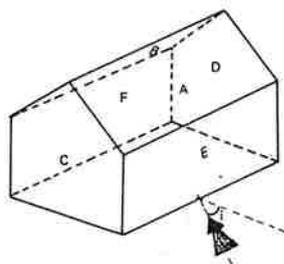
où  $\bar{U}_{\text{réf}}$  est la vitesse à l'amont de la construction et  $\bar{U}_e$  la vitesse moyenne locale au niveau de la paroi. Les écarts types associés sont respectivement  $\sigma_{\text{réf}}$  et  $\sigma_e$ .



Pour le pavillon, la vitesse de référence et l'écart type associé seront pris à la hauteur de 10 m (vent incident), quelle que soit la pente du toit  $\alpha$ .

Pour le collectif, la hauteur de référence sera  $z = H$  hauteur du bâtiment, soit 15 m.

Ces résultats quantitatifs adimensionnels  $U_+$  et  $\sigma_+$  obtenus sur les différentes zones des bâtiments, sont représentés graphiquement sur des planches représentant les « développés des parois », pour le vent de type banlieue pavillonnaire en fonction de l'incidence.



Trois incidences « i » de vent sont fournies : 0°, 45° et 90°.

*Nota :* Les résultats indiqués pour l'incidence 45° regroupent, en fait, ceux obtenus pour les incidences obliques 30°, 45° et 60°.

## 4,2 calcul des grandeurs réelles en fonction des données météorologiques

On peut aussi exprimer les vitesses locales et les écarts types associés au voisinage des parois de manière dimensionnelle en les reliant aux données de la station météorologique ( $U_{10 \text{ météo}}$ ) par le schéma suivant :

$$\bar{U}_e = U_+ \bar{U}_{\text{réf}} = U_+ k \text{Log}_e \left( \frac{z_{\text{réf}}}{z_0} \right) \bar{U}_{10 \text{ météo}}$$

avec, pour le vent de type banlieue pavillonnaire,  $k \approx 0,25$ ,  
 $z_0 \approx 0,5 \text{ m}$

$z_{\text{réf}} = 10 \text{ m}$  pour le pavillon individuel

$z_{\text{réf}} = z_H = 15 \text{ m}$  pour le collectif,

soit, pour le pavillon :

$$\bar{U}_e \approx 0,75 U_+ \bar{U}_{10 \text{ météo}}$$

et pour le collectif :

$$\bar{U}_e \approx 0,85 U_+ \bar{U}_{10 \text{ météo}}$$

De même, pour l'écart type associé ( $K = 0,22$ ) :

$$\sigma_e = \sigma_+ \sigma_{\text{réf}}$$

soit :

$$\sigma_e = 0,22 \sigma_+ \bar{U}_{10}$$

Enfin, la valeur extrême de vitesse locale peut être approchée par l'expression :

$$\hat{U}_e = \bar{U}_e + \beta \sigma_e$$

où  $\beta$  varie, suivant les zones, entre 2,8 et 3,8 et sera prise égale à 3,5 (cohérence avec la nature turbulente du vent incident)

$$\hat{U}_e \approx U_+ \bar{U}_{\text{réf}} + 3,5 \sigma_+ \sigma_{\text{réf}}$$

soit,

pour le pavillon individuel :

$$\hat{U}_e \approx (0,75 U_+ + 0,77 \sigma_+) \bar{U}_{10 \text{ météo}}$$

pour le collectif :

$$\hat{U}_e \approx (0,85 U_+ + 0,77 \sigma_+) \bar{U}_{10 \text{ météo}}$$

## 4,3 pavillon individuel

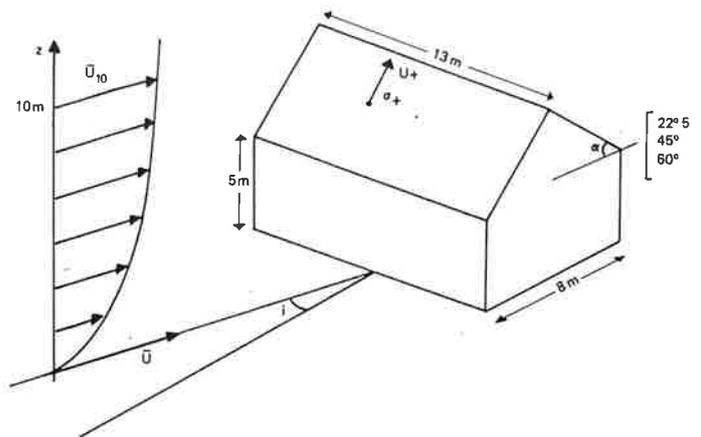
Vent du type banlieue pavillonnaire :

$$(U_{\text{réf}} = \bar{U}_{\text{amont}} \text{ à } z = 10 \text{ m})$$

Pour chaque zone, les figures des pages 10, 11 et 12 indiquent le couple des valeurs :

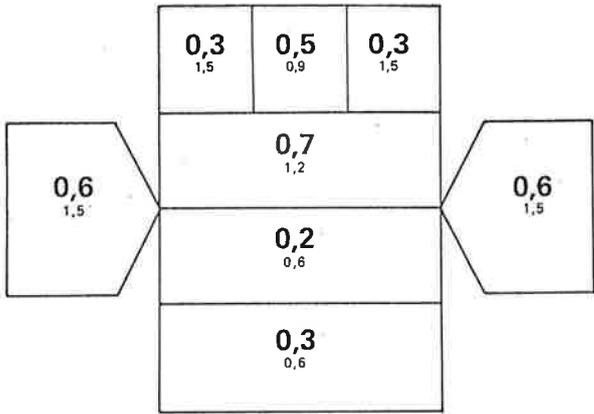
$$U_+ = \frac{\bar{U}_e}{\bar{U}_{\text{réf}}} \text{ (valeur en gras)}$$

$$\sigma_+ = \frac{\sigma_e}{\sigma_{\text{réf}}} \text{ (valeur en maigre)}$$

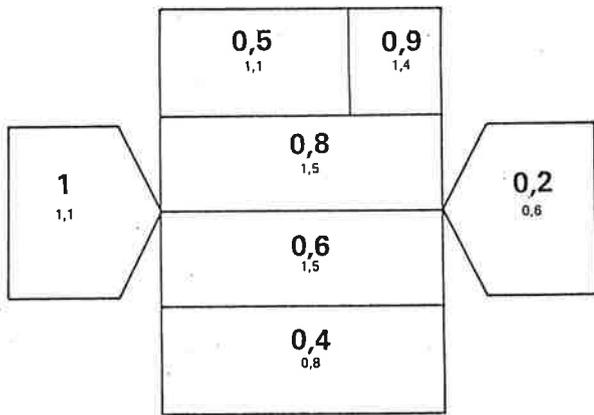


Pavillon individuel  
 $\alpha = 22^{\circ} 5'$

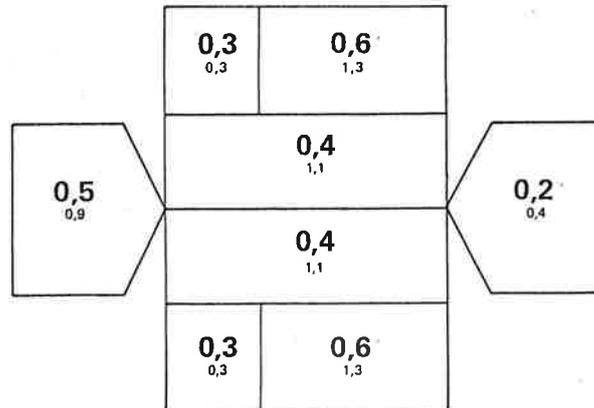
0°



45°

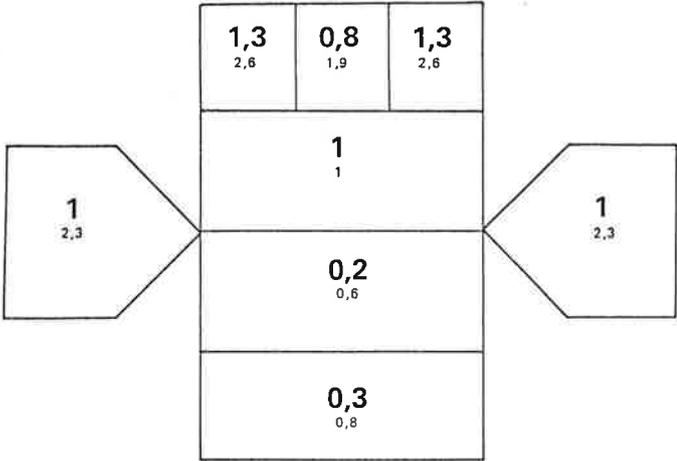


90°

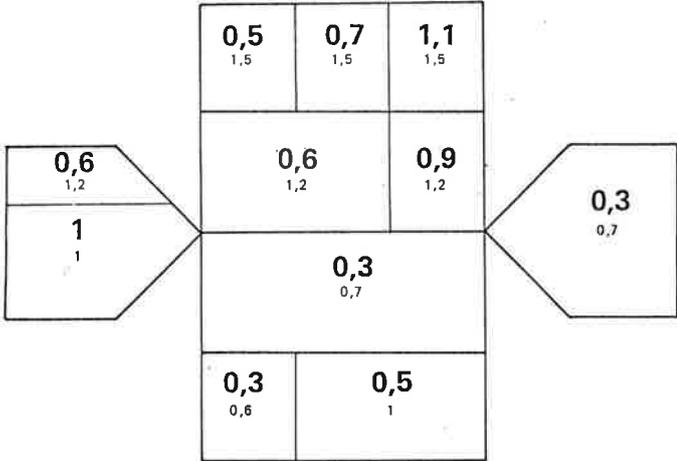


Pavillon individuel  
 $\alpha = 45^\circ$

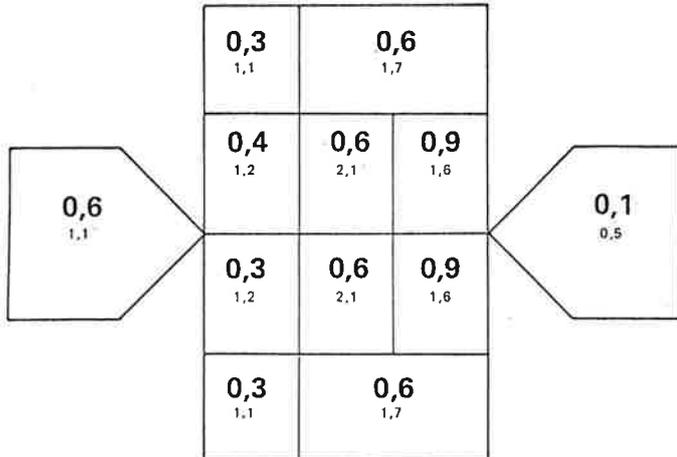
0°



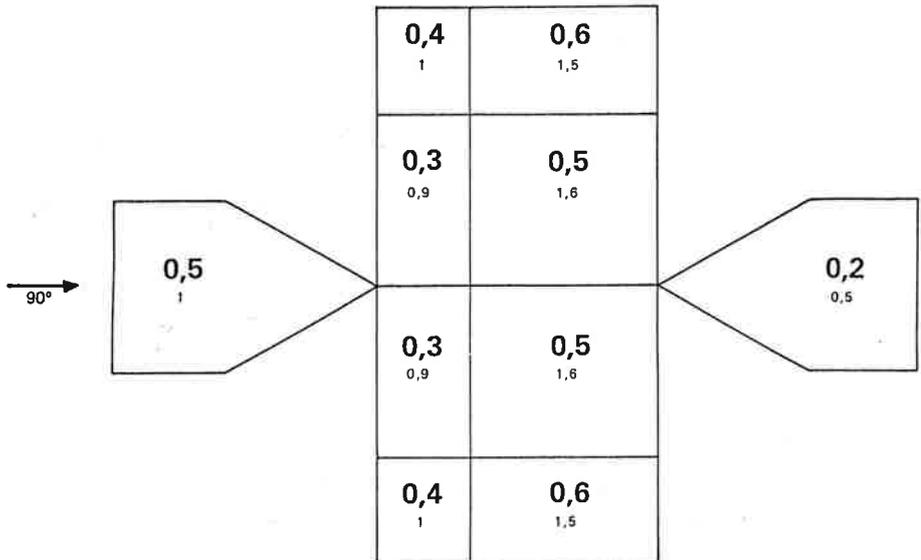
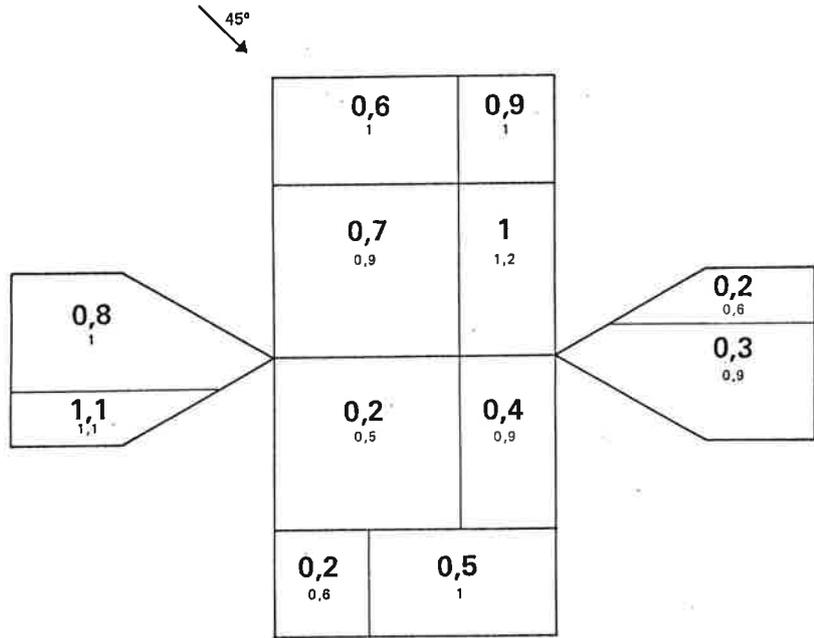
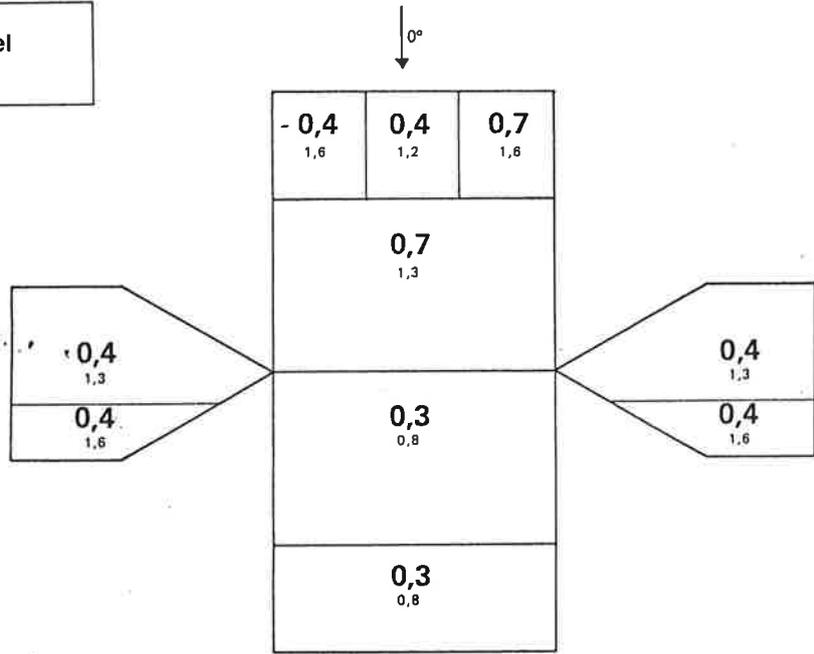
45°

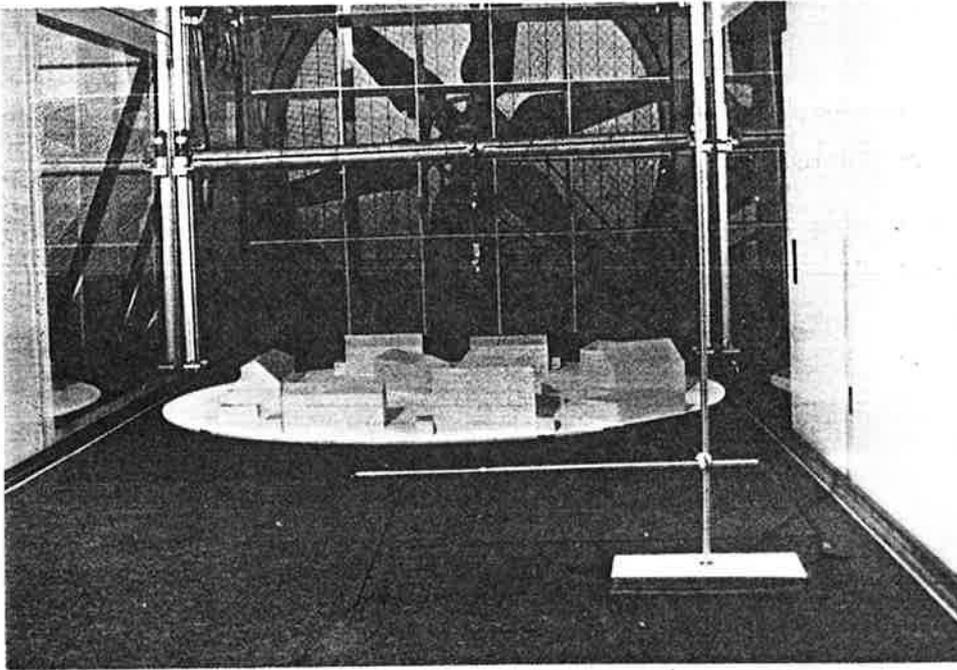


90°



Pavillon individuel  
 $\alpha = 60^\circ$



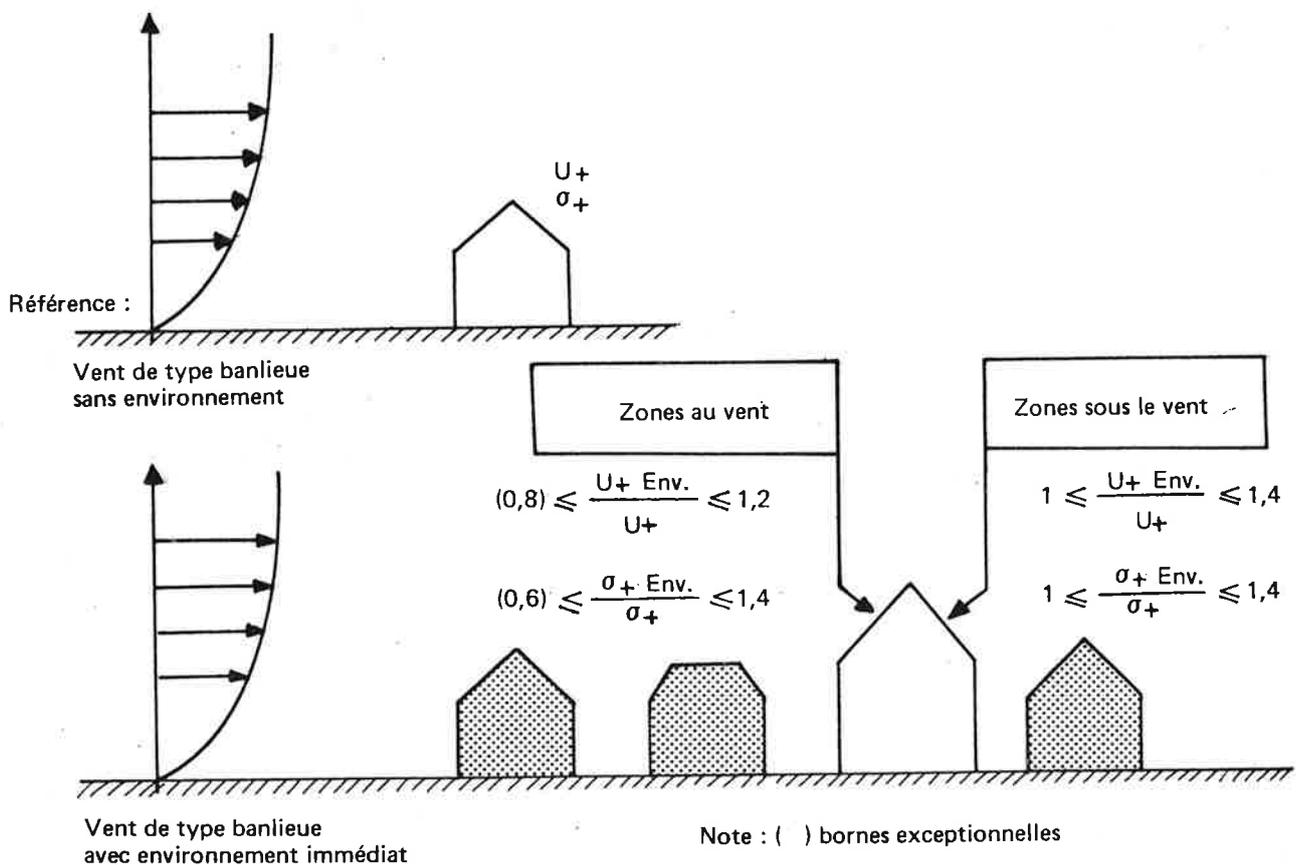


Maquette du plan masse étudié

remarque sur l'influence de l'environnement immédiat

Plongé dans un environnement immédiat de type pavillonnaire, on constate que les interactions peuvent modifier les écoulements de contournement sur les façades et la toiture. Une dizaine de situations ont été considérées en changeant l'implantation des maisons dans le plan masse et la direction du vent par rapport à ce dernier. On constate que, *toutes zones confondues*, le phénomène d'interaction des bâtiments induit systématiquement des accélérations locales et qu'il y a plutôt un enrichissement en agitation des écoulements.

Quantitativement, on peut avancer les valeurs ci-après :



#### 4,4 collectif R + 4

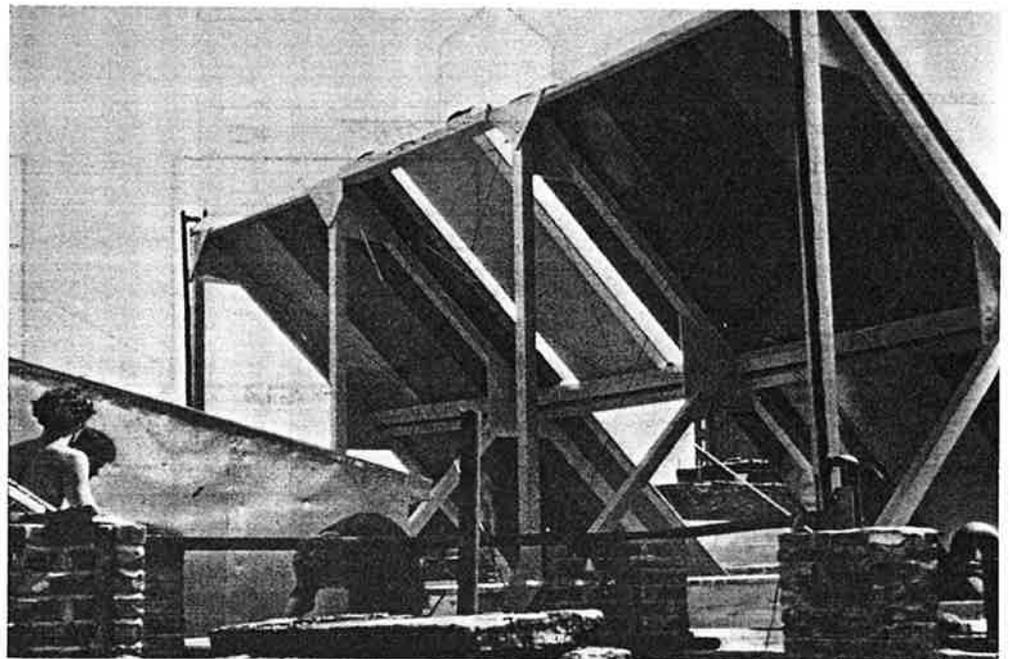
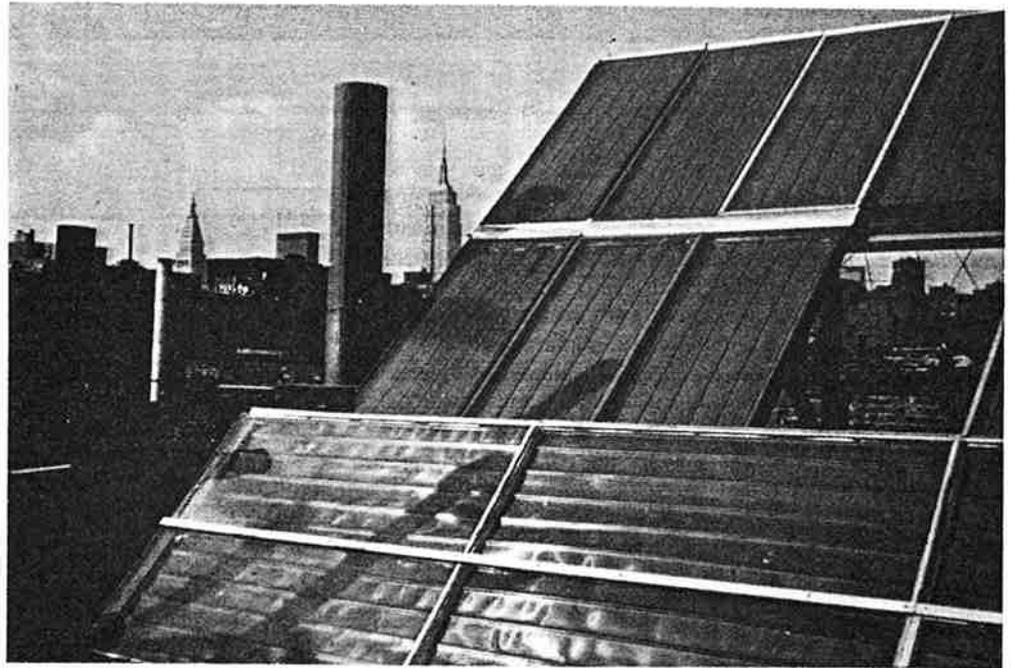
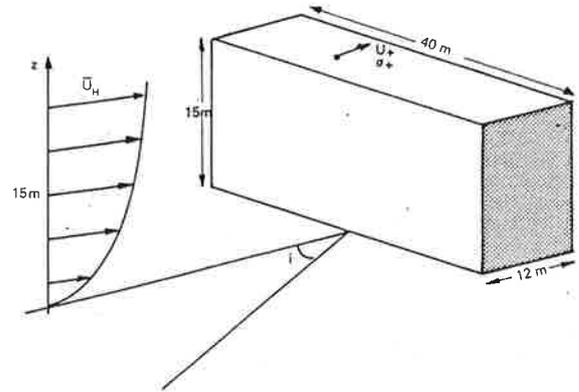
Vent de type banlieue pavillonnaire

$\bar{U}_{\text{réf}} = \bar{U}_{H \text{ amont}}$  à  $z = H$  hauteur du bâtiment, soit 15 m

Pour chaque zone, les figures de la page 15 indiquent le couple des valeurs :

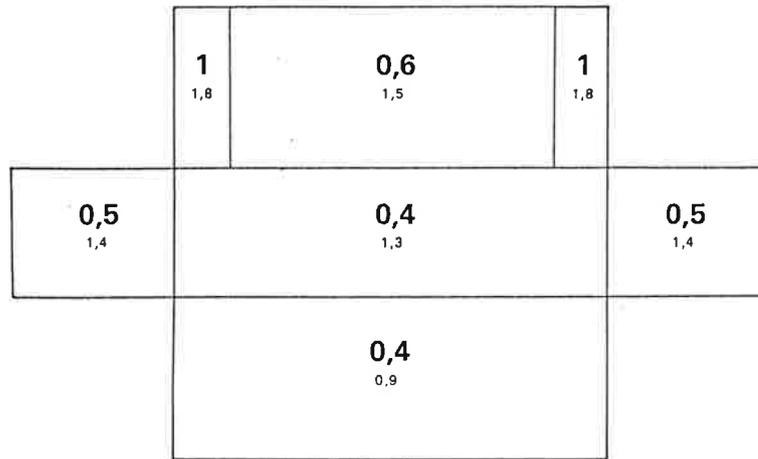
$$U_+ = \frac{\bar{U}_e}{\bar{U}_{\text{réf}}} \text{ (valeur en gras)}$$

$$\sigma_+ = \frac{\sigma_e}{\text{réf}} \text{ (valeur en maigre)}$$

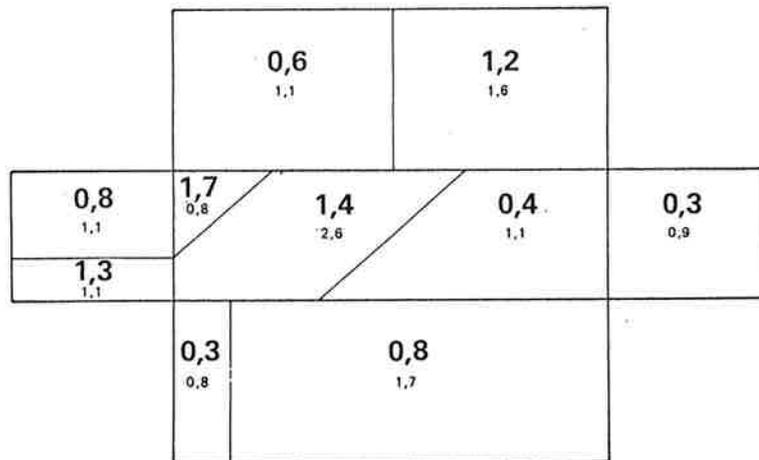


*Capteurs  
en toiture-terrasse*

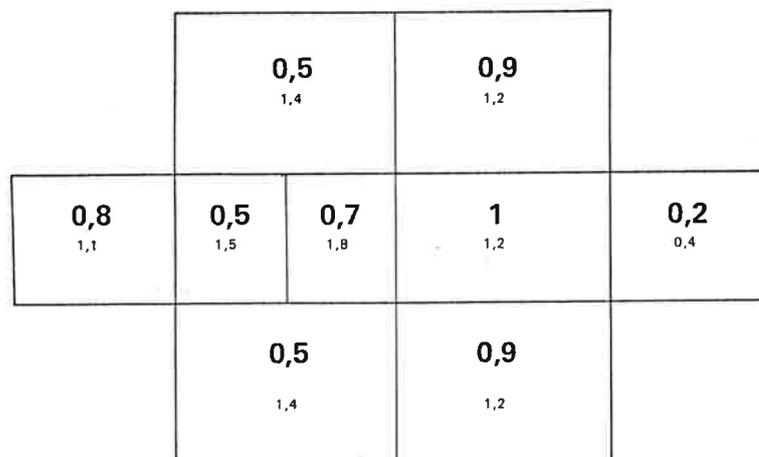
0°



45°



90°



#### 4,5 application au fonctionnement thermique d'un capteur solaire [réf. 6 et 7]

Les capteurs solaires transforment l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique. Leur rendement (rapport de l'énergie recueillie à l'énergie reçue du soleil) dépend surtout de l'intensité du rayonnement solaire et de la différence de température entre l'air ambiant et l'absorbeur. Pour obtenir un rendement maximal du capteur, il faut minimiser les pertes d'énergie thermique qui sont dues à la réflexion du rayonnement solaire incident, à la réémission thermique, à la conduction et à la convection.

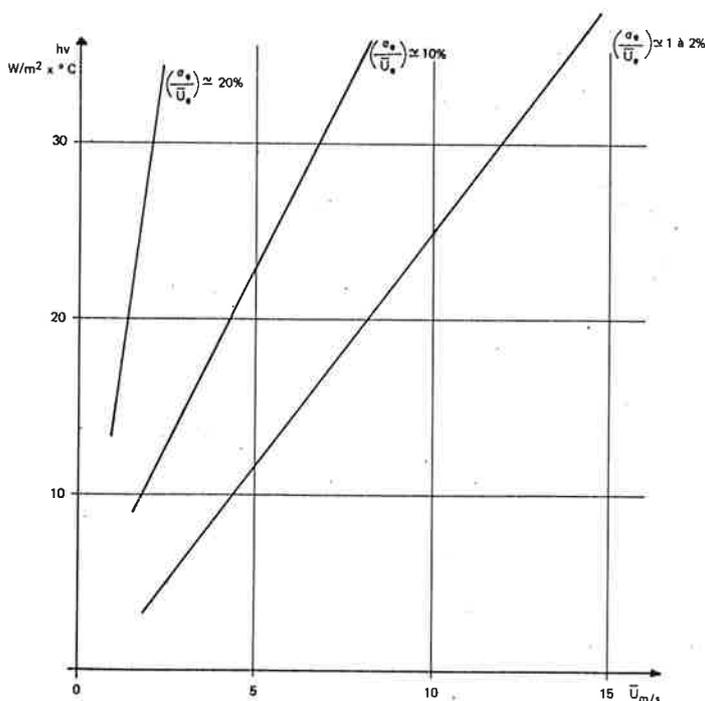
*Nota :* Cet effet de convection est d'autant plus important que le capteur ne présente pas de vitrage (cas des capteurs à prix réduit).

Par suite, le capteur étant placé en paroi ou en toiture d'un bâtiment, les pertes de chaleur par convection forcée en régime turbulent deviennent dépendantes de la zone d'implantation du capteur sur le bâtiment. Compte tenu des dimensions du capteur par rapport à celles de l'obstacle qui impose les écoulements de contournement, on peut penser que ces derniers resteront quasi-inchangés en présence du capteur solaire.

Une expérimentation sur un capteur à l'échelle 1/1 a permis d'estimer grossièrement l'influence de la vitesse au voisinage du capteur et de la turbulence associée sur le coefficient d'échange superficiel  $h_v$  (en  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ). Cette étude a montré, outre l'influence (connue) de la vitesse pariétale,

l'importance considérable des taux de turbulence  $\frac{\sigma_e}{U_e}$  sur les déperditions par convection.

La gamme testée en vitesse (1 à 15 m/s) et en intensité de turbulence (quelques % à 20 %) conduit aux ordres de grandeur ci-dessous.

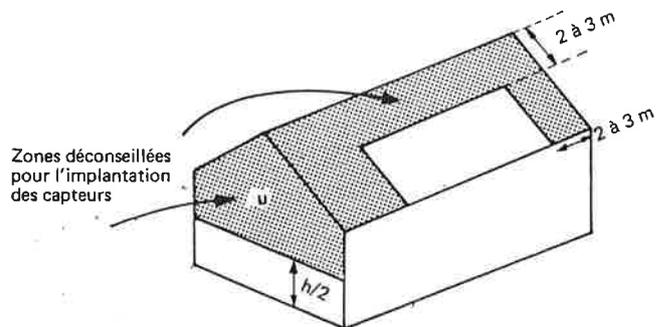


Par suite, pour un capteur solaire placé sur un toit, les pertes de chaleur par convection seront d'autant plus importantes (rendement thermique d'autant plus faible) qu'il sera implanté dans une zone fortement turbulente avec une vitesse moyenne pariétale élevée.

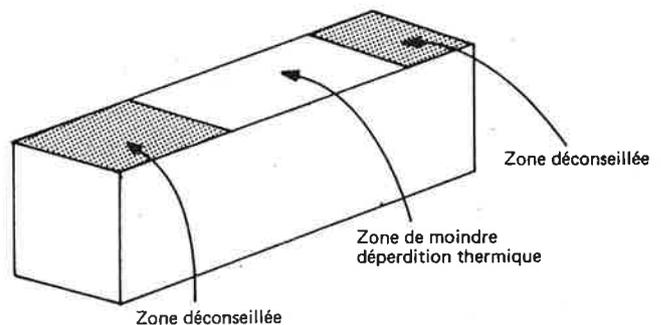
*Nota :* Les écoulements de contournement ont des taux de turbulence qui sont plutôt de l'ordre de 30 %. Par conséquent, en situation réelle, l'influence de la turbulence sur le coefficient d'échange peut être encore supérieure à l'évaluation présentée précédemment.

En partant des principes que moins les écoulements au voisinage des capteurs solaires seront localement rapides et qu'à niveau de vitesse moyenne équivalente, il faut choisir une implantation de capteur où la turbulence est la plus faible, on peut recommander pour un meilleur rendement thermique du capteur les implantations suivantes :

- pour le pavillon R + 0, R + 1 et pour toutes pentes de toit et direction de vent confondues, nous avons décelé, en retournant aux données brutes, une zone à éviter : elle comporte une bande de 2 à 3 m de part et d'autre du faîtage et le long des arêtes du toit, ainsi que la moitié supérieure des pignons ;



- pour les collectifs, et en considérant la direction des vents dominants quelconques par rapport au bâtiment, il sera préférable de placer les capteurs à environ 15 m des pignons.



*Nota :* Si la direction des vents dominants est définie par rapport au bâtiment, la zone de moindre déperdition thermique peut être agrandie et mieux optimisée (voir résultats précédents indiqués en fonction de l'incidence).

#### remarque importante

La mise en place d'un acrotère « brise-vent » perméable (perméabilité de 50 % avec orifice  $0,1 \times 0,1$  m) de hauteur 1 m, au niveau de la périphérie d'une terrasse de collectif, réduit les vitesses et la turbulence d'environ 50 % dans la couche 0 à 1,5 m au-dessus du toit.

*Nota :* Cet effet est pratiquement conservé si le linéaire d'acrotère ainsi traité est limité aux bords « au vent » de la terrasse.

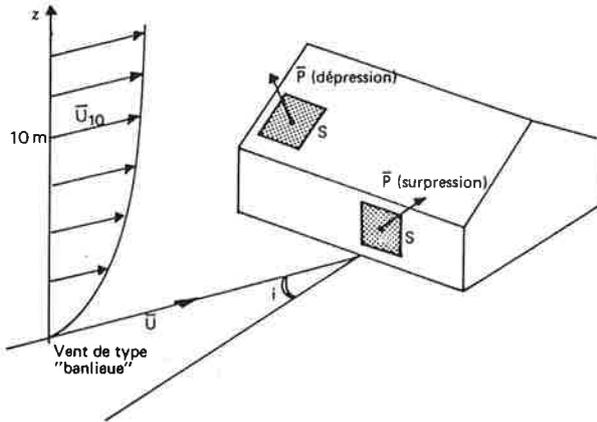
Par rapport à l'acrotère non traité, cette intervention conduit à une augmentation du rendement thermique d'environ 5 % (pour un capteur de  $4 \text{ m}^2$ ).

*Nota :* Un traitement aérodynamique au voisinage des bords propres du capteur devrait aussi permettre de réduire les vitesses pariétales et les taux de turbulence associés et, par là-même, améliorer le fonctionnement du capteur.

## 5 champ de pression sur les éléments de façade et toiture, ou sur les capteurs solaires

### 5,1 généralités

#### 5,11 champ de pression externe



Le vent développe sur tous obstacles un champ de pression fluctuant dans le temps. Suivant les zones, cette pression induira des forces d'arrachement (dépression) ou d'écrasement (surpression).

La pression instantanée en un point donné peut s'exprimer par l'expression :

$$P_{(t)} = \bar{P} + P'_{(t)}$$

où  $\bar{P}$  est la pression moyenne sur une durée T et  $P'$  la fluctuation à l'instant t.

On peut rapporter cette pression à la pression dynamique de référence amont  $1/2 \rho \bar{U}_{réf}^2$  et introduire les coefficients suivants :

– coefficient de pression moyenne :

$$\bar{C}_P = \frac{\bar{P}}{1/2 \rho \bar{U}_{réf}^2}$$

– coefficient de pression fluctuant (écart type de pression) :

$$\sigma_P = \frac{\sqrt{\overline{P'^2}}}{1/2 \rho \bar{U}_{réf}^2} \quad \text{avec :} \quad \overline{P'^2} = \frac{1}{T} \int_0^T P'^2(t) dt$$

– coefficient de pression externe (valeur de pointe maximale et minimale) :

$$\hat{C}_P = \frac{\text{Sup}(P)}{1/2 \rho \bar{U}_{réf}^2} = \text{Sup}(C_P)$$

$$\check{C}_P = \frac{\text{Inf}(P)}{1/2 \rho \bar{U}_{réf}^2} = \text{Inf}(C_P)$$

remarque sur le caractère turbulent du champ de pression [réf. 1]

Si, en moyenne dans le temps, les zones en dépression (écoulement décollé ou zone sous le vent) ou en surpression (zone au vent) sont bien définies, instantanément nous pourrions observer une valeur de pointe dépressionnaire pour un secteur placé au vent ( $\bar{P} > 0$ ) et une valeur de pointe surpressionnaire dans les zones sous le vent ( $\bar{P} < 0$ ).

#### 5,12 charge du vent sur un élément de paroi ou sur un capteur solaire

La charge instantanée que va subir l'élément de façade de surface S est la différence instantanée (moyennée sur cette surface) entre la pression externe  $P_{ext}$  et la pression régnant à l'arrière  $P_i$  de cet élément.

Par suite :

$$F_{(t)} = [P_{ext(t)} - P_i(t)] S = \Delta P_{(t)} \cdot S$$

ou, en introduisant les coefficients de pression correspondants :

$$F_{(t)} = \Delta C_{P(t)} \cdot S \cdot 1/2 \rho \bar{U}_{réf}^2$$

Cette force aura une valeur moyenne  $\bar{F}$ , un écart type et des valeurs extrêmes  $\hat{F}$ , soit :

$$\hat{F} = (\text{Sup} \Delta C_{P(t)}) \cdot S \cdot 1/2 \rho \bar{U}_{réf}^2$$

$$\check{F} = (\text{Inf} \Delta C_{P(t)}) \cdot S \cdot 1/2 \rho \bar{U}_{réf}^2$$

Capteurs solaires :  
implantation dans un champ  
aérodynamique particulier



Dans le cas théorique d'éléments collés à la paroi et étanches vis-à-vis de l'extérieur, on admettra que la pression atmosphérique règne au dos de l'élément ( $C_{Pi} \approx 0$ ). Seule, la connaissance du champ de pression externe sur l'élément considéré S sera nécessaire au calcul de la charge.

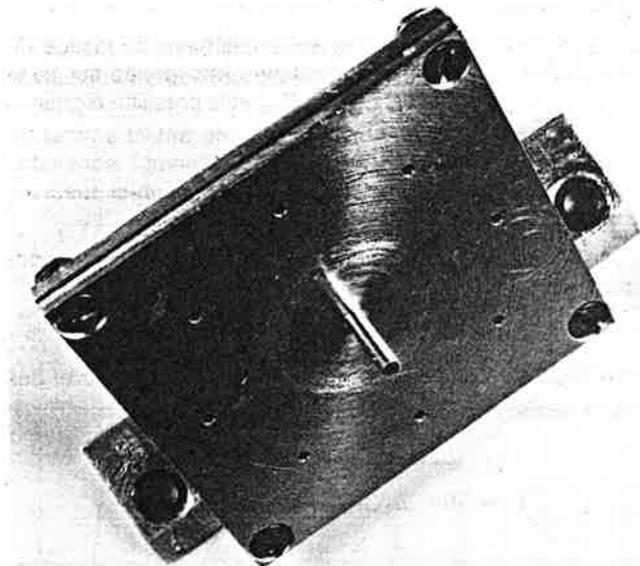
Par contre, dans le cas où l'élément est décollé (exemple type du capteur solaire) ou présente une perméabilité marquée avec l'extérieur, il sera alors nécessaire de connaître la différence instantanée des pressions régnant des deux côtés de l'élément S. L'écart maximal de pression sera alors retenu pour le calcul de la charge de l'élément.

### 5,13 détermination des champs de pression en soufflerie

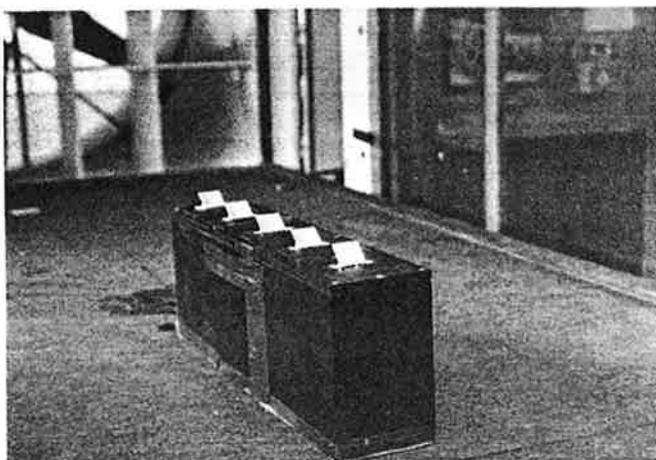
Nous avons déjà présenté (cf. § 2,2) l'approche expérimentale en soufflerie sur modèle au 1/50.

La maquette a été équipée de prises de pression avec moyennages pneumatiques pour des éléments de 4 m<sup>2</sup>. Dans le cas du capteur solaire décollé (4 m<sup>2</sup>), la différence de pression instantanée régnant de part et d'autre du capteur a été mesurée.

La détermination des pressions instantanées régnant sur les éléments de surface S a nécessité une technologie fluide d'intégration spatiale sophistiquée [réf. 8].



Le capteur équipé de ses prises de pression (recto-verso)



La maquette du bâtiment R + 4 avec une rangée de capteurs

### remarques sur les conditions de simulation du vent

Nous avons déjà vu qu'une correction au niveau des écoulements de contournement avait été introduite (cf. § 2,22) dans la mesure où le vent simulé présentait un déficit de taux de turbulence (0,15 en soufflerie contre 0,26 en vraie grandeur pour  $z = 15$  m).

A partir d'études menées en soufflerie [réf. 1] sur l'évolution des pressions moyennes et des fluctuations de pression se développant sur les obstacles pour différents taux de turbulence du vent, nous pouvons indiquer statistiquement (sur la globalité des champs de pression) les tendances suivantes :

- le champ de pression moyen  $\bar{P}$  pour les deux taux de turbulence  $I_1 = 0,15$  et  $I_2 = 0,26$  est tel que :

$$\bar{P}_{I_2} \approx 1,3 \bar{P}_{I_1}$$

- l'écart de pression  $\sigma$  pour les deux taux de turbulence est tel que :

$$\sigma_{I_2} \approx 1,3 \sigma_{I_1}$$

- les pointes de pression  $\hat{P}$  et  $\check{P}$  sont reliées aux valeurs moyennes et à l'écart type par l'approximation :

$$\hat{P}_{I_2} \approx \bar{P}_{I_2} + 4,5 \sigma_{I_2}$$

$$\check{P}_{I_2} \approx \bar{P}_{I_2} - 4,5 \sigma_{I_2}$$

Par suite, nous obtenons la correspondance suivante :

$$\hat{P}_{I_2} \approx 1,3 (\bar{P}_{I_1} + 3,5 \sigma_{I_1}) + 1,3 \sigma_{I_1}$$

de même :

$$\check{P}_{I_2} \approx 1,3 (\bar{P}_{I_1} - 3,5 \sigma_{I_1})$$

et comme l'on peut considérer que :

$$\hat{P}_{I_1} \approx \bar{P}_{I_1} + 3,5 \sigma_{I_1}$$

$$\check{P}_{I_1} \approx \bar{P}_{I_1} - 3,5 \sigma_{I_1}$$

la correction devient la suivante :

$$\hat{P}_{\text{réel}} = 1,3 \hat{P}_{\text{mesuré}} + \sigma_{\text{mesuré}}$$

et

$$\check{P}_{\text{réel}} = 1,3 \check{P}_{\text{mesuré}} + \sigma_{\text{mesuré}}$$

Dans la présentation de nos résultats, cette correction a systématiquement été introduite afin de donner au tableau un caractère directement opérationnel.

### 5,14 calcul de la charge externe subie par un élément de surface S en fonction des données météorologiques

A partir des différentes pressions externes (Sup et Inf) s'exerçant de part et d'autre de l'élément de surface S, on aura comme force extrême :

$$\hat{F} = \text{Sup} (\Delta C_{P(t)}) S \cdot 1/2 \rho (k \text{Log}_e \frac{z_{\text{réel}}}{z_0})^2 \bar{U}_{10 \text{ météo}}^2$$

$$\check{F} = \text{Inf} (\Delta C_{P(t)}) S \cdot 1/2 \sigma (k \text{Log}_e \frac{z_{\text{réel}}}{z_0})^2 \bar{U}_{10 \text{ météo}}^2$$

En utilisant les valeurs présentées au paragraphe 4,1, nous obtenons :

– pour le pavillon individuel ( $z_{\text{réf}} = 10 \text{ m}$ ) :

- force extrême d'écrasement :

$$\hat{F} = \text{Sup} (\Delta C_{P(t)}) \times S \times 0,34 \bar{U}_{10 \text{ météo}}^2$$

- force extrême d'arrachement :

$$\check{F} = \text{Inf} (\Delta C_{P(t)}) \times S \times 0,34 \bar{U}_{10 \text{ météo}}^2$$

– pour le collectif ( $z_{\text{réf}} = H = 15 \text{ m}$ ) :

$$\hat{F} = \text{Sup} (\Delta C_{P(t)}) \times S \times 0,43 \bar{U}_{10 \text{ météo}}^2$$

## 5,2 présentation des champs de pression pour le pavillon et le collectif

Pour le pavillon (R + 0, R + 1) et le collectif (R + 4), nous considérerons successivement les cas où l'élément de surface de référence, soit  $4 \text{ m}^2$ , est collé de manière étanche à la paroi ou, au contraire, décollé de cette dernière (capteur solaire).

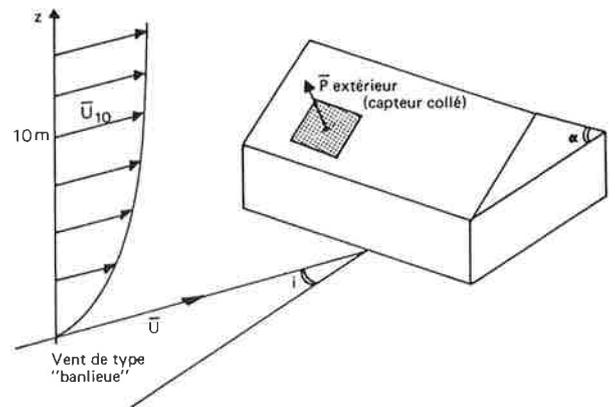
En fonction de l'incidence du vent et de la géométrie considérée, nous avons affecté à chaque zone d'implantation de l'élément de surface  $S$  ( $4 \text{ m}^2$ ), les écarts de pression extrêmes  $\text{Inf} (\Delta C_P)$  et  $\text{Sup} (\Delta C_P)$ , rapportés à la vitesse moyenne incidente amont à  $10 \text{ m}$  pour le pavillon et à la hauteur  $H$  ( $15 \text{ m}$ ) du collectif. En outre, et à toutes fins utiles (notions de fatigue), l'écart type de la différence de pression a aussi été indiqué.

*Nota :* Dans le cas du pavillon et pour des éléments de surface collés, la valeur moyenne des pressions extrêmes est aussi indiquée suivant les zones.

Nous rappelons que des résultats sont fournis pour un vent du type banlieue pavillonnaire et, dans certains cas, l'influence de l'environnement immédiat est quantifiée.

## 5,21 le pavillon

5,211 élément de surface ou du capteur solaire collé de manière à peu près étanche à la paroi



Dans ces conditions, la pression au dos de l'élément (ou du capteur) est la pression atmosphérique, alors :

$$\Delta \hat{C}_P \text{ ou } \Delta \check{C}_P = \hat{C}_{P_{\text{ext}}} \text{ ou } \check{C}_{P_{\text{ext}}}$$

Le problème de la tenue de l'élément  $S$  ou du capteur solaire est essentiellement un problème d'arrachement et, par conséquent, seules les valeurs extrêmes des pressions ont été considérées, soit  $\check{C}_P$ .

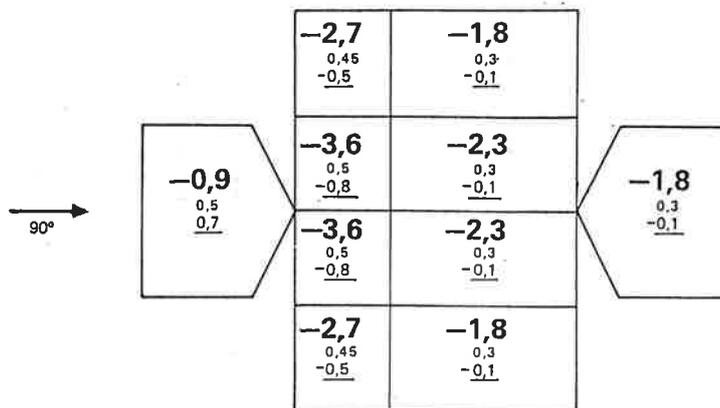
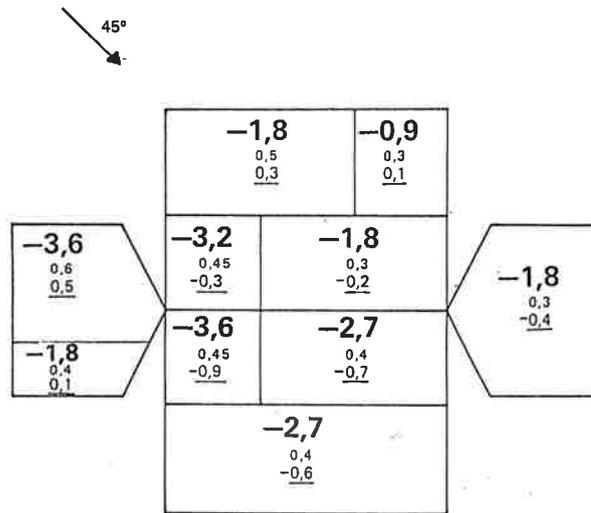
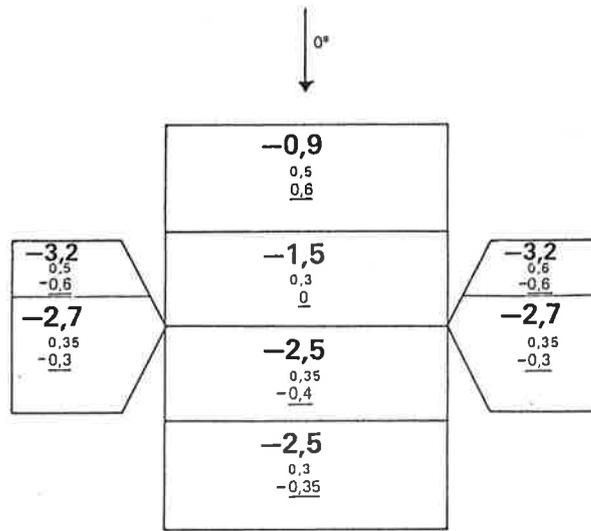
Par suite, dans les figures des pages 20, 21 et 22, une zone sera caractérisée par les trois valeurs :

- $\check{C}_P$  (valeur en gras)
- l'écart type  $\sigma_{C_P}$  (valeur en maigre)
- la valeur moyenne  $\bar{C}_P$  (valeur soulignée) :

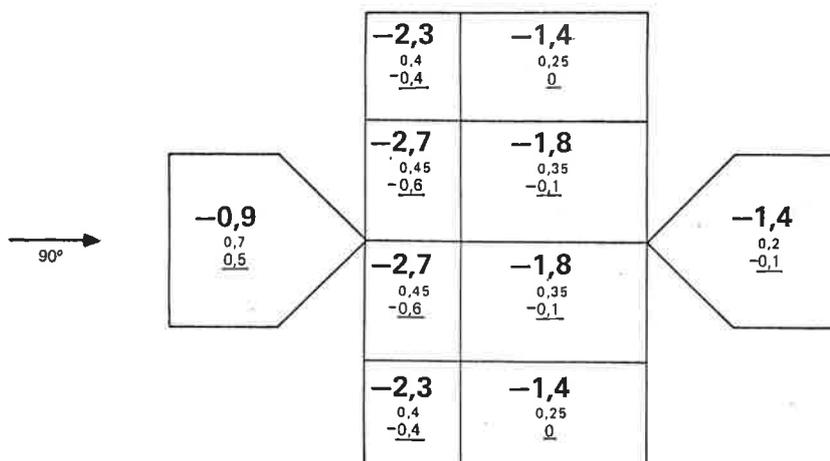
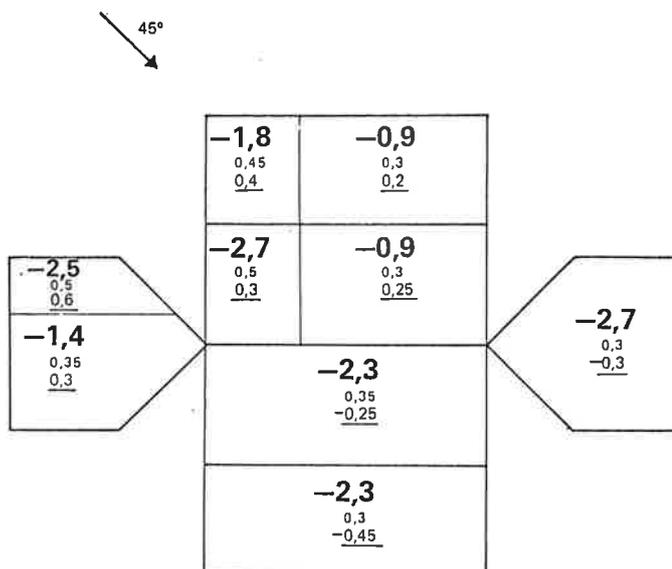
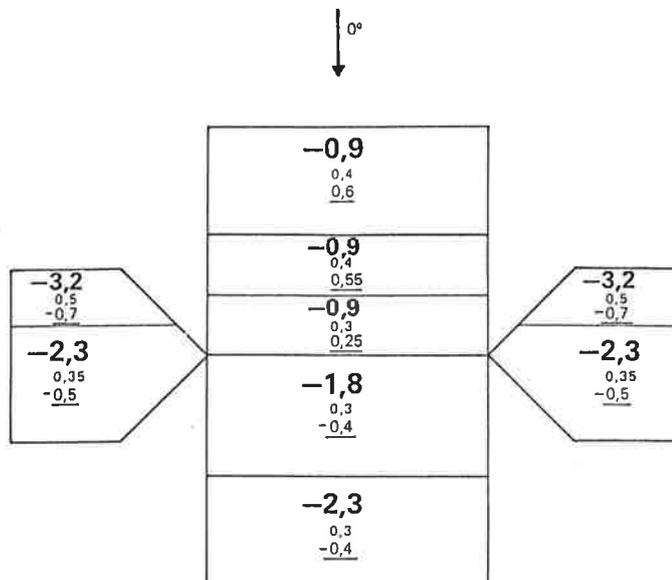


Capteurs solaires « collés » en toiture (contact étanche)

Pavillon (R+0, R+1)  
 $\alpha = 22^{\circ} 5'$

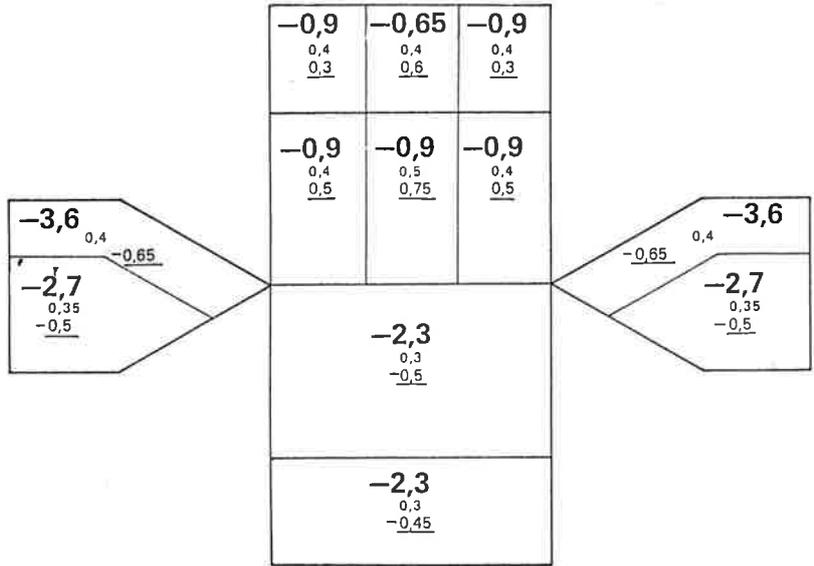


Pavillon (R+0, R+1)  
 $\alpha = 45^\circ$

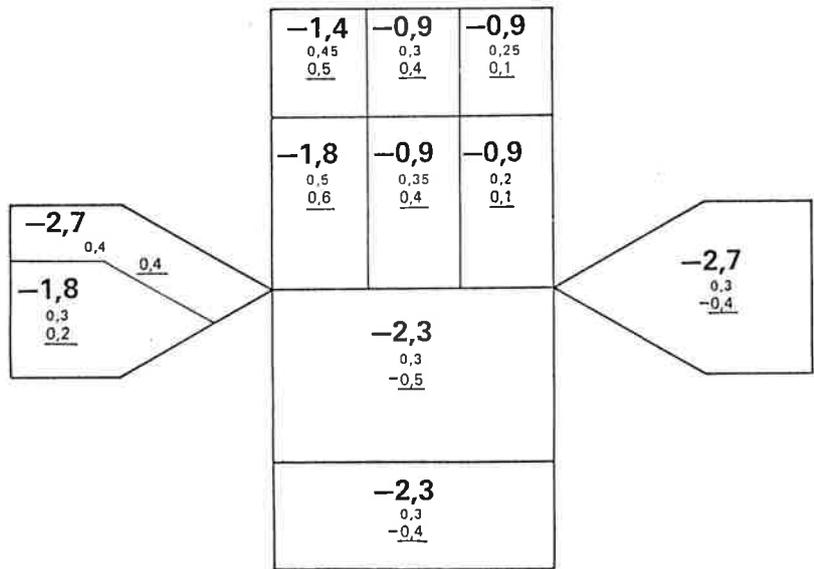


Pavillon (R+0, R+1)  
 $\alpha = 60^\circ$

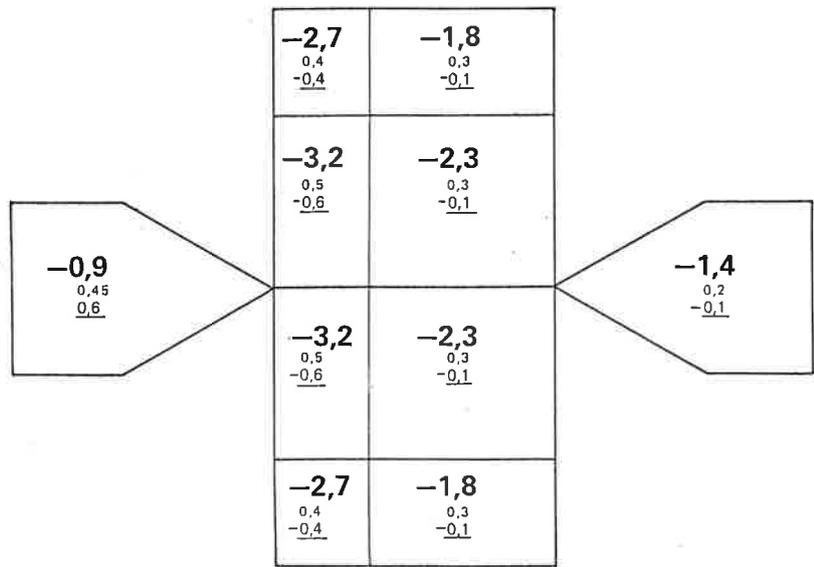
0°



45°

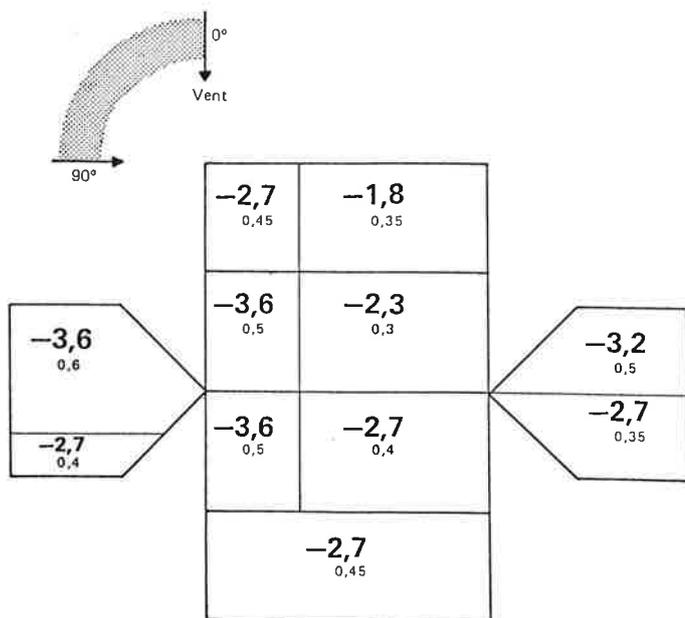


90°



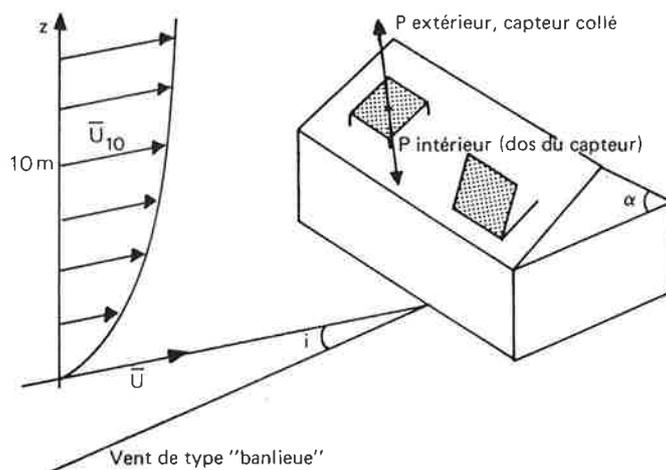
- application à la tenue au vent des capteurs solaires : synthèse pour toute incidence de vent comprise entre 0 et 90° et pour toutes les pentes de toitures.

Capteur collé à la paroi ( $\check{C}_P$  et  $\sigma_{C_P}$ )



### 5,212 élément ou capteur solaire décollé de la toiture

Cette rubrique recouvre les cas où le capteur de pente 45° présente un angle avec la pente du toit (22° 5 par exemple) ou est parallèle au toit mais distant d'une vingtaine de centimètres (vraie grandeur).



Dans ces conditions, nous avons porté pour chaque zone des figures des pages 24 et 25 la valeur extrême de la différence des coefficients de pression pour :

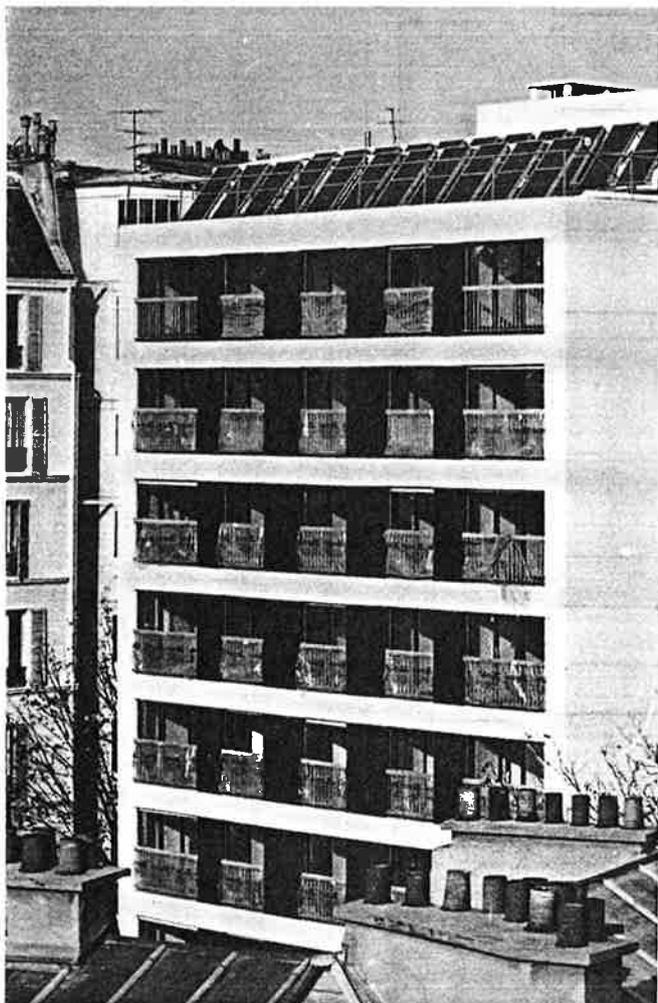
- les efforts d'arrachement (valeur négative) :

$$\Delta \check{C}_P = \text{Inf} (C_{P_{\text{ext}}} - C_P)$$

- les efforts d'écrasement (valeur positive) :

$$\Delta \hat{C}_P = \text{Sup} (C_{P_{\text{ext}}} - C_P)$$

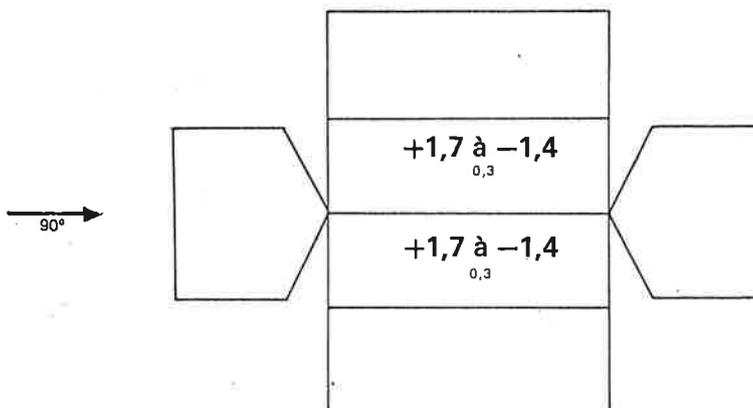
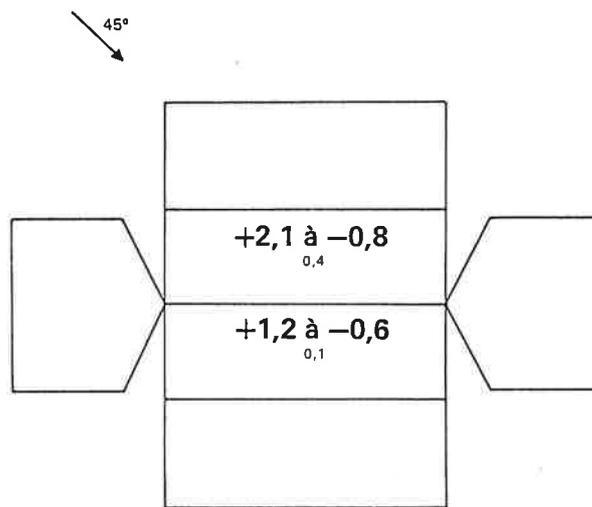
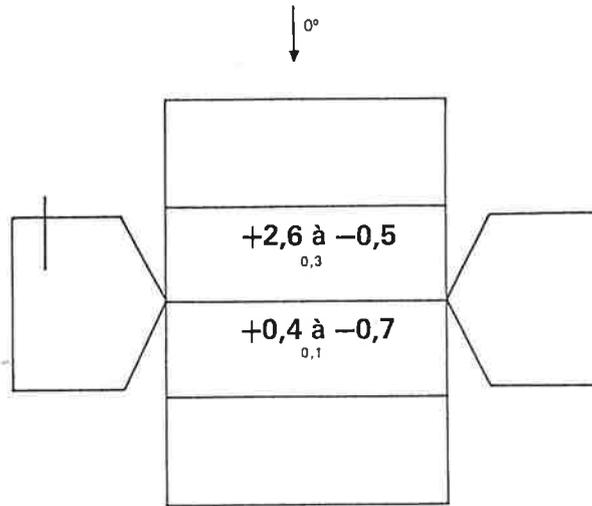
- ainsi que l'écart type de la différence des coefficients de pression  $\sigma_{\Delta C_P}$  (valeur en maigre).



Capteurs « décollés » de la toiture

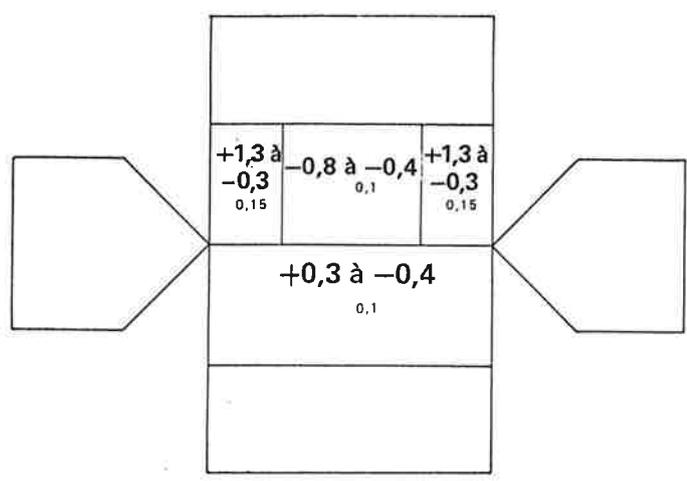


Pavillon (R+0, R+1)  
capteur décollé de la toiture  
 $\alpha = 22^\circ 5'$

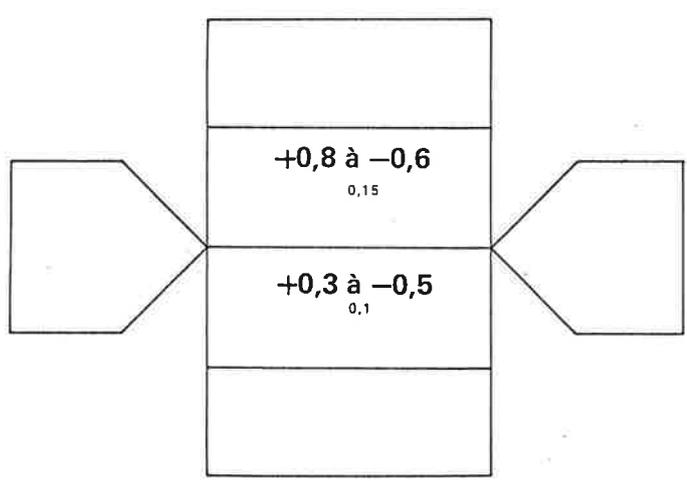


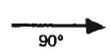
Pavillon (R+0, R+1)  
 capteur décollé de la toiture  
 $\alpha = 45^\circ$

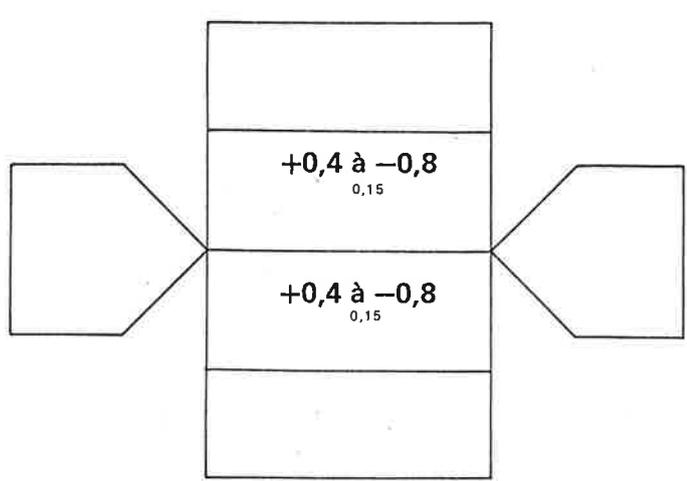
0°  

45°  

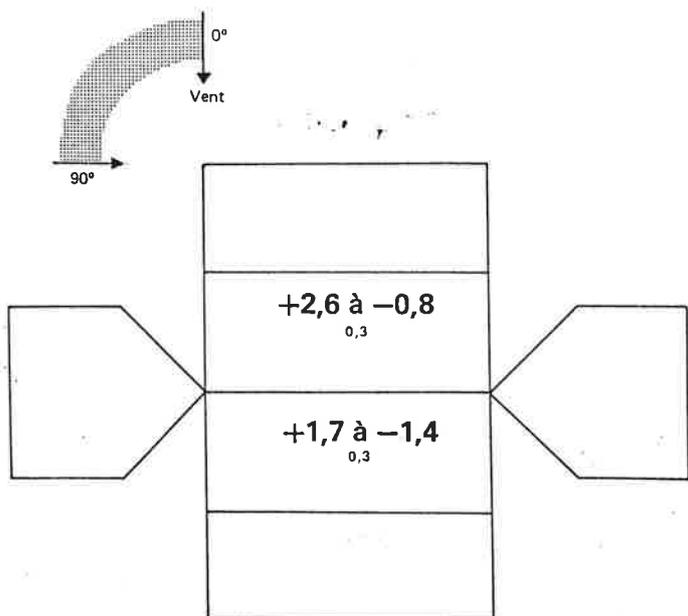



90°  




- application à la tenue au vent des capteurs solaires : synthèse pour toutes les pentes de toit et pour la gamme d'incidence de vent comprise entre 0 et 90°

*Capteur décollé de la paroi*



*5,213 cas du capteur en appui au sol (pente 45°)*

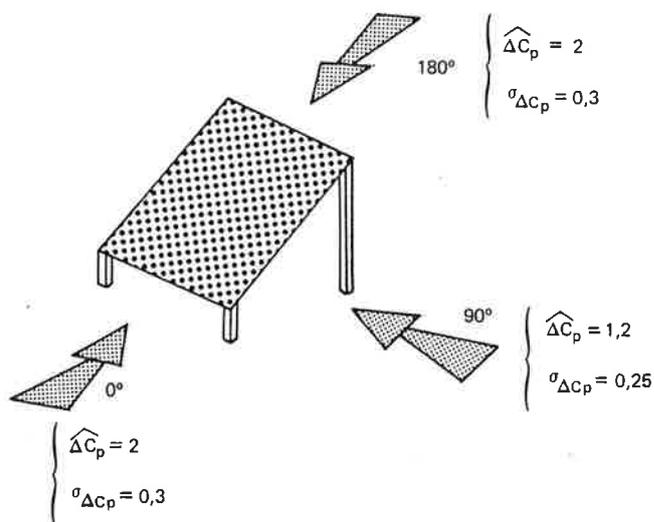
Ce cas est présenté en référence et suppose qu'il n'existe pas d'interaction avec l'environnement immédiat.

Le vent amont est toujours du type banlieue et la vitesse de référence à la hauteur de 10 m.

Les incidences 0° et 180° ont été regroupées et la différence de pression extrême induisant un *moment de basculement*.

*Nota* : Le point d'application de la force se situant entre les 2/3 et la moitié de la hauteur du capteur, soit environ à un mètre par rapport au sol, nous avons donc :

$$M_{\text{Newton} \times \text{mètre}} = F_{\text{Newton} \times 1}$$



A titre de comparaison, lorsque le capteur est placé dans une zone déventée, induite par l'effet de masque immédiat d'une maison, les valeurs suivantes sont obtenues :  $\widehat{\Delta C_p} \approx 0,3$  et  $\sigma_{\Delta C_p} \approx 0,1$ .



*L'implantation aérodynamique particulière du capteur*

*Nota* : L'implantation est non assimilable à une implantation au sol.

5,214 influence de l'environnement immédiat (interaction entre bâtiments)

On a pu constater qu'aucune interaction avec des bâtiments de même proportion n'induisait une véritable évolution sur les écarts types  $\sigma_{\Delta C_p}$ .

Les niveaux de différences de pressions extrêmes  $\Delta \hat{C}_p$  et  $\Delta \check{C}_p$  ont plutôt tendance à être réduits de 10 à 20 %.

La présentation « sans environnement » des résultats nous place donc du côté de la sécurité.

En ce qui concerne le cas du capteur au sol, l'effet de masque derrière un bâtiment conduit à des niveaux de pression extrême  $\Delta \hat{C}_p$  faible  $\approx 0,3$  par rapport au cas où il est isolé (1,2 à 2).

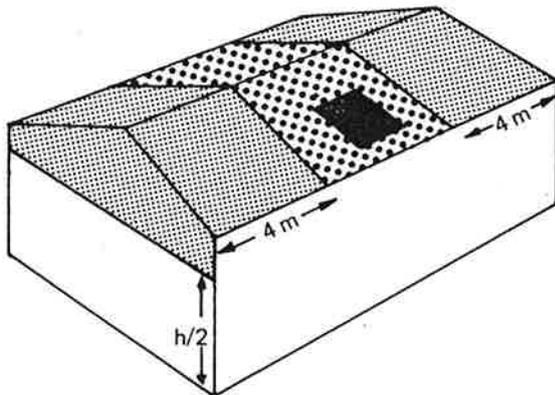
5,215 commentaires et conseils pratiques pour l'implantation des capteurs solaires sur un pavillon

Les résultats montrent une zone exposée de 4 m environ en toiture au niveau des arêtes de pignon. De même, les pignons (partie haute) sont quasiment autant sollicités.

En dehors de ces zones, le capteur collé (étanche) à la paroi sera soumis à des valeurs extrêmes d'arrachement telles que  $\Delta \check{C}_p \geq -2,7$  associées à un écart type  $\sigma_{\Delta C_p} \approx 0,4$ .

L'intérêt de décoller le capteur (0,1 à 0,2 m suffit) est très net puisque, pour tout secteur de la toiture, nous avons  $\Delta \check{C}_p \geq -1,4$  associé à  $\sigma_{\Delta C_p} \approx 0,3$ ; l'arrachement a été réduit pratiquement d'un facteur 2.

En conclusion, nous conseillons aux concepteurs, d'une part, de décoller de la paroi les capteurs et, d'autre part, de les planter systématiquement en toiture en dehors d'une bande de 4 m le long des pignons et d'éviter aussi les pignons.



Implantation des capteurs :

zone préconisée :

Note : pour un capteur décollé nous aurons toujours :

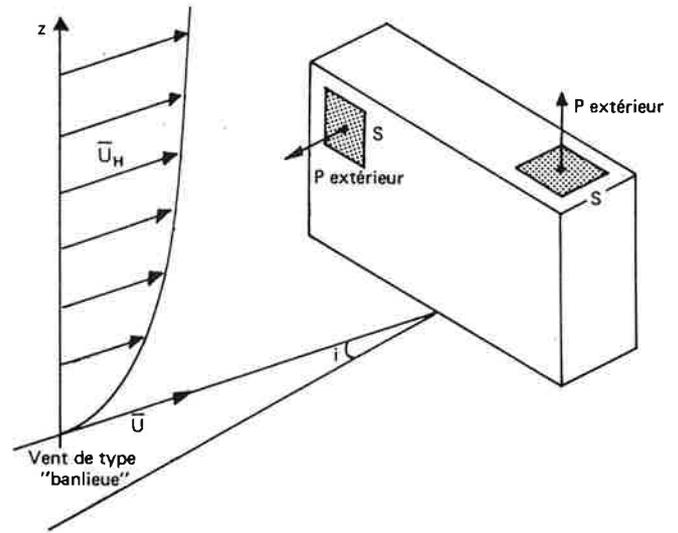
$$\Delta \check{C}_p \geq -1,4 \text{ et } \sigma_{\Delta C_p} \approx 0,3$$

zone fortement déconseillée notamment pour un capteur collé à la paroi.

5,22 le collectif (R + 4)

5,221 élément de surface S (4 m<sup>2</sup>) ou de capteur solaire collé de manière à peu près étanche à la paroi

Dans ces conditions,  $\Delta \hat{C}_p = \hat{C}_{p,ext}$  et  $\Delta \check{C}_p = \check{C}_{p,ext}$ , la pression régnant au dos du capteur étant la pression atmosphérique.

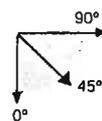


Le problème de la tenue au vent de l'élément S ou du capteur solaire est essentiellement un problème d'arrachement. Par conséquent, les valeurs extrêmes dépressionnaires sont essentiellement à considérer, soit  $\check{C}_p$ .

Nota : La synthèse présentée sous l'incidence oblique intègre les résultats obtenus pour les incidences 30°, 45° et 60°. Dans chaque figure de la page 28, le couple des valeurs  $\check{C}_p$  (valeur en gras) et  $\sigma_{C_p}$  (valeur en maigre) est indiqué. Pour les façades au vent,  $\hat{C}_p$  est aussi fourni.

- application à la tenue au vent des capteurs solaires : synthèse pour la gamme d'incidence du vent comprise entre 0° et 90°.

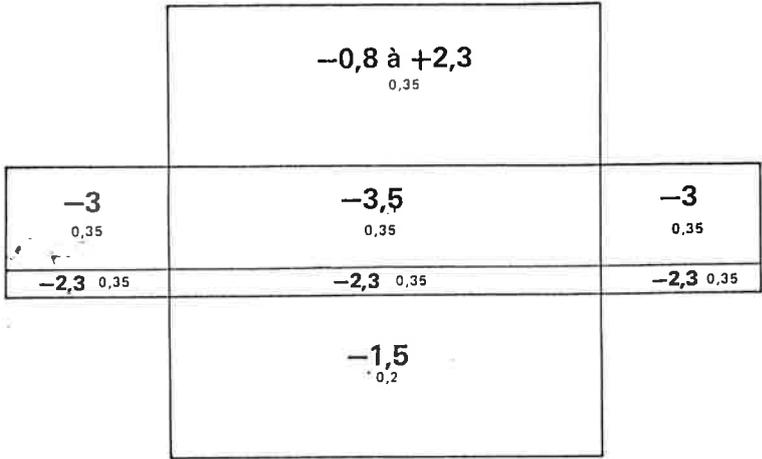
Capteur collé à la paroi



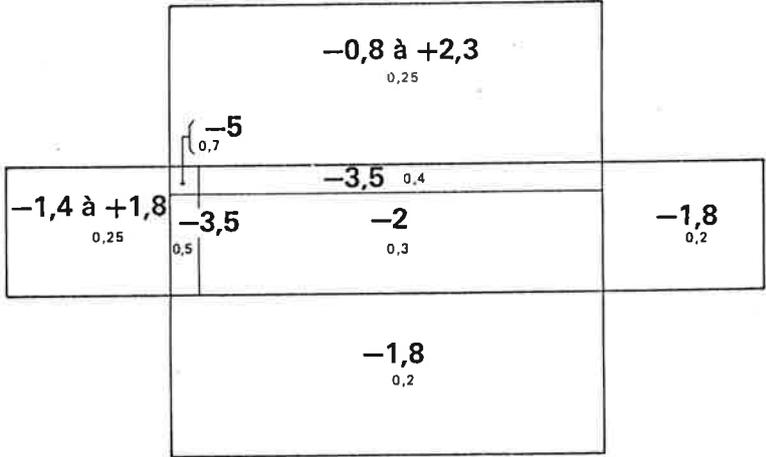
	<b>+2,3</b> à <b>-3</b> <small>0,35</small>	<b>+2,3 à -1,8</b> <small>0,25</small>	
	<b>-5</b> <small>0,7</small>		
<b>+2,3 à -3</b> <small>0,35</small>		<b>-3,5</b> <small>0,4</small>	<b>-3</b> <small>0,35</small>
<b>+2,3 à -2,3</b> <small>0,3</small>	<b>-3</b> <small>0,35</small>	<b>-2,5</b> <small>0,35</small>	<b>-2,3</b> <small>0,3</small>
	<b>-3</b> <small>0,35</small>	<b>-1,8</b> <small>0,25</small>	

Collectif (R+4)

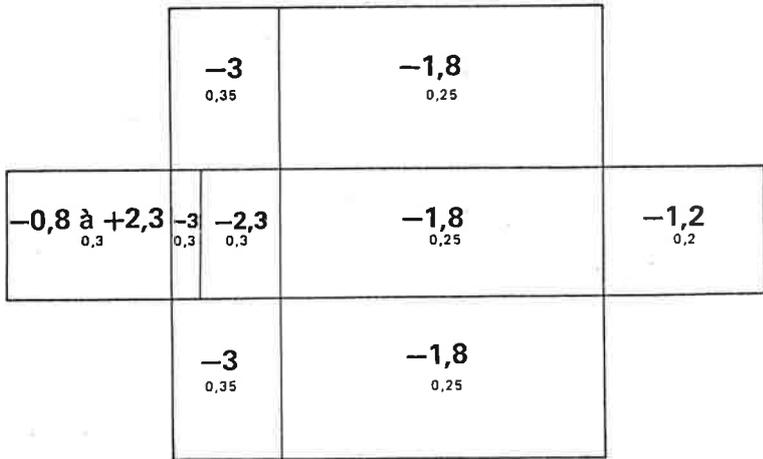
0°



45°



90°



**5,222 élément de surface ou de capteur solaire décollé de la paroi en lui restant relativement parallèle**

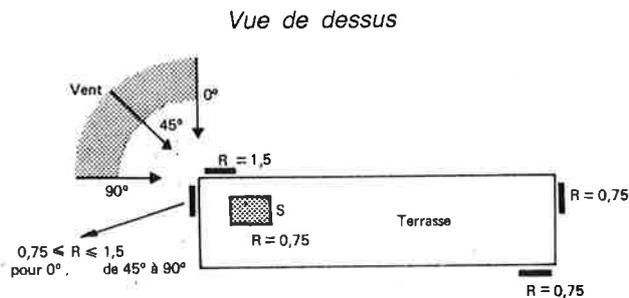
Si le capteur est légèrement décollé de la paroi, le champ de pression régnant à son dos ne sera plus proche de la pression atmosphérique, mais sera très influencé par le champ de pression extérieur. Au demeurant, on ne peut pas partir de l'hypothèse qu'il y aura *instantanément* un *équilibre* entre les pressions régnant de part et d'autre du capteur.

Bien que des mesures précises n'aient pas été réalisées, on peut tenter d'estimer l'évolution des charges d'arrachement par rapport à la situation du capteur « collé » :

a) le capteur ne déborde pas des arêtes

On peut faire l'hypothèse que l'élément de captage est soumis instantanément à la *pointe de dépression* (arrachement) et qu'à cet instant régnent, à son dos, la *pression moyenne* développée dans la zone sur la maison.

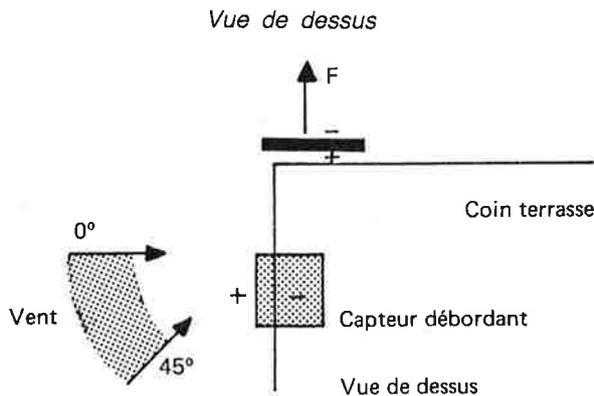
Dans ces conditions et en référence au capteur collé, les charges d'arrachement en façade et en terrasse sont toutes réduites d'au moins 25 % pour les zones sous le vent ou décollées, mais majorée d'environ 50 % pour les zones des façades au vent.



$$R = \frac{\text{Charges d'arrachement du capteur décollé}}{\text{Charges d'arrachement du capteur collé}}$$

b) le capteur déborde de l'arête au vent

Dans ces conditions, il peut être soumis en même temps, sur sa face arrière, à la pointe de surpression ( $\hat{C}_P \approx 2,3$ ) induite par le vent, et parallèlement à la pointe de dépression sur sa face ouverte ( $\hat{C}_P = -3$  en façade et  $-3,5$  à  $-5$  en terrasse).



Par suite, une majoration des charges d'arrachement, pouvant atteindre 70 %, peut être observée par rapport au capteur collé ( $R \approx 1,7$ ).

*Nota* : Il est bien évident que, lorsque le capteur déborde en arête *sous le vent*, les résultats par rapport au capteur non débordant sont à reconduire.

**5,223 capteur solaire décollé en terrasse (plan du capteur environ à 45° par rapport au plan terrasse)**

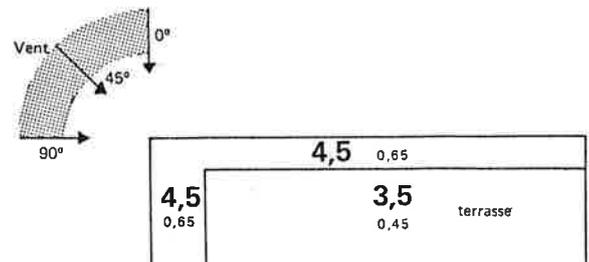
La différence de pression extrême (entre les deux faces du capteur) induit un *moment de basculement* extrême.

*Nota* : Pour notre capteur de 2 m x 2 m, le point d'application de la force se situe environ entre la moitié et les 2/3 de la hauteur du capteur, soit à 1 m environ par rapport au plan de la terrasse.

Cette différence de pression est fonction de l'implantation du capteur en terrasse mais aussi de l'incidence sous laquelle le plan du capteur se présente au vent. De même, pour un capteur, le fait de présenter au vent sa face isolante ou sa face vitrée conduit à une géométrie différente et, par là-même, à des niveaux de sollicitation induite différents.

Afin de simplifier notre présentation et compte tenu des paramètres précédents évoqués, nous avons fourni, sous forme de couple de valeur  $\hat{\Delta C}_P$  et  $\sigma_{\Delta C_P}$ , la sollicitation maximale que subira un capteur, suivant sa position en terrasse pour la gamme d'incidences du vent de 0 à 90° mais indépendamment de son orientation propre.

Vue de dessus



*Nota* : Le fait de mettre plusieurs capteurs (une dizaine identiques par exemple) côte à côte, séparés raisonnablement compte tenu des ombres géométriques, ne modifie pratiquement pas ces ordres de grandeur. On peut constater cependant une légère réduction de l'écart type dans la zone éloignée de 3 à 4 m des acrotères au vent puisqu'alors  $\sigma_{\Delta C_P} \approx 0,35$ .

**5,224 commentaires et conseils pratiques pour l'implantation des capteurs solaires sur les collectifs**

a) en terrasse

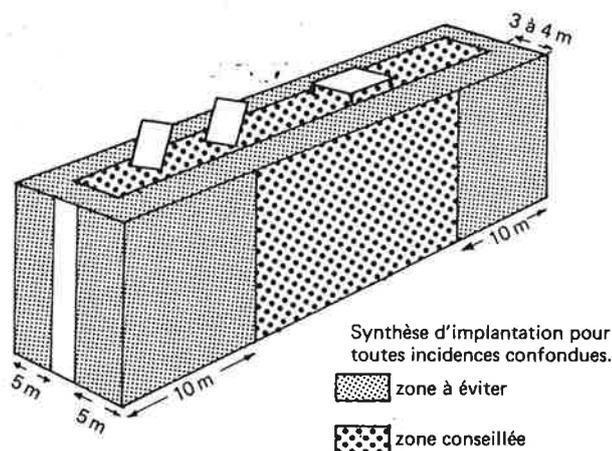
Le cas du capteur collé à la paroi est le plus pénalisant puisque, dans le coin au vent, on obtient  $\hat{C}_P = -5$  avec  $\sigma_{\Delta C_P} = 0,7$ . Le fait de décoller le capteur en le laissant parallèle au plan de la terrasse réduit de 25 % la sollicitation à la condition expresse que ce dernier ne *déborde* pas de la terrasse. Dans le cas contraire et pour certaines incidences, on peut obtenir une majoration de la force d'arrachement de 70 % par rapport au capteur collé. Enfin, un capteur dont le plan fait 45° par rapport au plan horizontal reste soumis à un moment de basculement important, et tout particulièrement dans la tranche de 3 à 5 m au voisinage de l'acrotère au vent ( $\Delta C_{P \max} \approx 4,5$ ).

b) en façade

Le capteur collé, bien que sollicité, reste le plus sûr, quelle que soit l'incidence du vent et surtout si le capteur décollé risque de « déborder » au niveau d'une arête (charge majorée de 70 %).

En conclusion, pour l'implantation de capteurs solaires sur un collectif, nous conseillons de ne jamais faire déborder le capteur de la terrasse ou de l'angle d'un coin ; en terrasse, de décoller de la paroi les capteurs horizontaux, mais les conserver collés aux façades, s'il s'agit de capteurs verticaux.

Enfin, nous proposons d'éloigner les zones d'implantation de 10 m des coins en façade, de 5 m des coins en pignon et de 3 à 4 m des acrotères en terrasse.



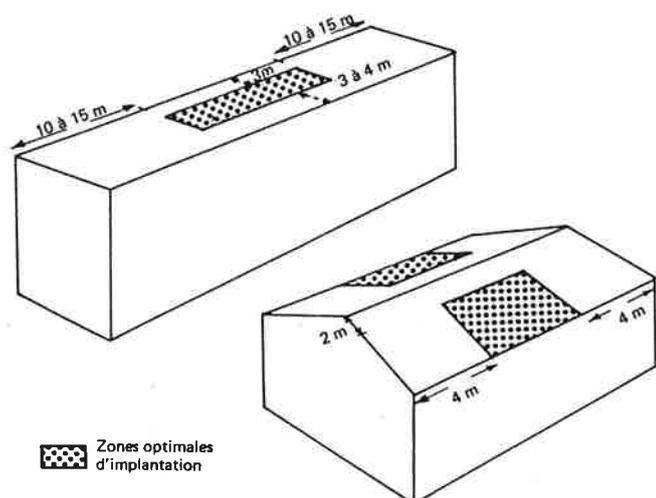
Note : Dans la zone conseillée et quel que soit le capteur

$$|\Delta C_{pl}|_{\text{extérieure}} \leq 3,5 \text{ avec } \sigma_{\Delta C_p} \simeq 0,45$$

**REMARQUE IMPORTANTE :** le traitement d'un acrotère perméable (50 %) sur une hauteur de l'ordre de 1,5 m conduit à réduire d'un *facteur supérieur à 2* les charges externes et autorise (sous réserve des problèmes d'ombres induites par l'acrotère brise-vent) une implantation sur toute la terrasse sans majoration de charge au voisinage des acrotères.

## 6 remarque sur la compatibilité des zonages de moindre sollicitation du vent et de bon fonctionnement thermique pour les capteurs solaires

En référence aux chapitres 4 et 5, nous constatons que les deux points de vue sont relativement compatibles et que les implantations ci-dessous représentent un excellent compromis (pour toutes incidences de vent).



## 7 conclusion de l'étude

Cette étude menée en soufflerie atmosphérique avec reproduction du phénomène vent naturel et restitution du champ aérodynamique réaliste a permis de caractériser les écoulements turbulents se développant au contournement des obstacles bâtis ainsi que de quantifier les charges effectives induites par le vent sur des éléments de paroi (4 m<sup>2</sup> environ) ou des capteurs solaires.

Cette étude, bien qu'axée sur la conception des capteurs solaires, fournit en fait un certain nombre de données directement applicables à d'autres secteurs tels que la tenue au vent des bardages, des éléments de toiture ; elle peut aussi contribuer à la conception des extracteurs statiques, ou au calcul des courants traversants, ou encore à l'étude de la diffusion des fumées ou à l'étanchéité à l'eau des toitures et façades.

## bibliographie

1. CSTB « Aérodynamique » (1980) REEF, Sciences du Bâtiment.
2. CSTB « Climatologie » (1979) REEF, Sciences du Bâtiment.
3. GANDEMER J., « Aérodynamique des couvertures du point de vue de l'étanchéité : pression, écoulement d'air », EN-ADYM 84-3 L.
4. KAIROUANI L., « Champ de vitesse, champ de pression autour d'un bâtiment : application aux effets du vent sur les capteurs solaires », EN-ADYM 82-21 L.
5. GANDEMER J., « La soufflerie à couche limite turbulente au CSTB, Cahiers du CSTB n° 1193, juillet-août 1973.
6. AYME N., « Contribution à l'étude des déperditions calorifiques par convection forcée : application aux capteurs solaires », EN-ADYM 82-12 L.
7. MOUSSET S., « Évaluation des pertes de chaleur par convection forcée sur un capteur solaire », EN-ADYM 83-17 L.
8. MOUSSET S., « Fiabilité des mesures par moyennage pneumatique », EN-ADYM 83-14 L.

correspondance entre les écarts types  
(version adimensionnelle)  
des écoulements en vent de banlieue  
et en vent de campagne

