



5702

EN-ECA 89-16 C

Centre de Recherche
de Nantes

**ETUDE EN SOUFFLERIE ATMOSPHERIQUE
DE LA VENTILATION NATURELLE
EN CLIMAT TROPICAL :
CONTRIBUTION A LA MODELISATION
DES ECOULEMENTS D'IRRIGATION**

Camille SOLLIEC

88-42-0011

 AGENCE FRANÇAISE POUR LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE	RAPPORT DE FIN DE CONTRAT
	N° <u>88.42.00.11</u>
	Date de publication <u>juillet 1988</u>

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

11 rue Henri-Picherit - 44300 NANTES - Tél. 40.37.20.00 - Télécopie 40.37.20.40

Rapp 1182

EN-ECA 89-16 C

**ETUDE EN SOUFFLERIE ATMOSPHERIQUE
DE LA VENTILATION NATURELLE
EN CLIMAT TROPICAL :
CONTRIBUTION A LA MODELISATION
DES ECOULEMENTS D'IRRIGATION**

Camille SOLLIEC

*Cette étude a été réalisée à la
demande de l'AFME
suivant convention N° 842 0011
en date du 28 juillet 1988*

SOMMAIRE

1 - INTRODUCTION	1
2 - NOTIONS DE BASE EN MATIERE DE VENTILATION NATURELLE	2
2.1 - Principe de la ventilation naturelle	2
3 - METHODOLOGIES EXPERIMENTALES	5
3.1 - Simulation du vent à échelle réduite	5
3.2 - Techniques de mesures du champ de pression	11
3.3 - Mesures anémométriques - Visualisation	14
3.4 - Technique de mesure du taux de renouvellement d'air	15
4 - ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX	20
4.1 - Descriptif de la maquette étudiée	20
4.2 - Champ de pression s'exerçant sur les façades de l'habitation	21
4.3 - Débit de renouvellement d'air et champ de vitesse interne associé	34
5 - CONCLUSION	47

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE

1 - INTRODUCTION

En climat tropical, la ventilation naturelle des habitations revêt un caractère primordial du point de vue du confort, de l'hygiène etc.

Le faible coût d'un tel système de ventilation est un critère déterminant sur le choix du type de ventilation puisque l'énergie disponible est très onéreuse du fait qu'elle est généralement importée.

Partant de ces constatations, l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie a engagé un programme visant à optimiser ce procédé de ventilation.

Cette étude est menée en collaboration avec les laboratoires de recherche suivants :

- CEBTP (modélisation numérique)
- Laboratoire de dynamique des fluides de Poitiers (essais en soufflerie)
- Service AEC du CSTB de Nantes (essais en soufflerie)

Le but final de cette étude est l'élaboration d'un code de calcul permettant, à partir des caractéristiques de l'habitation et de son environnement climatique, d'accéder de manière fiable aux débits de renouvellement d'air de tel ou tel type de logement.

Ces campagnes expérimentales sont essentiellement menées en soufflerie atmosphérique sur maquette à échelle réduite.

Les mesures effectuées au CSTB portent sur la détermination du champ de pression affectant chacune des façades d'une habitation présentant ou non des ouvertures (portes et fenêtres).

Parallèlement des mesures du débit de renouvellement d'air sont effectuées pour les mêmes conditions de vent.

Quelques directions de vent sont étudiées et dans certains cas deux types de vent (vent de "rase campagne" et vent de "banlieue").

Ultérieurement, l'ensemble de ces données issu des trois laboratoires concernés devra être validé par des résultats obtenus sur des bâtiments réels.

A cet effet, le CSTB dispose d'une cellule expérimentale modulaire, grandeur nature, pouvant permettre de tester le code de calcul et fixer son domaine de validité.

2 - NOTIONS DE BASE EN MATIERE DE VENTILATION NATURELLE

2.1 - Principe de la ventilation naturelle

Deux phénomènes sont inducteurs de la ventilation naturelle dans une habitation :

- le champ de pression induit par le vent

- le tirage thermique

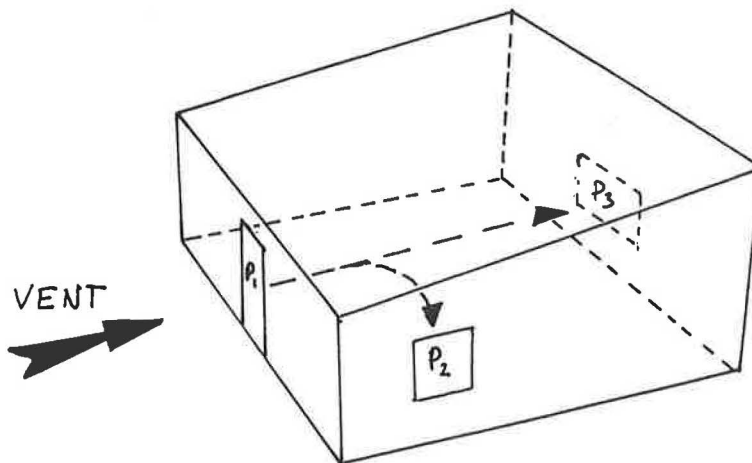
Ventilation induite par le champ de pression

Le champ de pression régnant sur les façades et le toit d'une construction dépend des caractéristiques du vent (module et direction), de la géométrie, de la forme du bâtiment, et de l'environnement.

Le mécanisme de ventilation apparaît dès lors qu'il existe une différence de pression entre deux façades de l'habitation.

Le développement de la ventilation naturelle est alors lié à la porosité du bâtiment et à la répartition des orifices.

Plus généralement, les écoulements d'air s'établissent à l'intérieur du bâtiment entre la façade au vent (pression P_1), en surpression et les faces sous le vent ou en dépression (pression P_2 et P_3).



La présence et le sens de l'écoulement à l'intérieur du volume dépendent de la valeur respective des trois pressions précitées et des pertes de charges des différents circuits pneumatiques mis en jeu.

Schématiquement, la situation peut être caractérisée par les trois écarts de pression :

$$\Delta P_{1,2} = P_1 - P_2$$

$$\Delta P_{1,3} = P_1 - P_3$$

$$\Delta P_{2,3} = P_2 - P_3$$

Le débit moyen d'air dans un volume dont deux parois sont à des pressions différentes dépend :

- de l'écart de pressions moyennes
- des pertes de charges du circuit pneumatique
- des surfaces des ouvertures

Les pertes de charges du circuit sont fixées par l'écart de pression $\Delta P_{i,j}$ créée par le vent entre les faces, la relation entre le débit et cette perte de charge n'est pas linéaire :

$$q^2 \propto \Delta P_{i,j}(t)$$

avec q : débit traversant

soit

$$q \propto [\Delta P_{i,j}]^{\frac{1}{2}}$$

En plus des aires des orifices de ventilation et de leur coefficient de perte de charge, la connaissance des pressions motrices $\Delta P(i, j)$ est donc nécessaire pour déterminer les débits de renouvellement d'air.

Ventilation par tirage thermique

Dès lors qu'il existe un écart de température entre l'intérieur de l'habitation et l'extérieur, il apparaît une ventilation naturelle induite par ce tirage thermique.

Le débit extrait dépend de la perte de charge (proportionnelle au carré de la vitesse) et de la différence de masse volumique de l'air entre l'intérieur et l'extérieur.

Cette différence est liée à l'écart de température ($\Delta\theta = \theta_{int} - \theta_{ext}$) et le débit extrait s'exprime comme une fonction croissante de $\Delta\theta$:

$$Q_{\text{extrait}} = F(\sqrt{\Delta\theta})$$

Dans le cadre de cette étude, seule la ventilation induite par le champ de pression différentiel sera étudiée.

L'approche en soufflerie à couche limite turbulente consistera, d'une part, à déterminer les pressions locales s'exerçant sur l'enveloppe du bâtiment, et d'autre part, à mesurer les débits de renouvellement d'air dans les mêmes conditions d'essais.

3 - METHODOLOGIES EXPERIMENTALES

3.1 - Simulation du vent à échelle réduite

Les caractéristiques statique (vitesse moyenne) et dynamique (turbulence) du vent naturel sont fonction de la hauteur, de la rugosité du site et de sa topographie.

L'évolution de la vitesse moyenne avec la hauteur peut être caractérisée par une loi en puissance s'écrivant sous la forme suivante [1] [2] :

$$\frac{\bar{U}_z}{\bar{U}_{ref}} = \left(\frac{Z}{Z_{ref}} \right)^a$$

\bar{U}_z	vitesse moyenne à l'altitude z
\bar{U}_{ref}	vitesse moyenne de référence
Z	altitude par rapport au sol
Z_{ref}	altitude de référence (généralement 10 mètres)

L'intensité de turbulence I_z (caractérisant les fluctuations de vitesse autour de sa valeur moyenne) est définie de la manière suivante :

$$I_z = \frac{\sigma_u}{\bar{U}_z} = \frac{\sqrt{(U_z - \bar{U}_z)^2}}{\bar{U}_z}$$

σ_u	écart type de la vitesse U
U_z	vitesse instantanée à l'altitude z
\bar{U}_z	vitesse moyenne à l'altitude z

Cette caractéristique dynamique peut également être reliée à la vitesse moyenne à la station météorologique par la relation

$$I_z = \frac{K \bar{U}_{10météo}}{\bar{U}_z}$$

K paramètre fonction de la rugosité en amont du site
 $\bar{U}_{10\text{météo}}$ vitesse moyenne à la station météorologique à 10 mètres de haut

Les valeurs des paramètres α et K pour différents types de terrain sont réunis dans le tableau suivant :

CLASSE DE RUGOSITE					
	Mer plan d'eau	Rase campagne (réf. météo)	Zone rurale bocage	Zone urbanisée industrielle ou forestière	Centre de grande ville
α	0.10	0.12 - 0.16	0.18 - 0.20	0.22 - 0.26	0.28 - 0.30
K	0.166	0.202	0.212	0.234	0.234

La "turbulence" peut également être décrite par les échelles de turbulence qui donnent une image spatiale de la taille des tourbillons du vent.

Ces échelles de turbulence sont dépendantes l'une de l'autre.

$$Lu_y(z) = 0,3 Lu_x(z)$$

$$Lu_z(z) = 0,5 Lu_x(z)$$

$Lu_x(z)$: échelle suivant l'axe longitudinal à la hauteur z

$Lu_y(z)$: échelle suivant l'axe transversal à la hauteur z

$Lu_z(z)$: échelle verticale à la hauteur z

La connaissance de l'une d'entre elles, par exemple Lu_x , permet d'accéder aux deux autres.

Cette échelle Lu_x s'exprime de la manière suivante à partir de la fonction d'autocorrélation

$$Lu_x(z) = \bar{U}(z) \cdot \int_0^\infty \frac{\overline{U(t, z) \cdot U(t + \Delta t, z)}}{\sigma_u^2} d\Delta t$$

Jusqu'à 200 ou 300 m, Lu_x est une fonction croissante de la hauteur et décroissante de la rugosité, qui peut s'écrire pour $10m < z \leq 250m$ et $0,1m \leq Z_o \leq 10m$ [3].

$$Lu_x(z, z_o) = 20 \left(\frac{1}{z_o} \right)^{0.32} Z^{0.5(z_o)^{0.08}}$$

Z : hauteur

Z_o : rugosité du sol

En plus de ces caractéristiques il est nécessaire de reproduire correctement la distribution fréquentielle de l'énergie fluctuante (densité spectrale d'énergie).

La condition de similitude est alors la reproduction de la densité spectrale réduite qui peut s'exprimer sous la forme semi-empirique suivante d'après Von Karman :

$$\frac{n^{s_u(n)}}{\sigma_u^2} = \frac{4n_u}{(1 + 70.8n_u^2)^{\frac{5}{4}}} \quad \text{avec} \quad n_u = \frac{nLu_x(z)}{\bar{U}(z)}$$

n : fréquence

$S_u(n)$: densité spectrale de puissance de la vitesse U

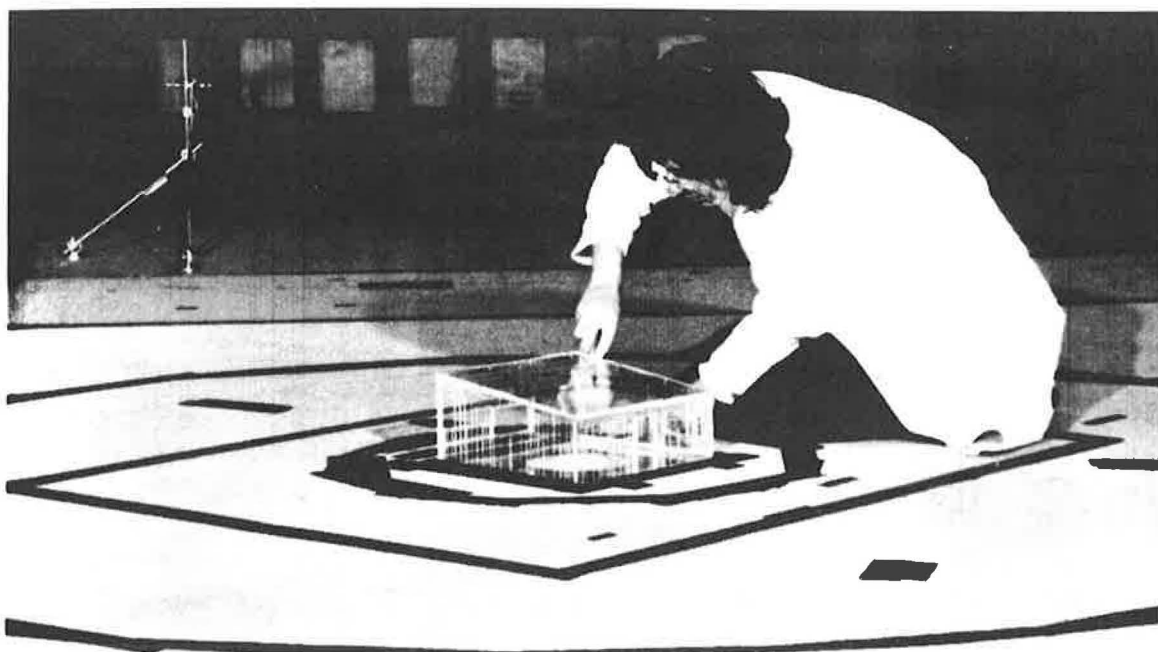
$Lu_x(z)$: échelle longitudinale de turbulence à la hauteur z

$\bar{U}(z)$: vitesse moyenne à la hauteur z

L'objectif de la simulation du vent en soufflerie est donc de restituer simultanément toutes les caractéristiques citées précédemment pour une classe de vent donnée.

La simulation du vent à l'échelle requise* (1/30 ème dans notre cas) est obtenue en plaçant des rugosités adaptées en amont de la section de mesure (figure 1).

* cette échelle de réduction, relativement faible a été choisie afin de concilier les mesures de pressions et de débit de renouvellement d'air par traceur (§ 4)



*Figure 1 - Vue d'ensemble de la veine d'essais
montrant la maquette et les rugosités amont*

Le gradient de vitesse moyenne et la distribution de l'intensité de turbulence en fonction de la hauteur sont portés sur les figures 2 et 3.

L'exposant de la loi en puissance vaut $\alpha = 0.15$ ce qui correspond donc au vent de type rase campagne recherché.

Le niveau de turbulence est également en accord avec ce type de vent.

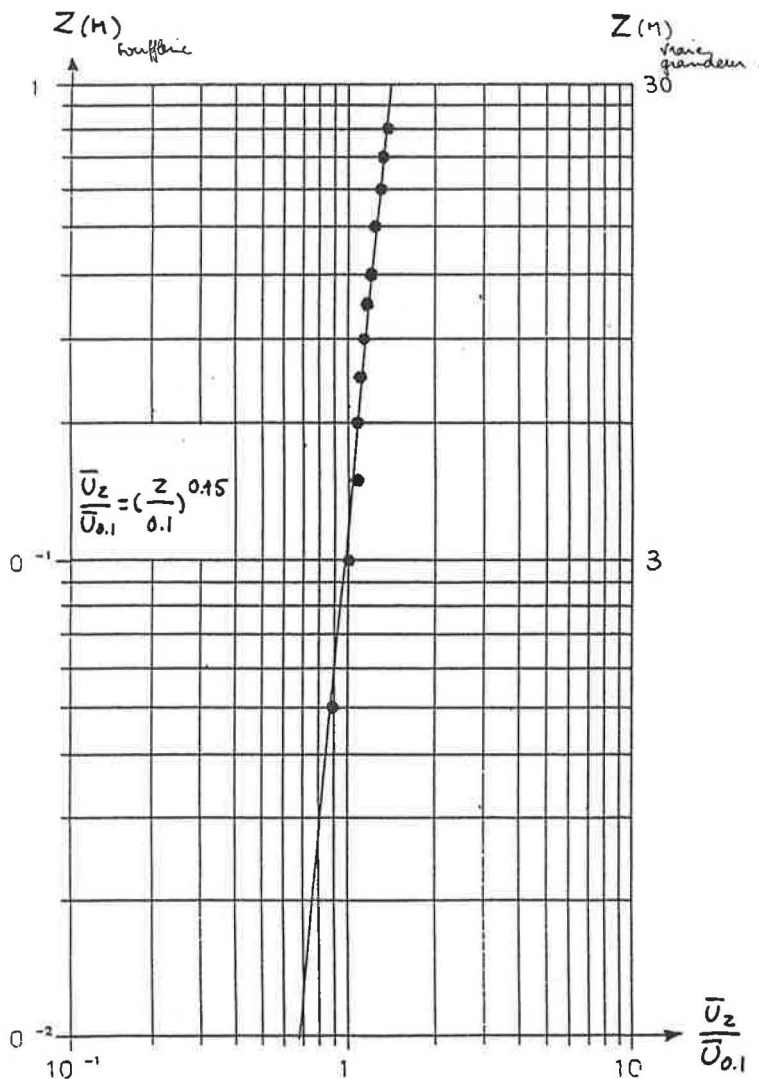


Figure 2 - Gradient vertical de vitesse moyenne
Loi puissance

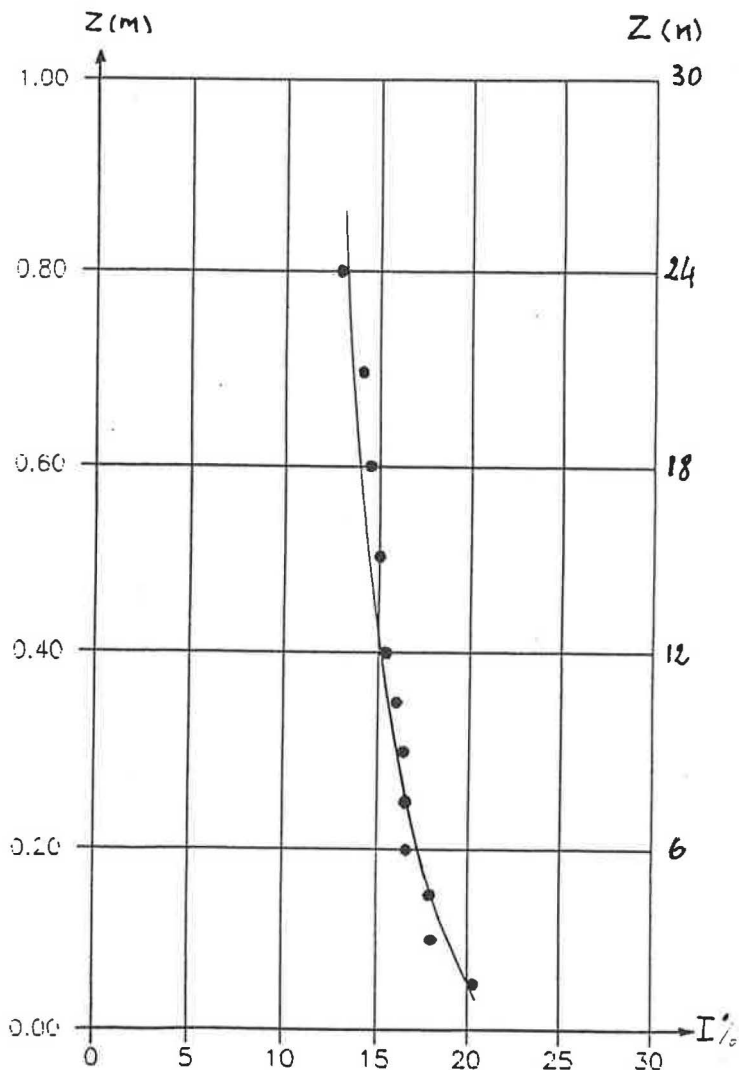


Figure 3 - Profil vertical d'intensité de turbulence

La densité spectrale de l'énergie du vent, portée sur la figure 4 sous sa forme normalisée $nS(n)/\sigma^2$ montre un bon accord aux basses fréquences avec celle rencontrée en vraie grandeur pour ce type de vent.

Aux plus fortes fréquences, l'énergie du vent simulé est supérieure à celle rencontrée en vraie grandeur pour un tel vent.

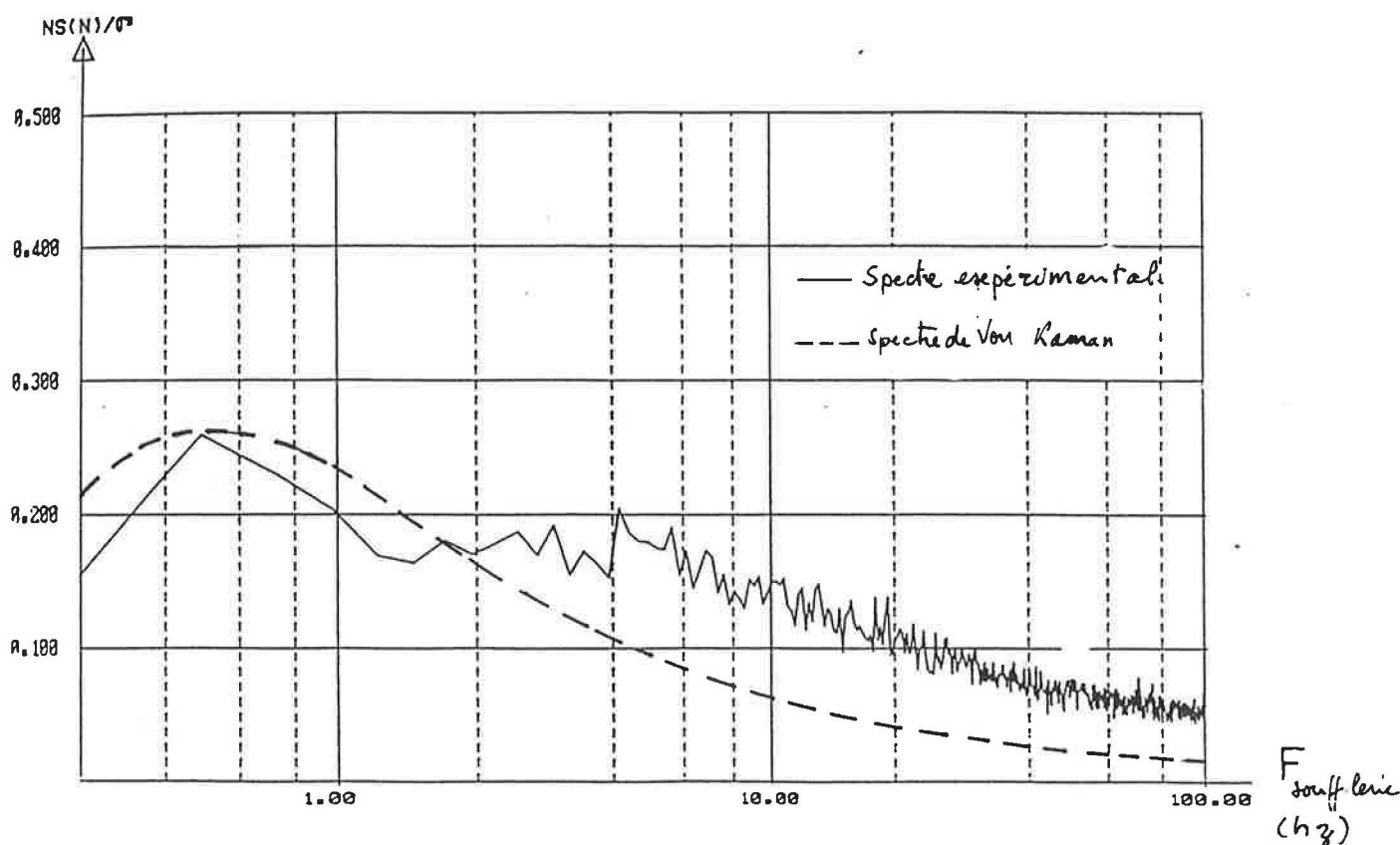


Figure 4 - Densité spectrale d'énergie du vent à $Z = 1,5m$
pour un vent moyen à 10 mètres de haut de 5 m/s
Données expérimentales et formulations de Von Karman

L'échelle longitudinale de turbulence LU_x obtenue par intégration du coefficient d'autocorrélation vaut 68 mètres à $Z = 30$ mètres tandis que l'échelle transversale LU_y vaut 24 mètres.

Les valeurs vraie grandeur couramment rencontrées pour ce vent sont les suivantes [3]

$$LU_x(30m) \sim 100m$$

$$LU_y(30m) \sim 35m$$

La simulation du vent en soufflerie présente donc une légère distorsion à cette échelle.

Cette distorsion est inhérente à la faible échelle de réduction utilisée, et il n'est pas possible de la réduire notablement.

3.2 - Techniques de mesures du champ de pression

Les mesures de pression sont généralement exprimées sous forme d'un coefficient de pression.

Ce coefficient représente le rapport entre la pression locale au point considéré et une pression de référence, la définition utilisée est la suivante :

$$C_{p(i)} = \frac{P(i)}{\frac{1}{2}\rho \overline{U_{ref}^2}}$$

$C_{p(i)}$: coefficient de pression au point i (sans dimension)

$P(i)$: pression locale au point i (Pa)

$\frac{1}{2}\rho \overline{U_{ref}^2}$: pression dynamique en zone dégagée à une hauteur de référence (Pa)

Généralement, pour des problèmes d'extrapolation à la vraie grandeur, la pression dynamique de référence est mesurée à la hauteur du toit du bâtiment en site dégagé soit :

$$C_{p(i)} = \frac{P(i)}{\frac{1}{2}\rho \overline{U_{ref}^2}}$$

$\overline{U_{ref}}$: vitesse moyenne du vent à la hauteur du toit de la construction

Pratiquement, la sonde de référence est placée en amont de la maquette à la hauteur du toit de la construction (point le plus haut).

La mesure est faite au moyen d'un tube de Pitôt relié pneumatiquement à un capteur de pression SETRA 237.

Le signal analogique, image de la pression dynamique moyenne est proportionnel à celle-ci (gain de 10 millivolts par Pascal).

Les pressions au droit de chacune des façades de l'habitation sont mesurées au moyen de prises de pression précalibrées.

La pression moyenne régnant au droit de ces prises de pression est conduite sur la face externe d'un capteur différentiel SETRA 237 (gamme ± 700 Pascals) par l'intermédiaire d'un tuyau de liaison souple.

La face interne du capteur est mise en communication avec la prise de pression statique de la référence de pression amont (pression atmosphérique).

Les résultats sont présentés sous forme de coefficients de pression moyenne définis précédemment (le signe positif est pris dans le sens de l'écoulement).

Une vue en soufflerie de la maquette équipée de ses prises de pression est présentée sur la figure suivante.

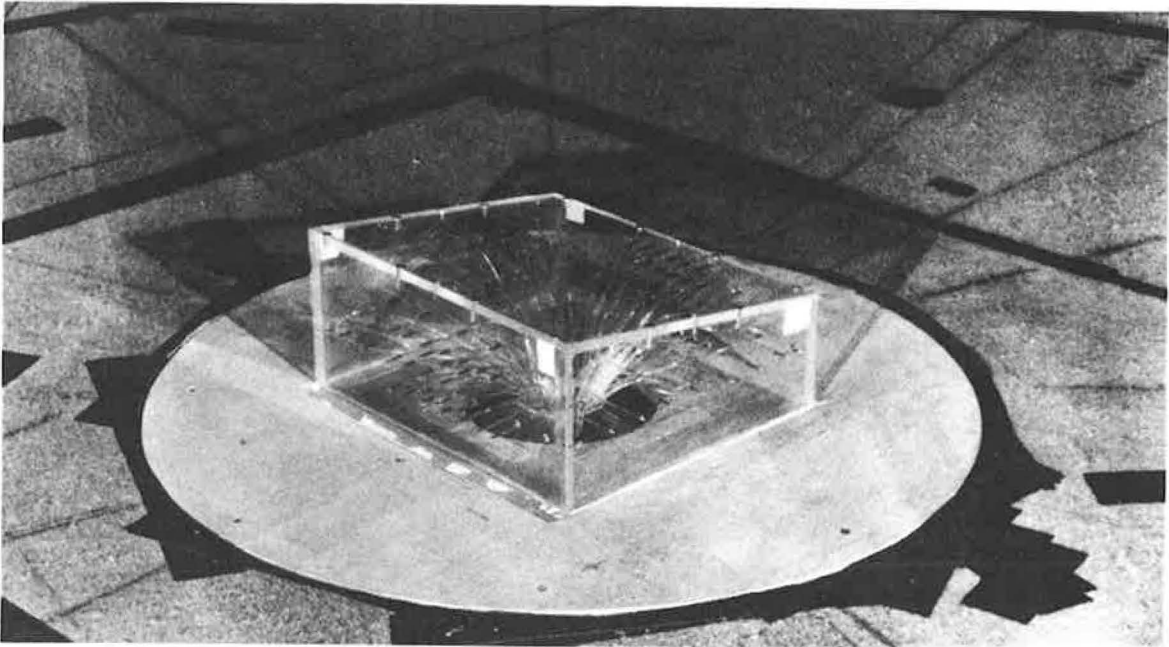


Figure 5 - Maquette équipée des prises de pression

3.3 - Mesures anémométriques - Visualisation

* *Technique de mesure anémométrique*

Les mesures de vitesse sont effectuées au moyen d'anémomètres à fil chaud ou d'un anémomètre laser à effet Doppler Fizeau équipé d'une fibre optique de 15 mètres de long.

Afin de s'affranchir du niveau de vitesse de référence, chaque mesure de vitesse locale est indexée à une vitesse de référence mesurée en amont de la maquette à l'équivalent de 10 mètres en vraie grandeur soit :

$$\psi = \frac{\bar{U}_{\text{locale}}}{\bar{U}_{\text{ref}}}$$

Dans certains cas (à l'intérieur de la cellule d'habitation), cette mesure de vitesse s'accompagne de la mesure de la direction moyenne du flux dans le plan horizontal.

* *Technique de visualisation laser*

Les techniques de visualisation utilisent un écoulement ensemençé de fines particules solides* réfléchissant fortement la lumière dans un plan orthogonal à l'éclairement.

Au voisinage de la maquette, un plan laser de faible épaisseur éclaire fortement l'écoulement suivant un plan horizontal (voir figure suivante)

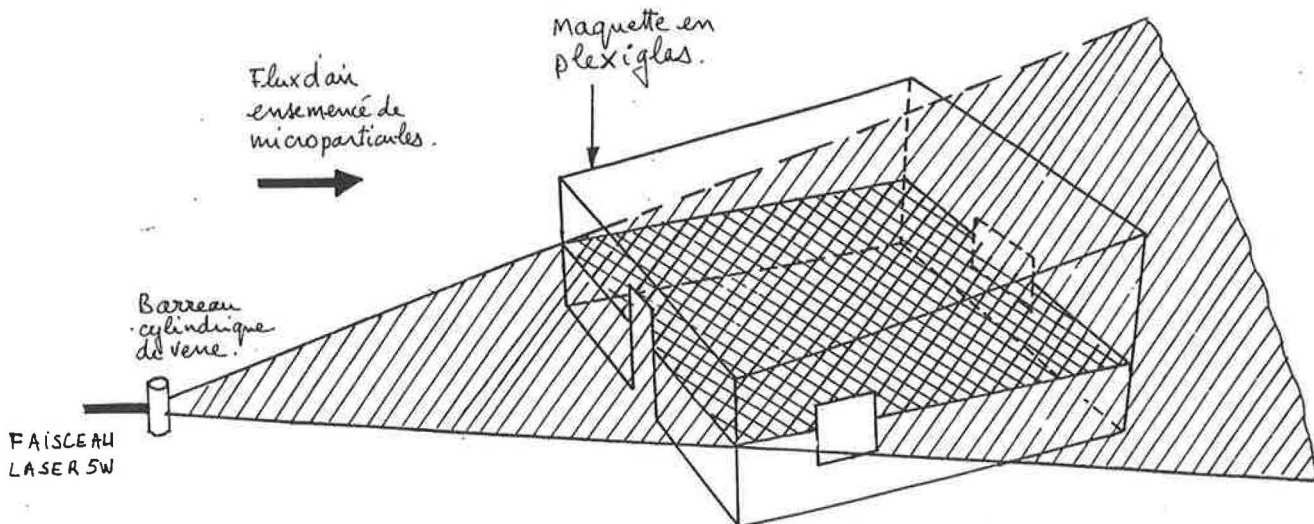


Figure 6 - Schéma de principe de la méthode de visualisation par faisceau laser plan

* poudre de carbonate de magnésium de quelques micromètres de diamètre

La source lumineuse est un laser de forte puissance (4 watts), une lentille cylindrique fait diverger le faisceau pour former un plan lumineux, les prises de vue se font de manière orthogonale au plan lumineux.

3.4 - Technique de mesure du taux de renouvellement d'air

La plupart des méthodes de mesures du taux de renouvellement d'air d'un local emploie un traceur gazeux comme support expérimental. [4]

Dans le cas présent, nous avons utilisé une technique consistant à étudier, au cours du temps, la décroissance de la concentration d'un traceur gazeux injecté dans le volume en début d'essai. [5], [6], [7]

Le taux de renouvellement d'air régit la loi d'évolution de la concentration du gaz au cours du temps.

En se plaçant dans l'hypothèse d'un flux parfaitement brassé (concentration homogène à tout instant) à l'intérieur d'un volume V_i , l'équation de continuité s'écrit : [6]

$$\frac{1}{C(t)} \frac{dC(t)}{dt} = -q/V_i$$

$C(t)$: concentration instantanée du gaz

t : temps (seconde)

q : débit d'air frais moyen (m^3/s)

V_i : volume élémentaire en m^3 ; le volume intérieur total V_o est divisé en volumes effectifs V_i ($V_o = \Sigma V_i$)

L'intégration de l'équation de continuité permet d'exprimer la concentration instantanée du gaz en fonction du temps et du taux de renouvellement d'air q/V_i soit :

$$C(t) = C_o e^{-(q/V_i).t} \quad \text{ou} \quad \frac{C(t)}{C_o} = e^{-(q/V_i).t}$$

C_o : concentration initiale homogène du gaz traceur dans le volume total V_o .

On trouvera, figure 7 un exemple de décroissance de la concentration dans le volume de mesure.

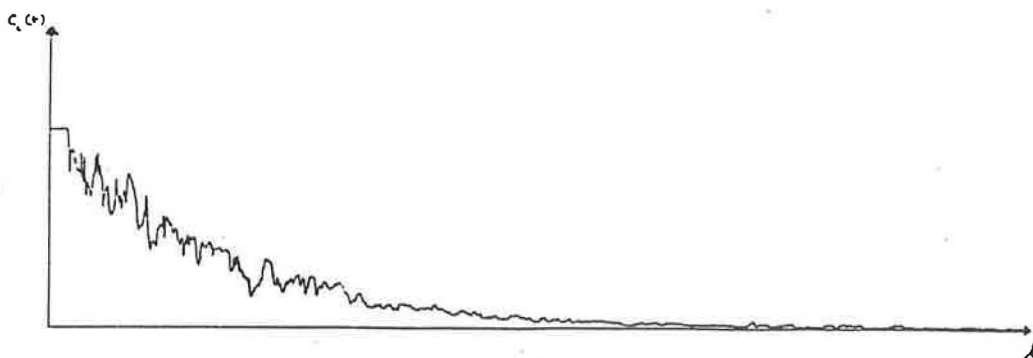


Figure 7 - Exemple de décroissance de la concentration du traceur dans le volume de mesure

Le gaz traceur doit présenter les caractéristiques suivantes :

- une densité proche de celle de l'air (absence de stratification par poussée d'Archimède)
- toxicité nulle
- non explosif
- adsorption et absorption faible ou nulle (problème de décroissance parasite de la concentration dans le cas contraire)
- absent de l'air ambiant
- chimiquement passif

Le gaz le mieux adapté pour notre application est l'éthane, sa densité à température ambiante est de 0,98, sa toxicité est nulle et il est passif à des concentrations inférieures à 1 000 parties par million (PPM).

Mode opératoire

Le volume intérieur de la maquette estensemencé d'éthane avec une concentration homogène de 1 000 PPM.

L'injection est faite en l'absence de toute communication pneumatique avec l'extérieur.

A l'instant initial de la mesure, toutes les liaisons pneumatiques sont rétablies (ouverture par guillotine) ; le champ de pression et les conditions de ventilation naturelle sont restaurés.

On considère que la phase d'ouverture des aires de ventilation, durant quelques dixièmes de seconde, ne perturbe que sensiblement la mesure s'étendant elle sur 10 à 15 secondes (figure 8).

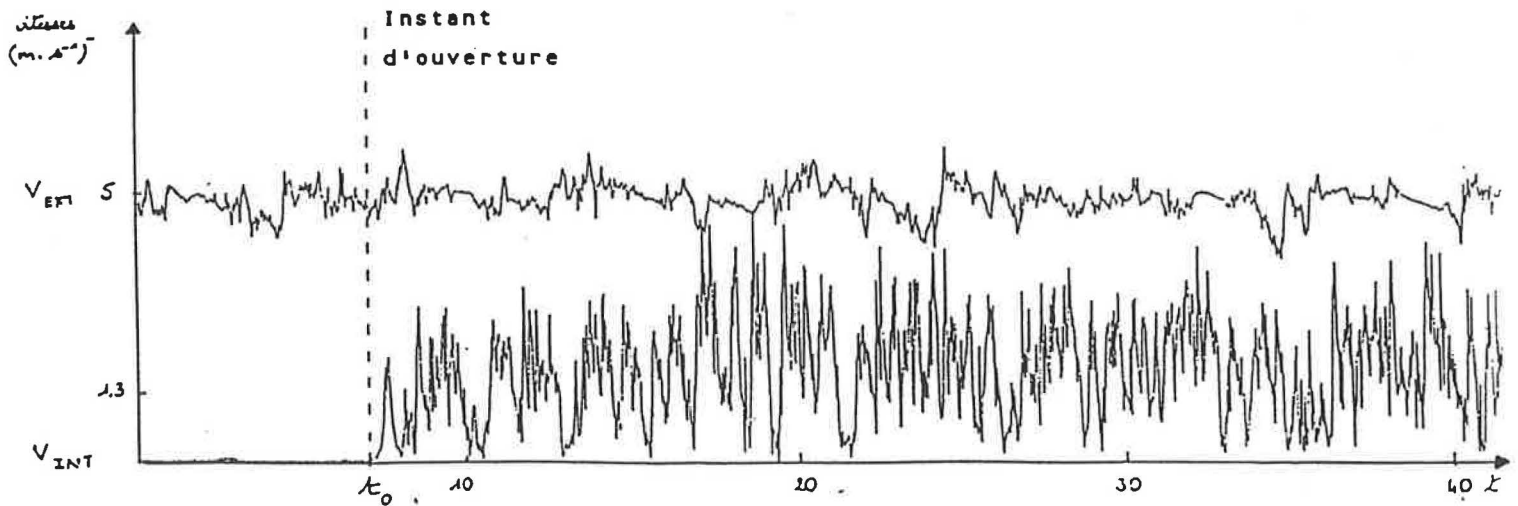


Figure 8 - Exemple de variations de vitesses d'écoulement pendant la phase d'ouverture ($\bar{U}_{méléo} = 5 \text{ m.s}^{-1}$)

La concentration instantanée du traceur est mesurée au moyen d'un détecteur rapide d'hydrocarbure à ionisation de flamme (figure 9) dont la fréquence de coupure est d'environ 40 hz à - 3 décibels [8], [9].

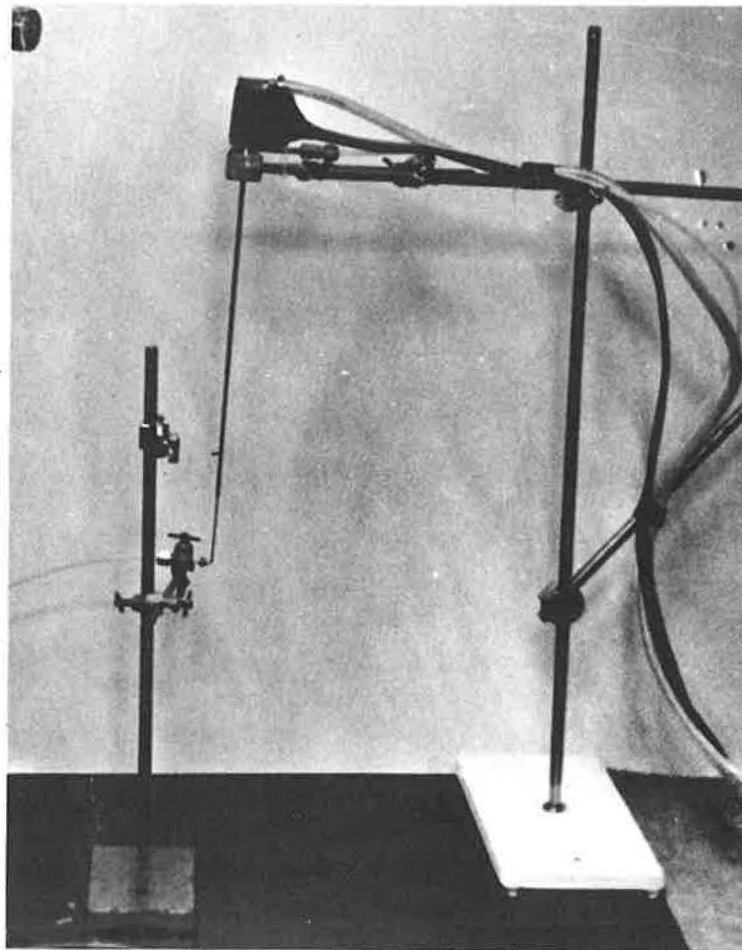
Les échantillons analysés sont prélevés en différents endroits du volume de mesure représentatif de chaque volume effectif V_i . Les signaux sont numérisés et traités en différé sur ordinateur.

Le débit local de renouvellement d'air q est obtenu en intégrant numériquement après filtrage passe bas (signal porteur moyen) la courbe de décroissance de la concentration gazeuse dans le volume de mesure [6] en effet :

$$\int_0^{\infty} e^{-\frac{q}{V}t} dt = \frac{V}{q}$$

$$\int_0^{\infty} \frac{C(t)}{C_0} dt = \frac{V}{q}$$

L'instant initial $t = 0$ est l'instant d'ouverture de la maquette, l'instant final $t = \infty$ est fixé par la résolution du convertisseur analogique numérique ($C(t)/C_0 \approx 0$)



*Figure 9 - Détecteur rapide d'hydrocarbure
à ionisation de flamme*

4 - ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

4.1 - Descriptif de la maquette étudiée

Le modèle de cellule d'habitation utilisé pour les essais en soufflerie a été choisi suivant les critères énumérés ci-dessous :

- habitation type des climats chauds et humides utilisant la ventilation naturelle
- modèle simple mais modulaire permettant de tester plusieurs cas (cloison interne amovible)

- façades à larges ouvertures afin de réduire les effets de Reynolds* au niveau des ouvrants
- taille modeste afin de réduire les effets de blocage dans la veine tout en conservant une échelle de réduction faible

Cette cellule d'étude a été définie en collaboration avec le laboratoire de mécanique des fluides de Poitiers et l'AFME [2].

L'échelle utilisée est le 1/30 ème, le plan d'ensemble de la construction est présenté sur la figure 10.

Les mesures de pression sur les façades étant faites par les deux laboratoires, nous avons également opté pour une même distribution des prises de pression sur l'ensemble des façades.

La répartition de ces prises est donnée sur les figures 11 et 12.

* *Remarque*

La simulation à échelle réduite de la ventilation naturelle des bâtiments à faible perméabilité est impossible.

Les écoulements à l'intérieur des conduits de faibles sections ou au travers des fissures sont typiquement visqueux et donc dépendent du nombre de Reynolds. Ceci restreint l'approche en soufflerie aux problèmes de ventilation des constructions à forte perméabilité.

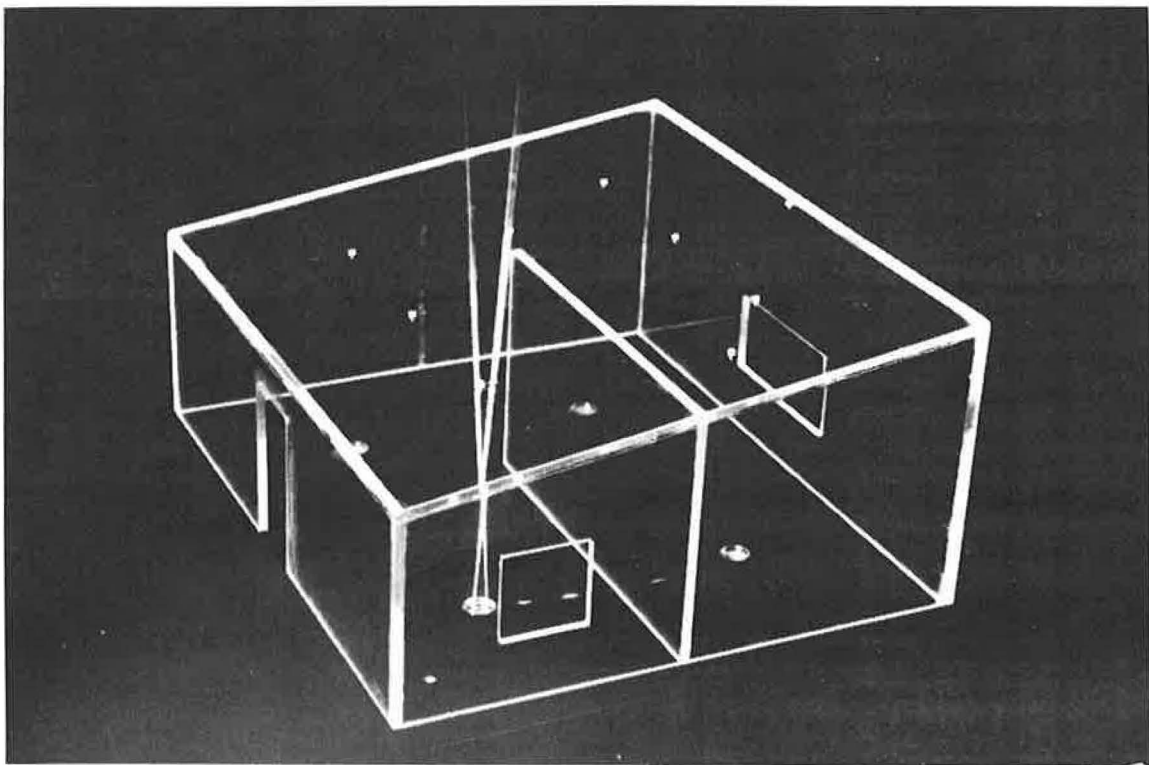
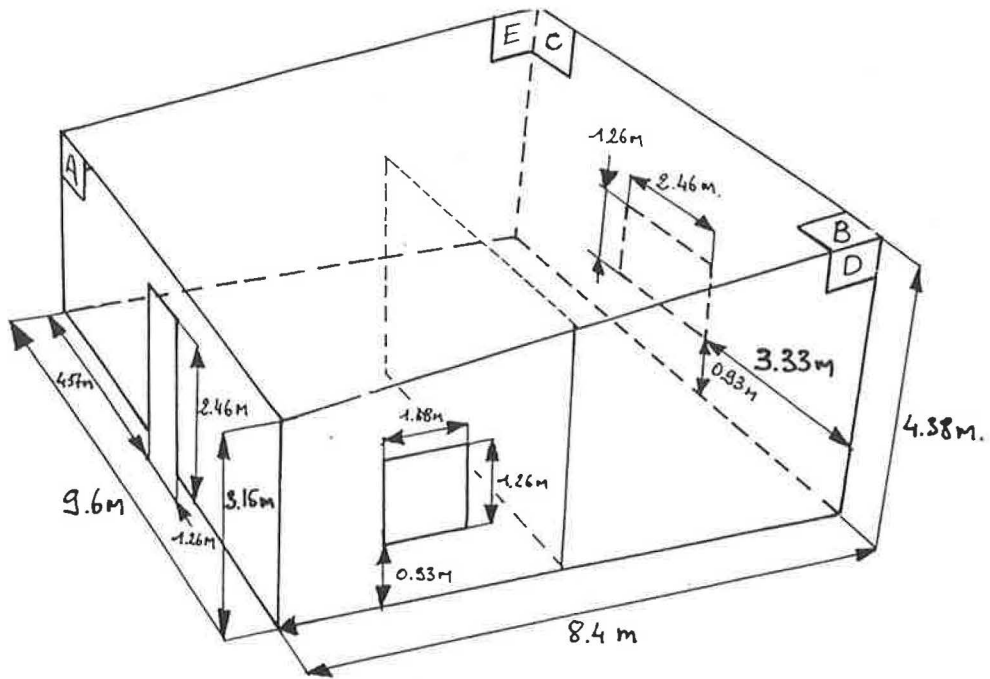
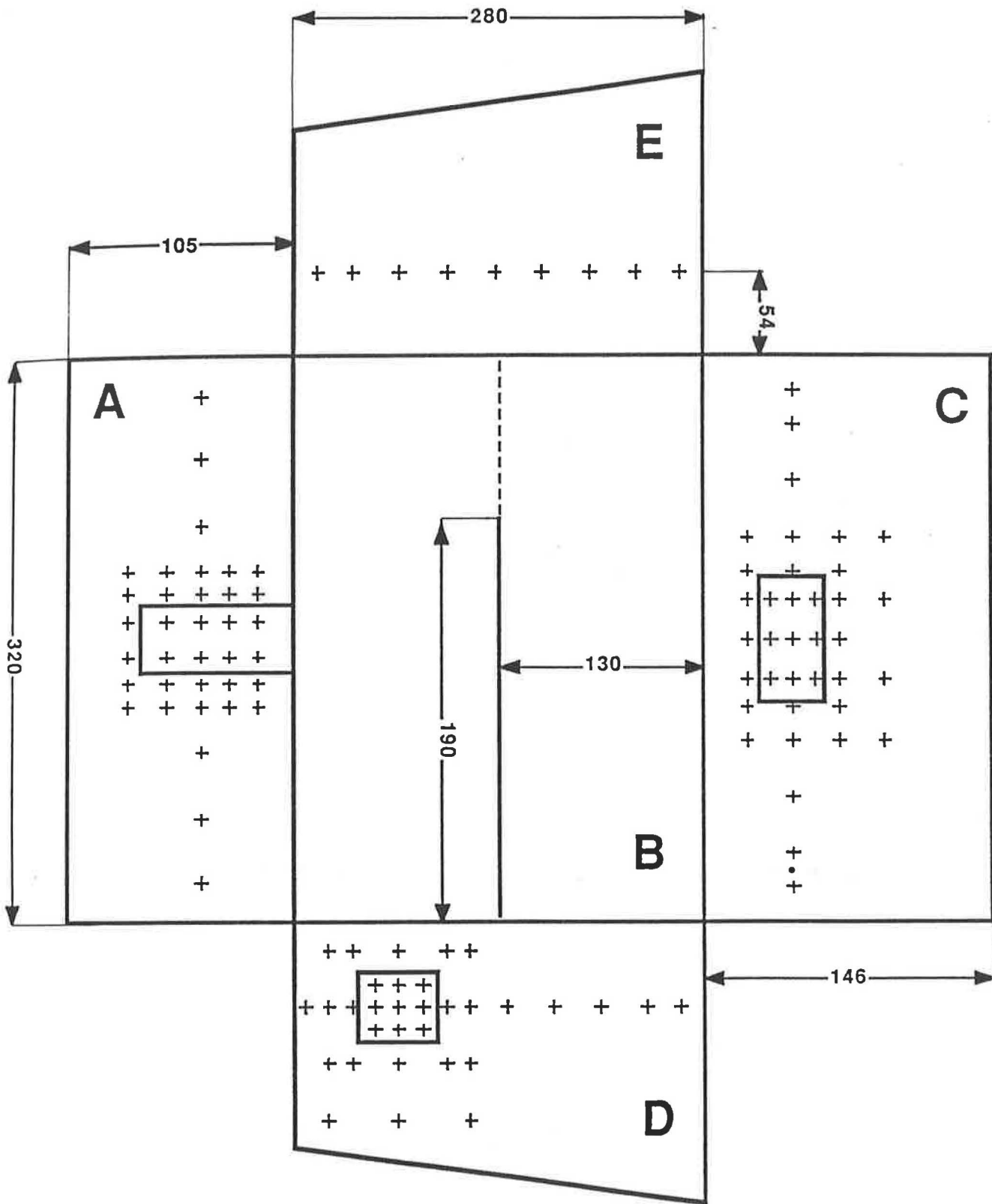
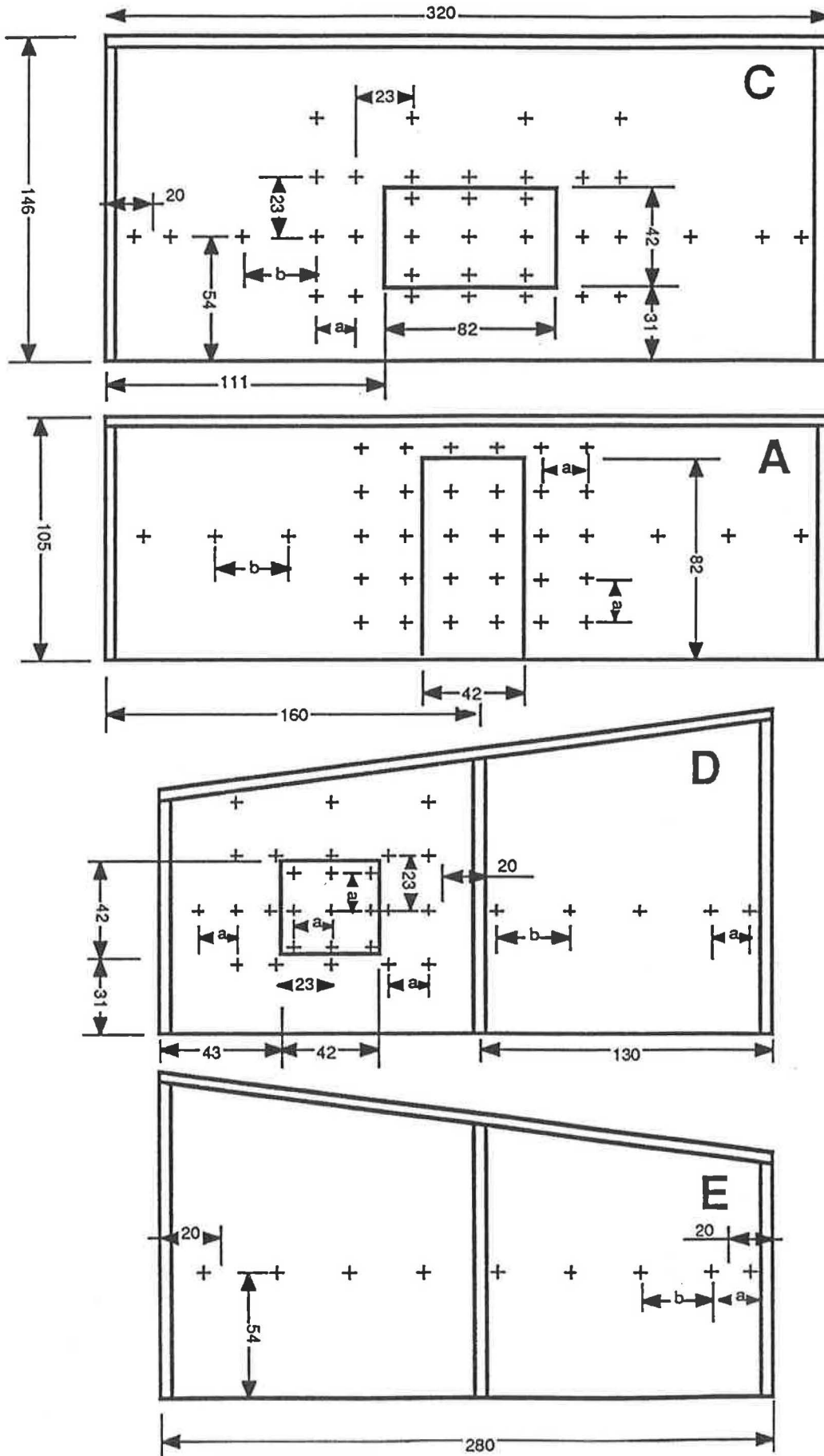


Figure 10 - Plan et maquette de la cellule d'habitation testée en soufflerie



+ Prise de pression *pariétales*.

Figure 11 - Plan de la maquette "ventilation" à l'échelle 1/30 ème



$a = 5/3$ et $b = 10/3$ ce qui correspond respectivement à 0,5 et 1 mètre en vraie grandeur.

+ prises de pression

Figure 12 - Répartition géométrique des prises de pression

4.2 - Champ de pression s'exerçant sur les façades de l'habitation

Les mesures des coefficients de pression sur la cellule d'habitation ont été effectuées pour 8 incidences (figure 13).

Les prises de pression sont réparties selon les figures du paragraphe précédent.

Ces mesures de pression ont été faites sur deux maquettes utilisant la même répartition des prises de pression excepté l'une, non équipée de prises au niveau des ouvertures (figures 14 et 15).

Les caractéristiques du vent au cours des essais sont celles présentées sur les figures 2, 3 et 4.

C'est typiquement un vent de rase campagne.

La pression dynamique de référence est mesurée à la hauteur du point le plus haut du toit soit 146 mm en soufflerie (4,4 m en vraie grandeur).

Les résultats numériques relatifs aux maquettes dépourvues de porte et de fenêtre sont rassemblés en annexe sur les figures A1 à A16.

A chaque point est associé le coefficient de pression moyenne correspondant aux 8 incidences explorées.

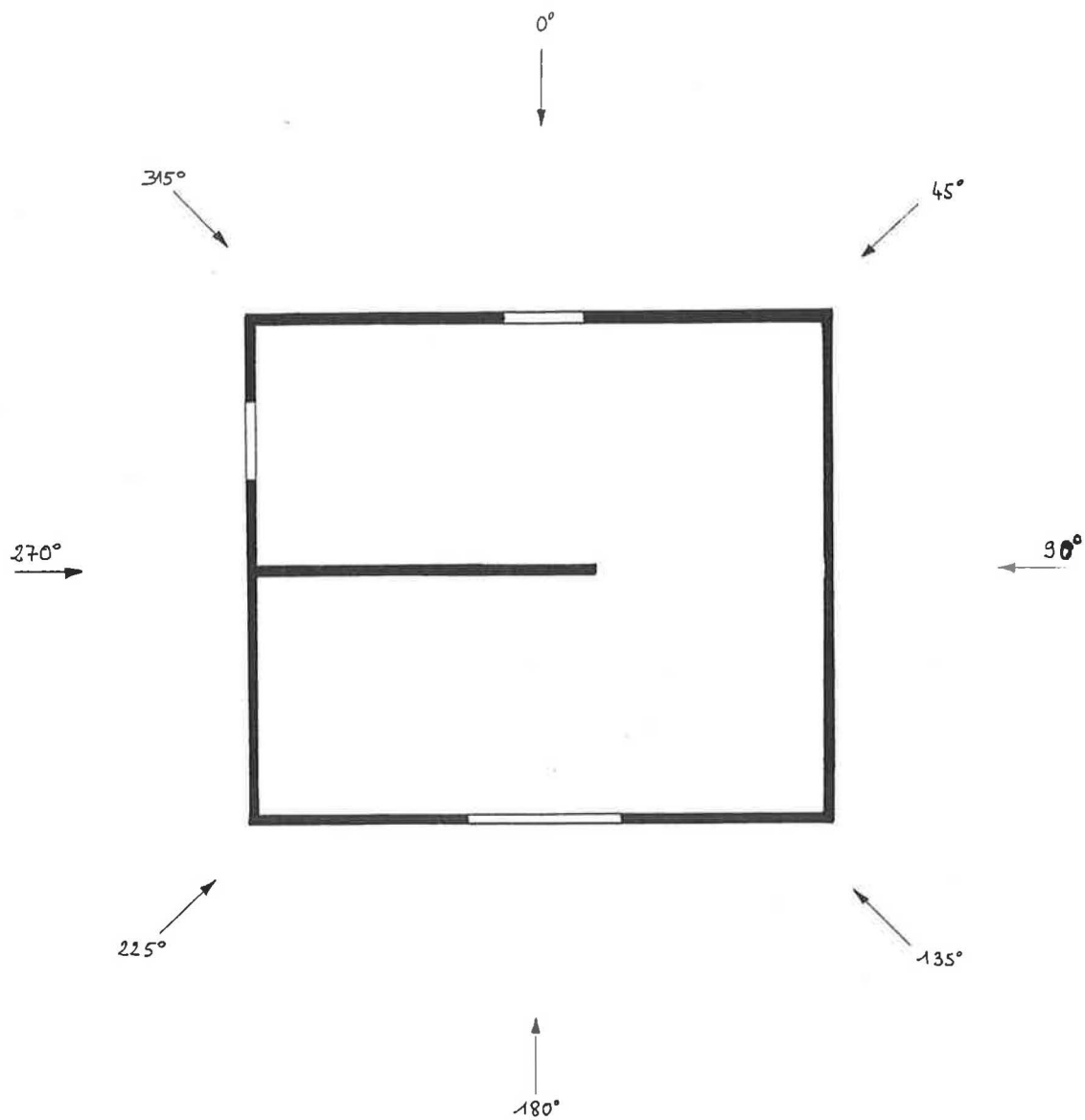


Figure 13 - Orientation des vents testés

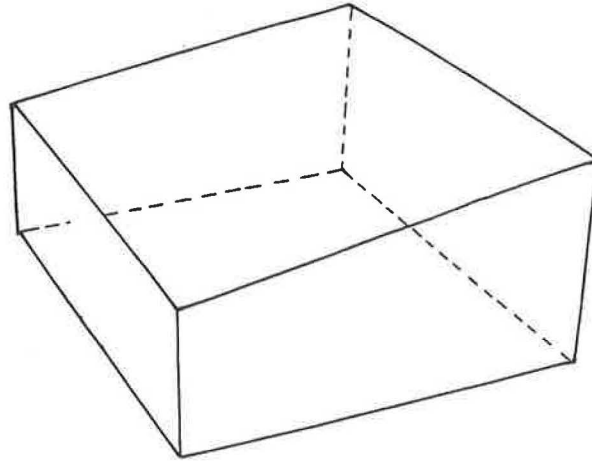


Figure 14 - Maquette utilisée pour la première série d'essais
"cellule fermée"

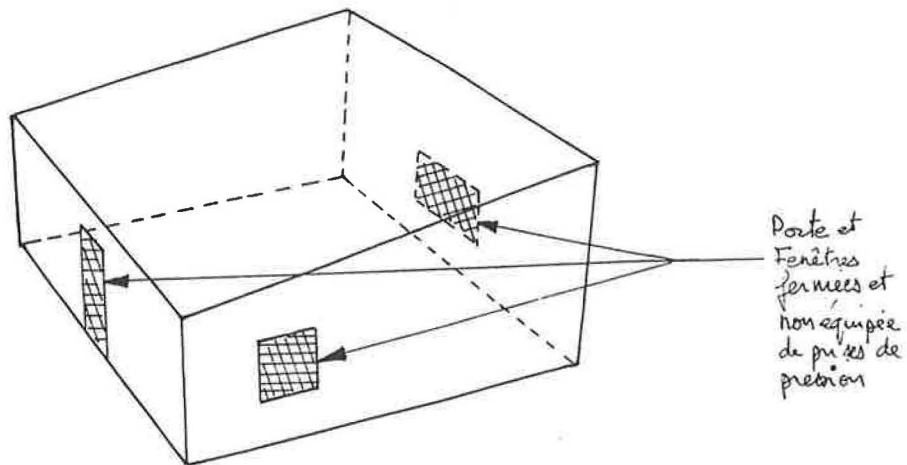
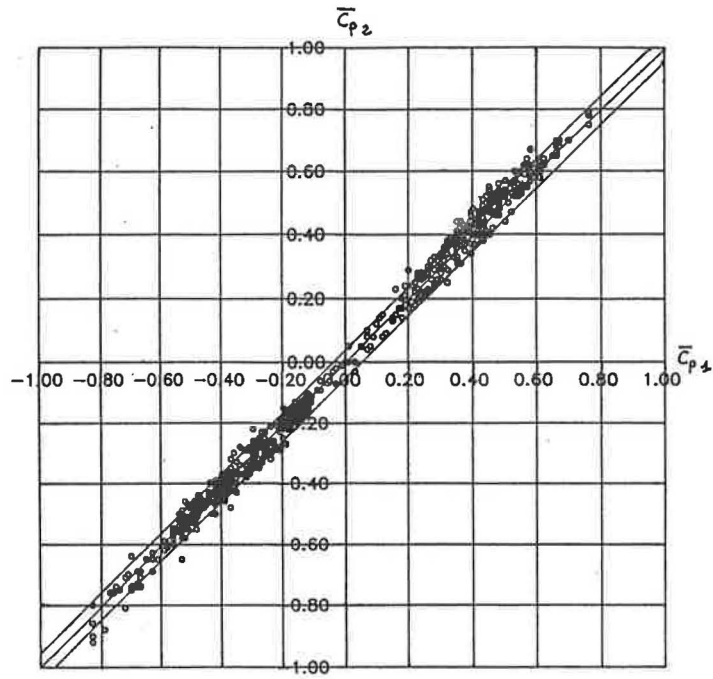


Figure 15 - Maquette utilisée pour la seconde série d'essais
"cellule fermée"

En portant les coefficients de pression, obtenus respectivement à chaque noeud de la maquette 2 en fonction de leurs homologues mesurés sur la maquette 1 (figures 14 et 15) on observe, figure 16 une dispersion d'environ $\pm 5 \%$ pour chaque prise.



*Figure 16 - Comparaison des résultats obtenus
avec les deux cellules de mesure
toutes faces confondues (A, C, D et E)
toutes incidences confondues*

Quelques points sont situés en dehors de cette enveloppe, ils correspondent généralement aux noeuds situés dans les zones de décollement du flux à proximité des arêtes des pignons.

On peut donc, à juste titre considérer que la reproductibilité des mesures est tout à fait satisfaisante.

L'ouverture de la porte et des fenêtres modifie le champ de pression de l'enveloppe de la cellule.

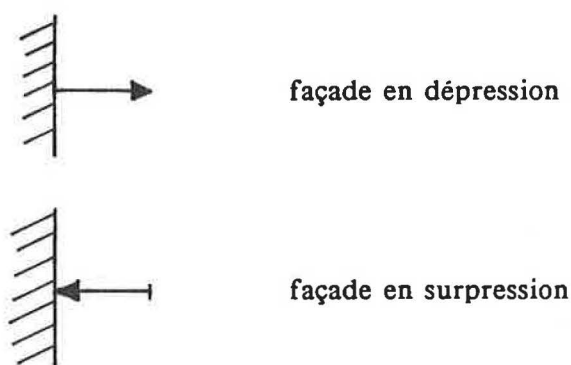
Réalisés dans les mêmes conditions de vent et d'incidences du flux, ces coefficients sont rassemblés sous forme numérique sur les figures A17 à A23.

Une comparaison aisée et rapide des champs de pression en présence et en l'absence d'ouvrant peut être faite en portant ces coefficients sous forme graphique (figures 17 à 20).

Seule la couronne complète située à 1,62 m du sol, est représentée pour les huit incidences.

On y associe simultanément les deux champs de pression (avec et sans ouvrant).

Les conventions de signe sont les suivantes*



Cette schématisation, propice aux comparaisons, fait apparaître les points suivants :

- pour les incidences normales à l'une des faces la mise en ventilation de la cellule engendre une augmentation de la surpression ou de la dépression des façades.
- lorsque le vent est oblique le champ de pression à proximité des ouvertures est relativement perturbé par le jet d'air entrant ou sortant. Le champ de pression à proximité des ouvertures présente des gradients importants dépendant de la direction du flux incident.
- hors des zones perturbées par les jets, les deux champs de pression sont sensiblement identiques.

Ces deux séries d'essais montrent bien les perturbations produites par les ouvrants sur le champ de pression de l'enveloppe du bâtiment.

* Remarque : du fait que l'ouverture de la porte ou des fenêtres ne modifie pas le signe du coefficient de pression, les flèches de signe ont été omises lorsque la cellule est ventilée.

Ces modifications du champ de pression sont principalement liées :

- à la forme du bâtiment
- à la direction du vent incident
- à la forme et à la répartition géométrique des ouvertures
- à leur perméabilité et à la répartition de cette perméabilité.

Le champ de pression externe et interne du bâtiment est indexé à tous ces paramètres.

Pour ce type d'habitation à forte perméabilité, il paraît donc nécessaire de connaître le champ de pression externe et interne réel pour élaborer tout code de calcul de ventilation.

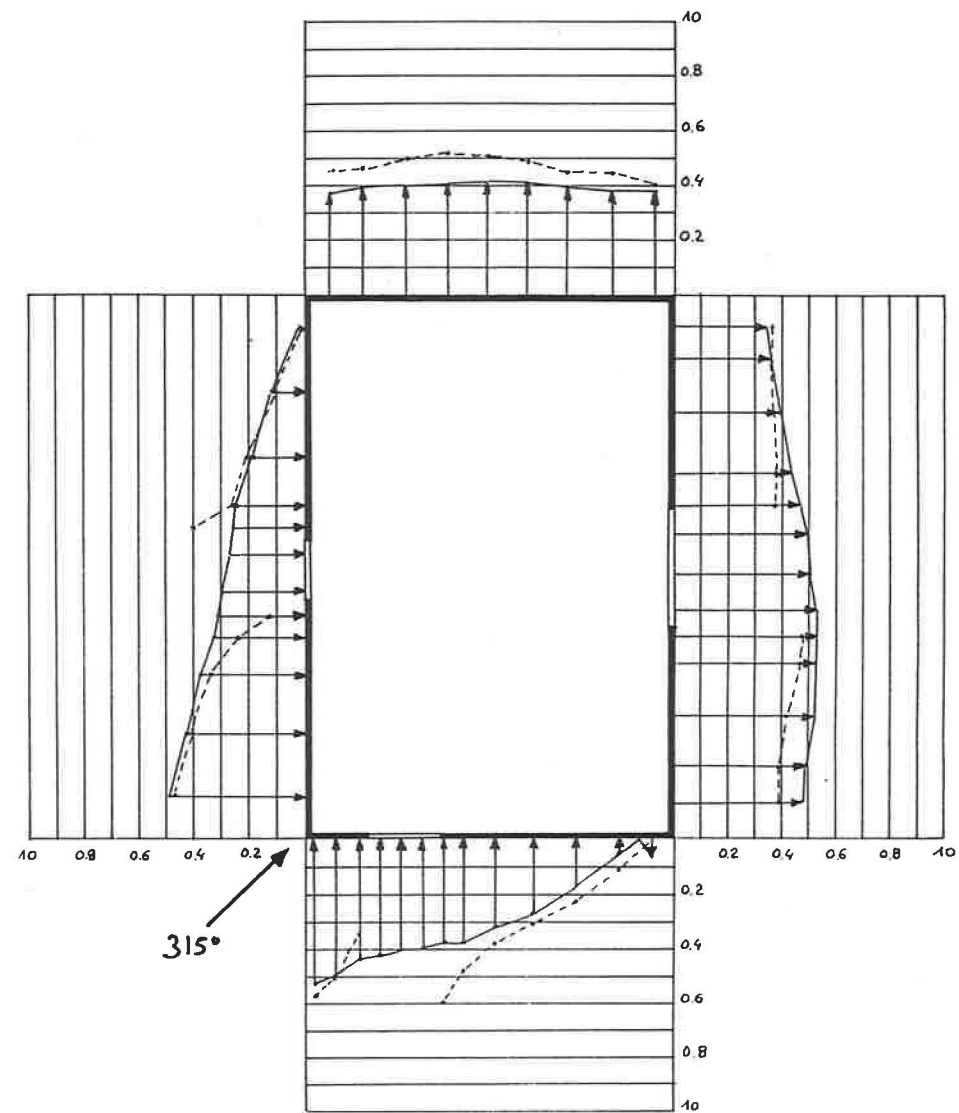
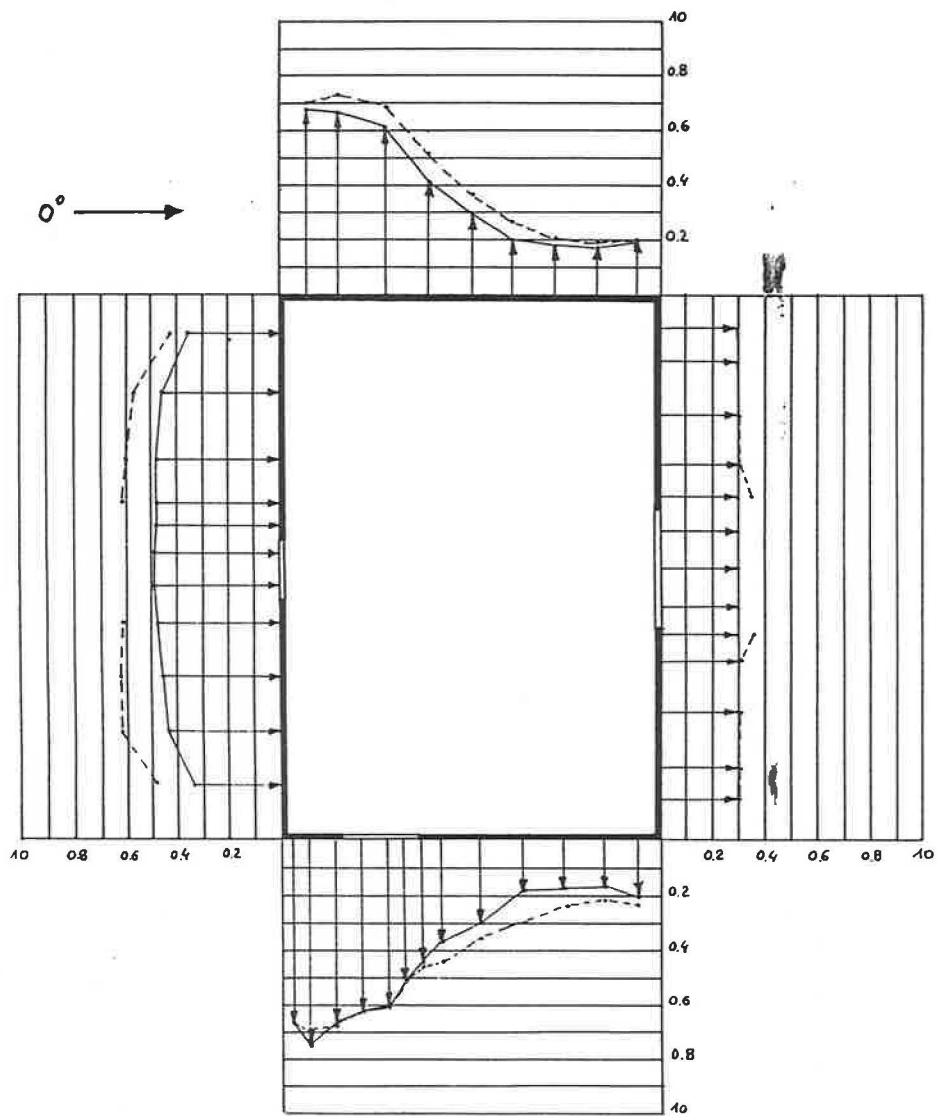


Figure 17 - Champs de pression de l'enveloppe
de la cellule avec et sans ouverture
incidence 0° et 315°

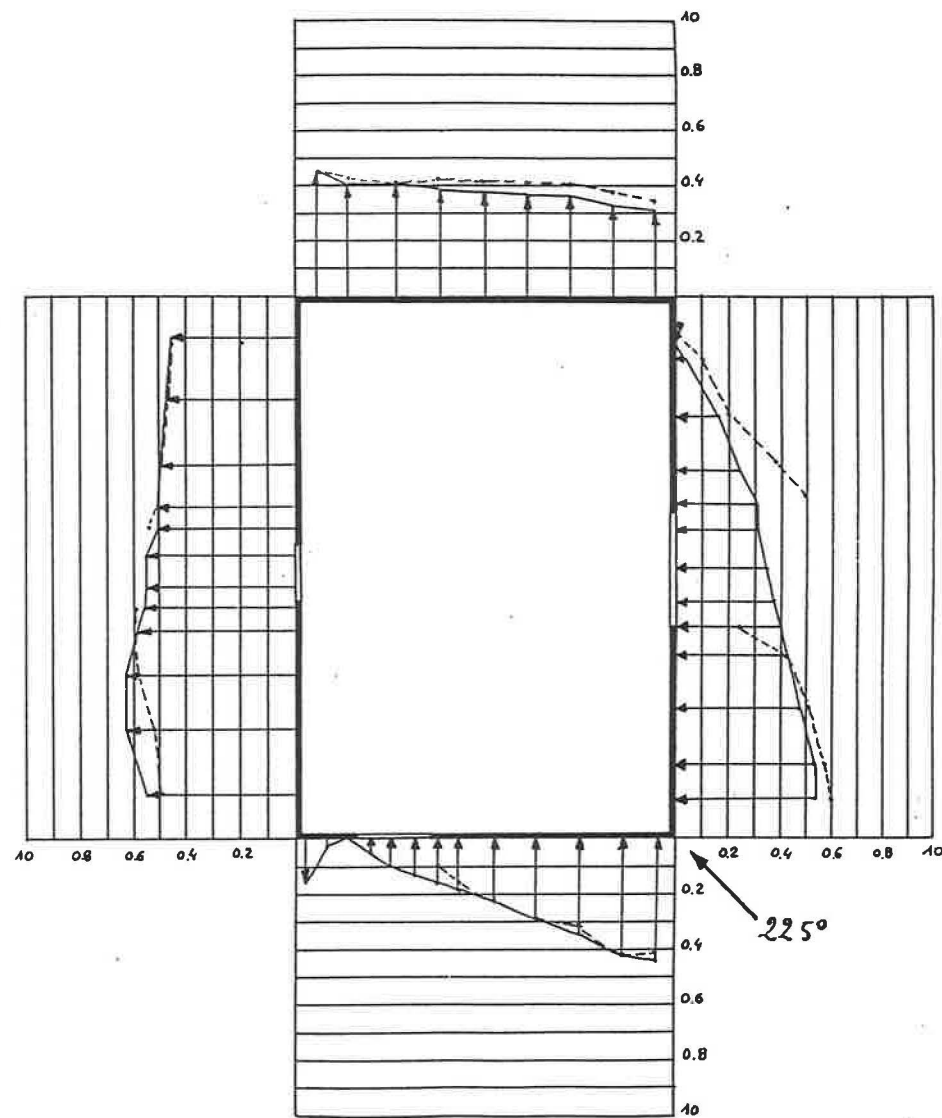
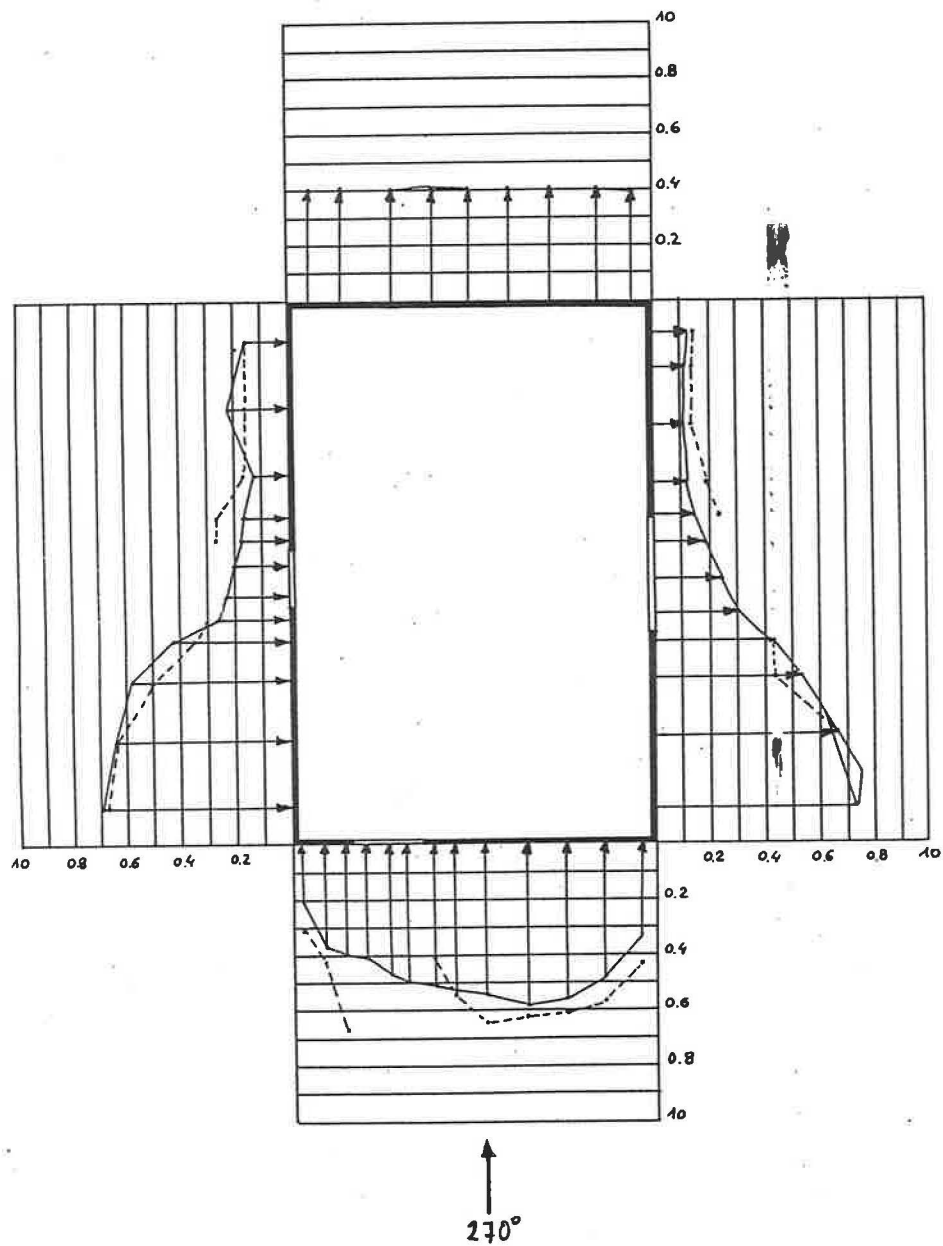


Figure 18 - Champs de pression de l'enveloppe de la cellule avec et sans ouverture incidence 270° et 225°

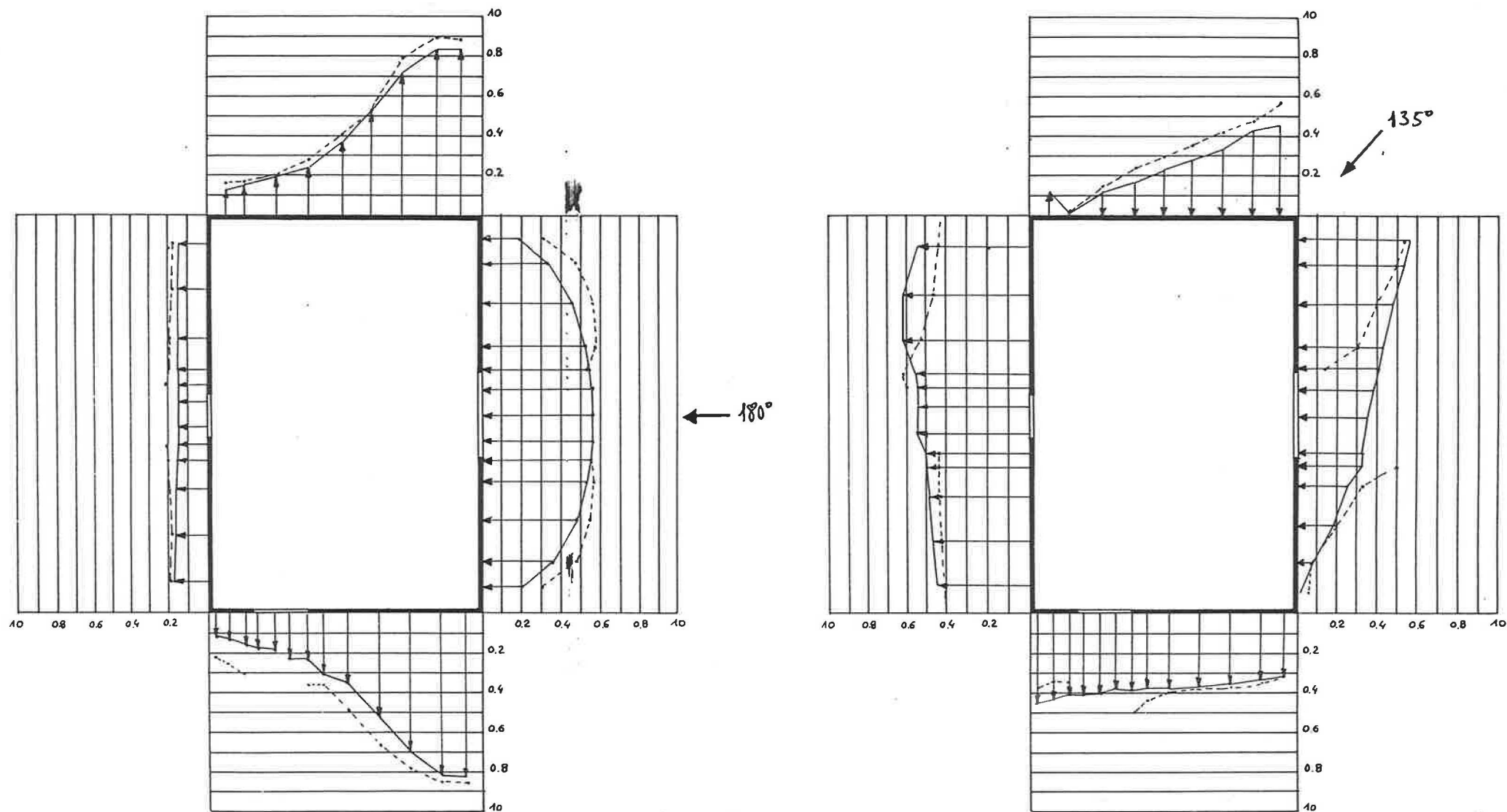


Figure 19 - Champs de pression de l'enveloppe
de la cellule avec et sans ouverture
incidence 180° et 135°

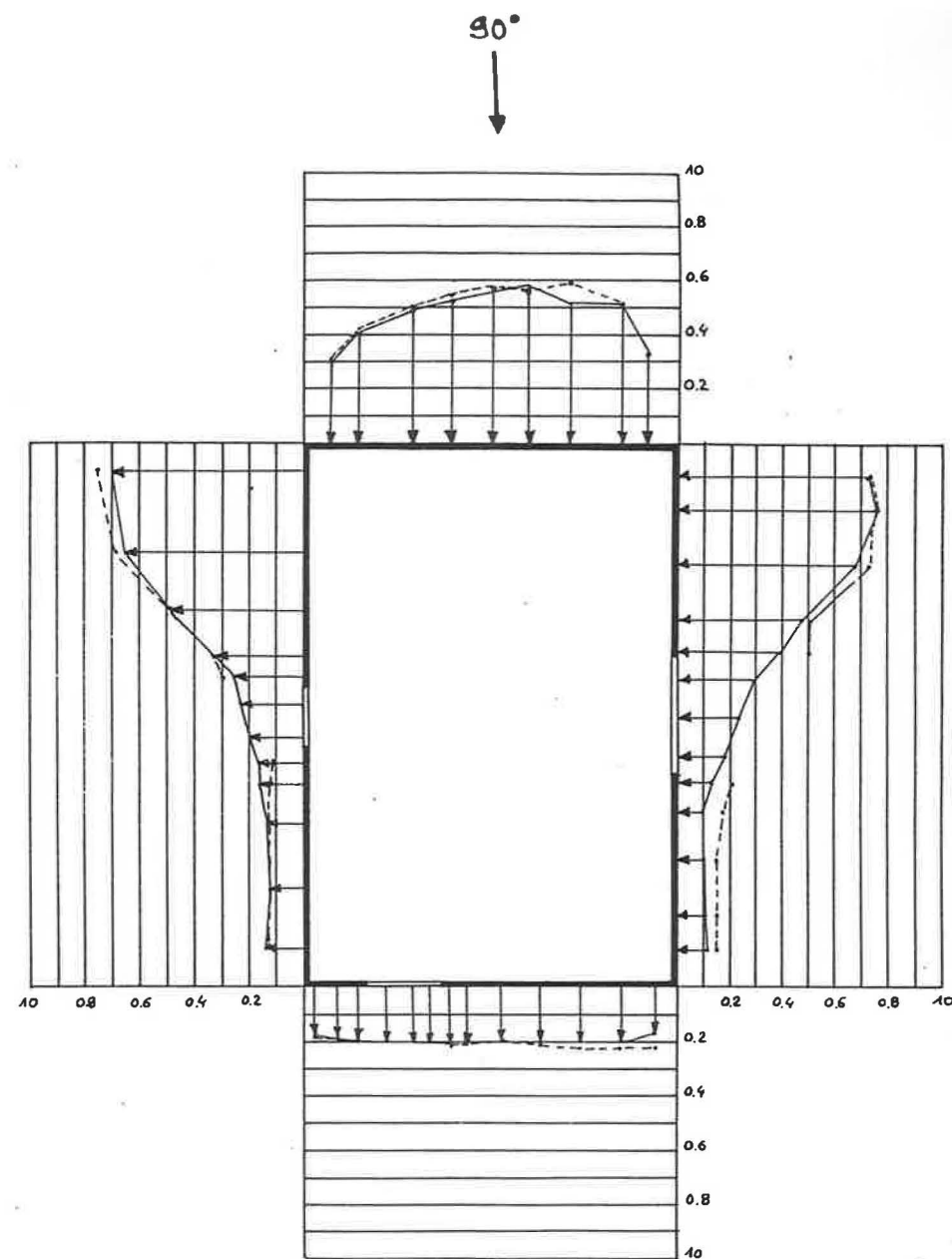
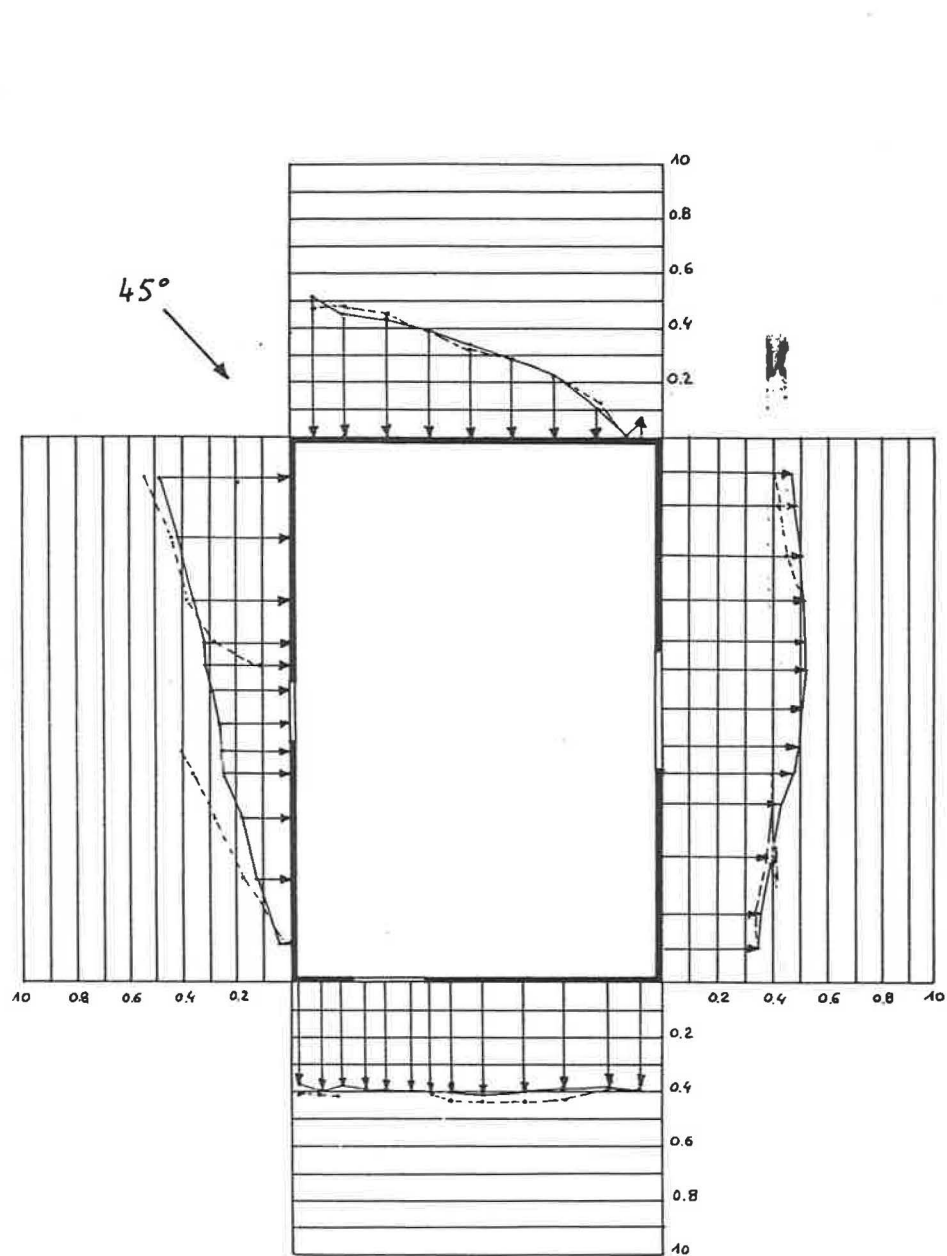


Figure 20 - Champs de pression de l'enveloppe de la cellule avec et sans ouverture incidence 45° et 90°

4.3 - Débit de renouvellement d'air et champ de vitesse interne associé

La mesure des débits traversants concerne la cellule d'habitation présentant son potentiel maximum de ventilation (une porte et deux fenêtres ouvertes).

Par rapport aux mesures des champs de pression seules les incidences les plus significatives ont été retenues.

Le cas de la cellule à deux pièces principales séparées d'une porte, figure 21, également testé en soufflerie pour certaines incidences constituera un autre cas de ventilation du modèle de calcul (mesures de pression non effectuées). Dans le même esprit, un essai pour une classe de vent différente (classe IV) a également été réalisé.

Les taux de renouvellement d'air sont, pour une même incidence, mesurés en 5 points différents. La répartition spatiale de ces stations sondées est présentée sur la figure suivante.

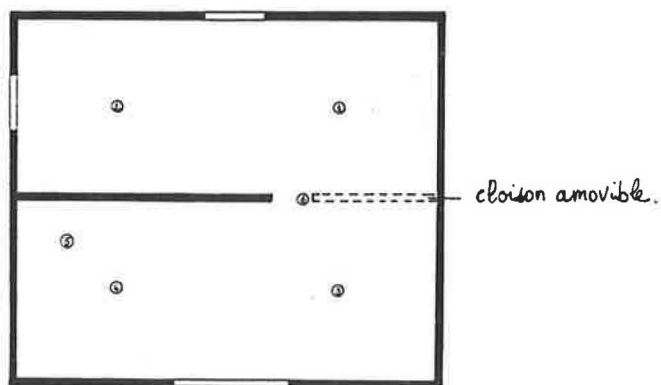


Figure 21 - Numérotation des points sondés

Afin de s'assurer de la bonne reproductibilité des mesures, de trois à cinq essais consécutifs sont réalisés à chaque station et pour toutes les incidences.

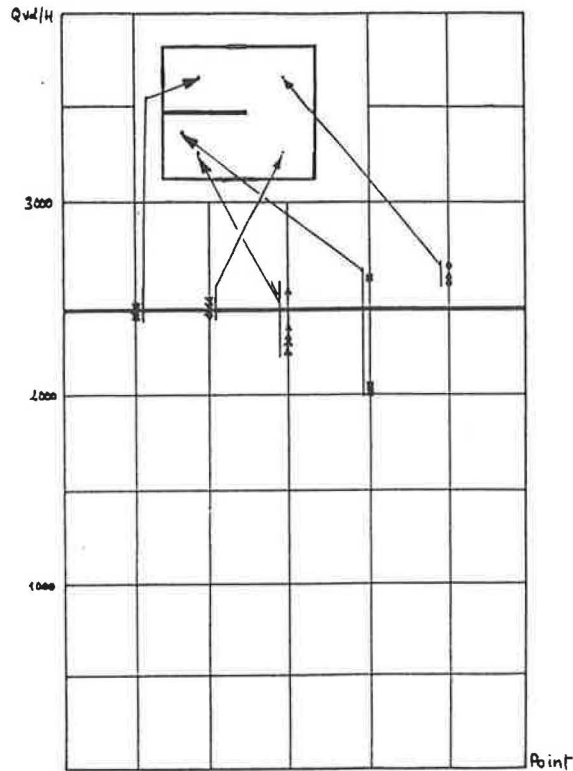


Figure 22 - Dispersion des mesures pour chaque station sondée
incidence 45°

Maison sans cloison
vent de classe II

Un tel exemple (incidence 45°) est rapporté sur la figure ci-dessus.

Exceptées les stations situées dans les zones de fluide mort (points 5 et 6), on observe une très bonne reproductibilité de la mesure.

Dans ces zones, l'intermittence des flux entraîne une plus forte dispersion.

Dans ce cas, il y a contradiction entre la technique de mesure transitoire et l'instationnarité locale de l'écoulement.

La valeur moyenne locale ne peut alors être appréhendée qu'en augmentant le nombre d'essais.

Dans le cas de la cellule non cloisonnée, les taux de renouvellement d'air, mesurés selon la technique exposée au paragraphe 3.4, montrent que la ventilation de la cellule est peu sensible à la direction du vent (figure 23).

Les valeurs moyennes sont comprises pour chaque incidence entre 60 et 100 volumes/heure vraie grandeur pour une vitesse de référence de 5 m/s à la hauteur du toit.

La dispersion des taux de renouvellement d'air locaux peut être importante sous certaines incidences, elle dépend essentiellement de la position des ouvrants par rapport au flux incident.

Le cloisonnement du volume intérieur réduit le niveau de ventilation (perte de charge du circuit aéraulique plus importante) et augmente la dispersion des taux de renouvellement d'air locaux (figure 24).

L'organisation du réseau de perte de charge fait apparaître des écoulements privilégiés au détriment de zones plus faiblement ventilées.

Suivant la distribution des pièces et leur fonction, l'orientation de l'habitation par rapport aux vents dominants revêt un caractère déterminant sur la qualité du confort.

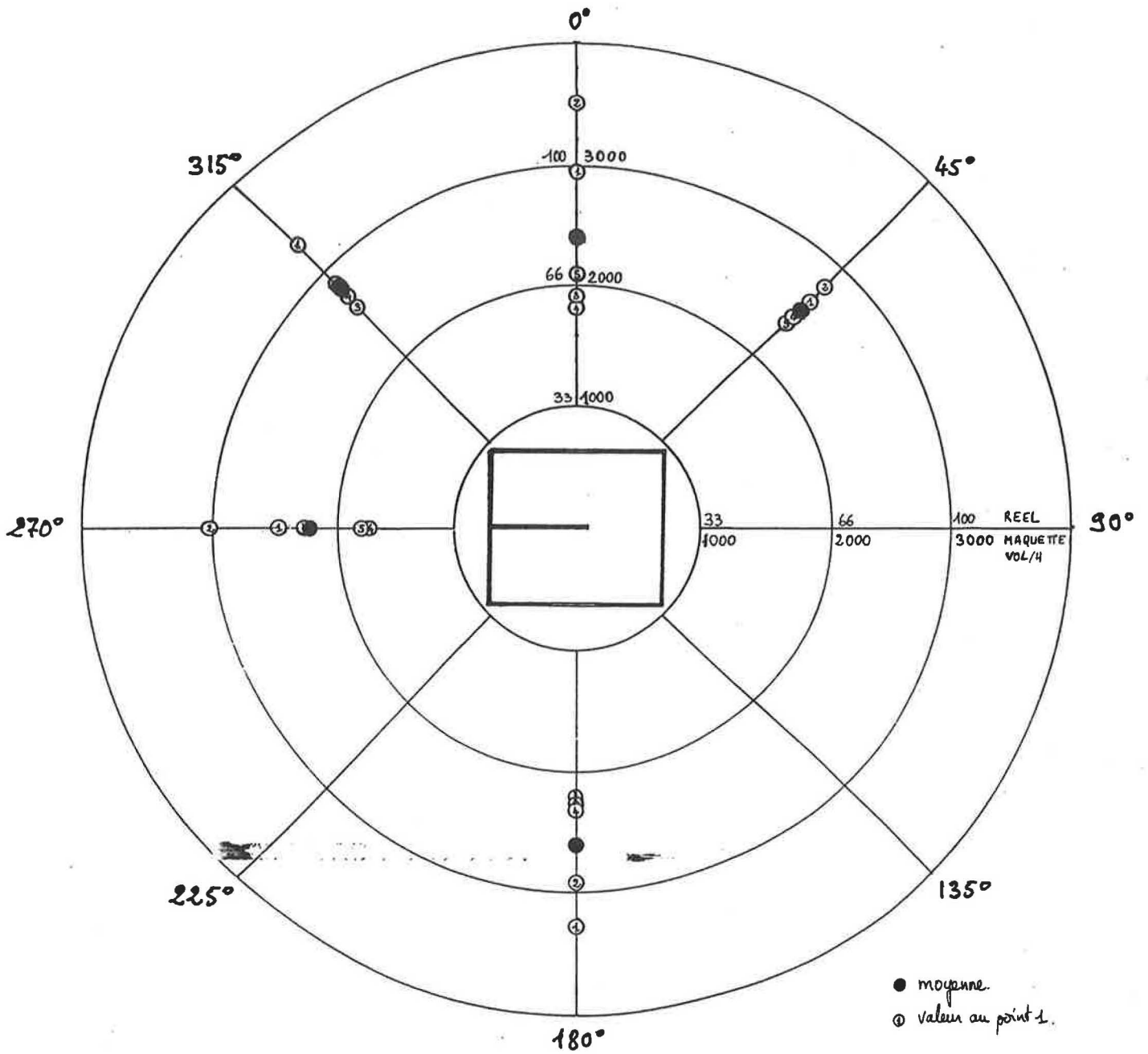


Figure 23 - Taux de renouvellement d'air de la cellule non cloisonnée en fonction de l'incidence du vent $\bar{U}_{10m \text{ à } 60} = 5 \text{ m/s}$

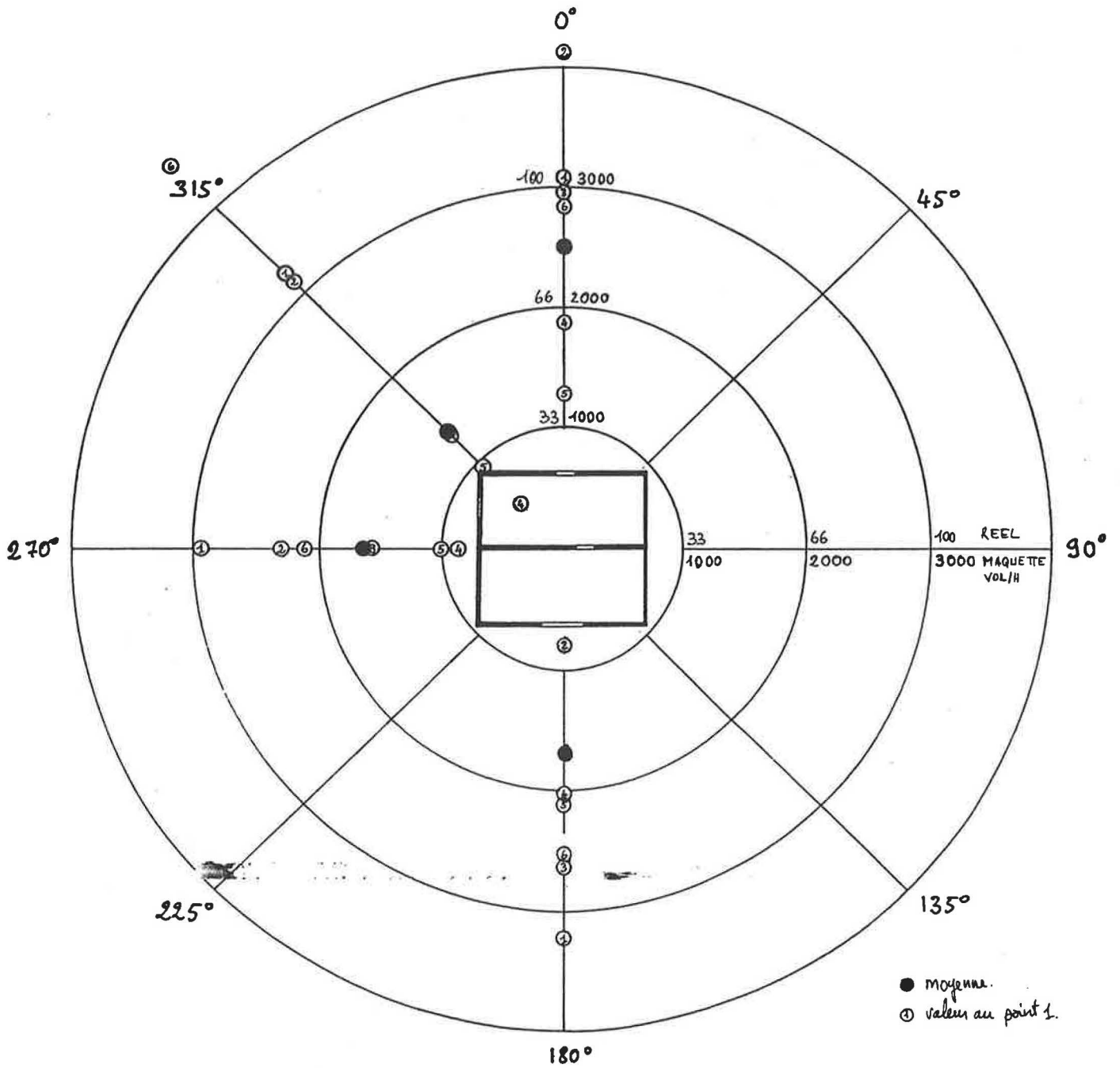


Figure 24 - Taux de renouvellement d'air de la cellule cloisonnée en fonction de l'incidence du vent $\bar{U}_{10m \text{dété}} = 5 \text{ m/s}$

La mesure des taux de renouvellement d'air à deux hauteurs différentes (1,5 m et 2,5 m), montre une bonne homogénéité de la ventilation dans le cas de la cellule sans cloison (figure 25).

Comme précédemment le cloisonnement engendre une plus grande dispersion des valeurs locales et moyennes.

L'augmentation de la rugosité du site (figure 26) fait chuter le niveau de ventilation par réduction de la vitesse du flux à proximité du sol.

Afin de corroborer ces résultats et de mieux comprendre la physique des phénomènes, quelques mesures de vitesses locales et des visualisations sont réalisées.

Ces résultats sont présentés sous forme sans dimension* sur les figures 27 à 30 pour la cellule sans cloison et 31 à 34 pour la cellule avec cloison.

Il apparaît clairement que l'écoulement interne s'organise en rouleaux stationnaires dans chaque volume élémentaire de la cellule.

Les frontières entre ces différents volumes sont fixées par les cloisons et les jets apparaissant au droit de chaque ouverture au vent ou en surpression.

En portant le rapport de vitesse $\frac{\bar{U}}{\bar{U}_{ref}}$ en fonction du taux de renouvellement d'air, il n'apparaît pas de corrélation directe entre ces deux variables (figure 35 et 36).

Du fait de la structure des écoulements (jets et tourbillons) les vitesses locales dépendent essentiellement de la station de mesure. Les zones de jet et la périphérie des tourbillons présentent des vitesses beaucoup plus importantes qu'en leur centre ou dans les zones de fluide de mort.

Le cloisonnement de la cellule entraîne une séparation entre deux zones. La partie au vent présente des vitesses relativement élevées tandis que la partie sous le vent jouit d'une ambiance beaucoup plus calme mais probablement à flux plus désorganisé (absence de structures tourbillonnaires stationnaires).

En d'autres termes, dans le cas d'habitation à forte perméabilité non homogène, il existera de forts gradients de vitesses internes dépendant de l'organisation des ouvrants des pièces et de la direction du vent.

La connaissance de ces vitesses locales reste très utile à l'évaluation du niveau de confort des occupants dans les divers endroits (sensation agréable de ventilation, évaporation de la sueur, lutte contre la condensation) mais déborde du cadre de cette étude.

* rapport $\frac{\bar{U}}{\bar{U}_{ref}}$

avec \bar{U} : vitesse locale à 1,5 mètres du sol

\bar{U}_{ref} : vitesse moyenne à 10 mètres de hauteur en amont de la cellule

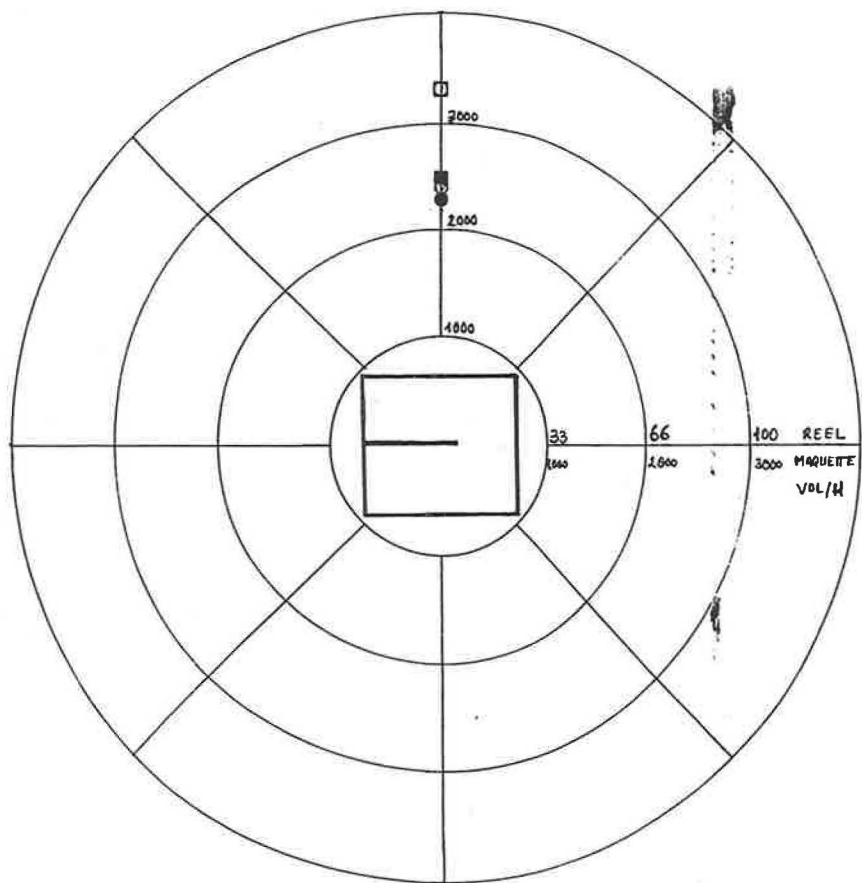


Figure 25 - Taux de renouvellement d'air en fonction de la hauteur au sol des points sondés

- | | |
|----------------|-----------------------|
| POINTS A 1,5 M | ● maison sans cloison |
| | ○ maison avec cloison |
| POINTS A 2,5 M | □ maison sans cloison |
| | ■ maison avec cloison |

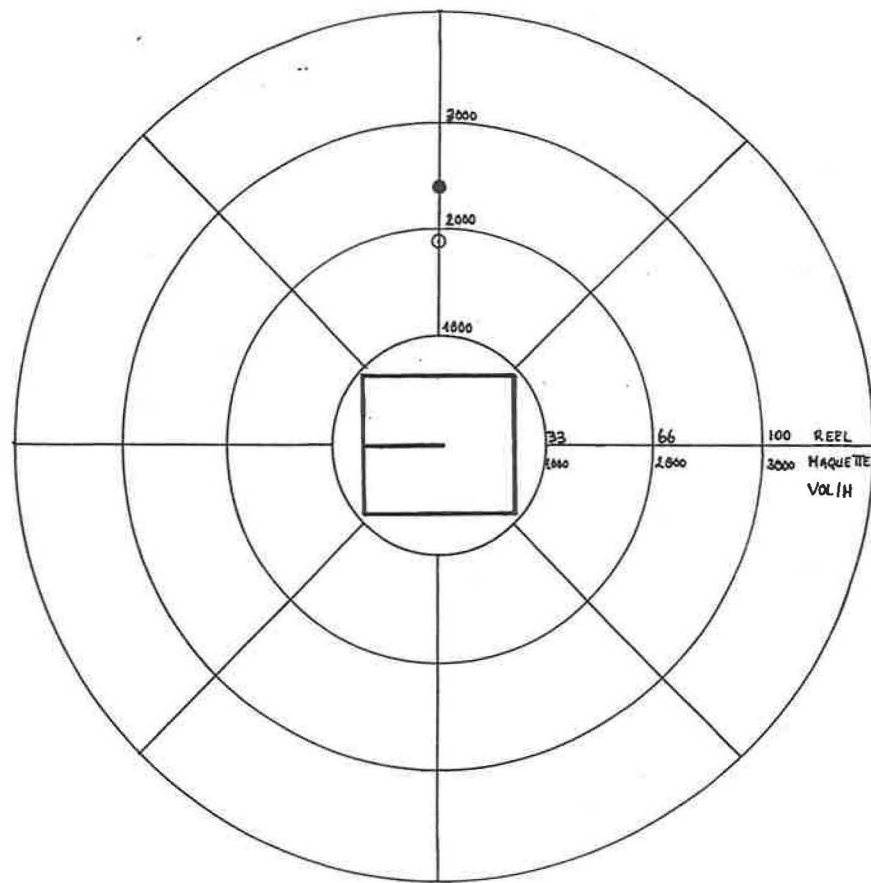


Figure 26 - Taux de renouvellement d'air en fonction de la rugosité du site amont

- vent de classe II (campagne)
- vent de classe IV (zone urbanisée)
- $U_{10m\grave{a}10} = 5m/s$
- maison sans cloison

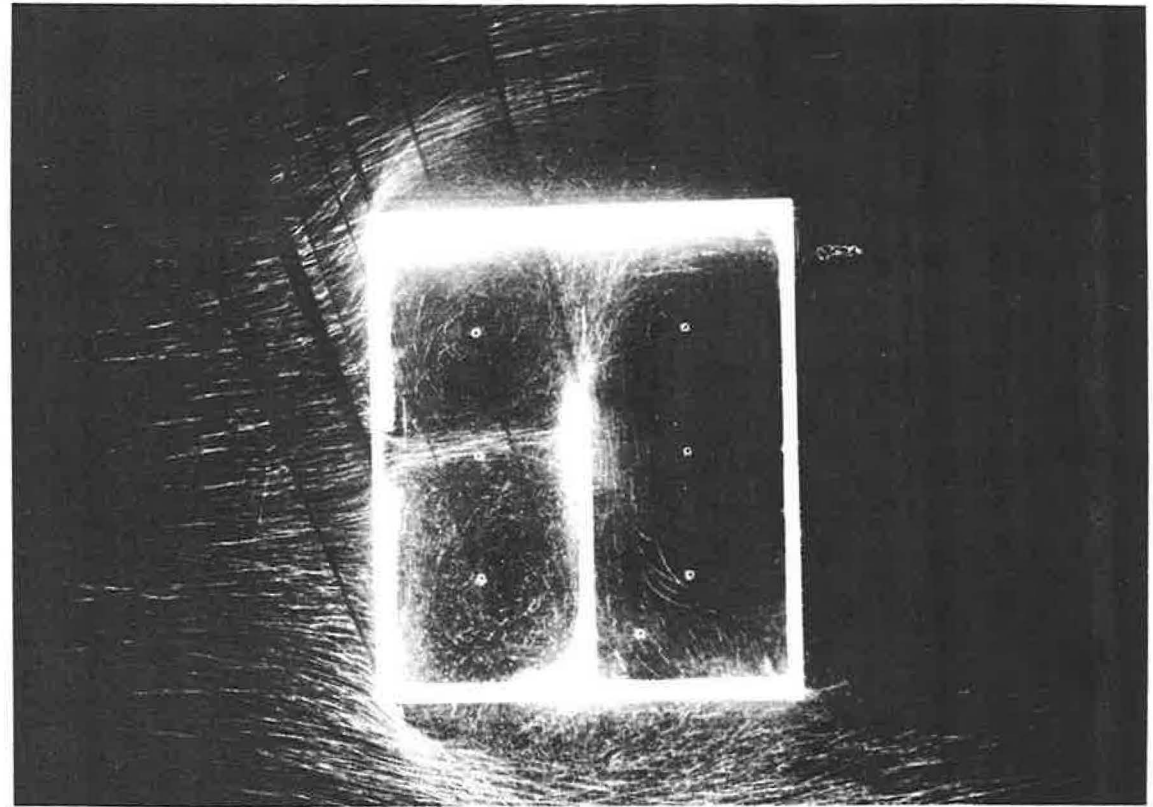
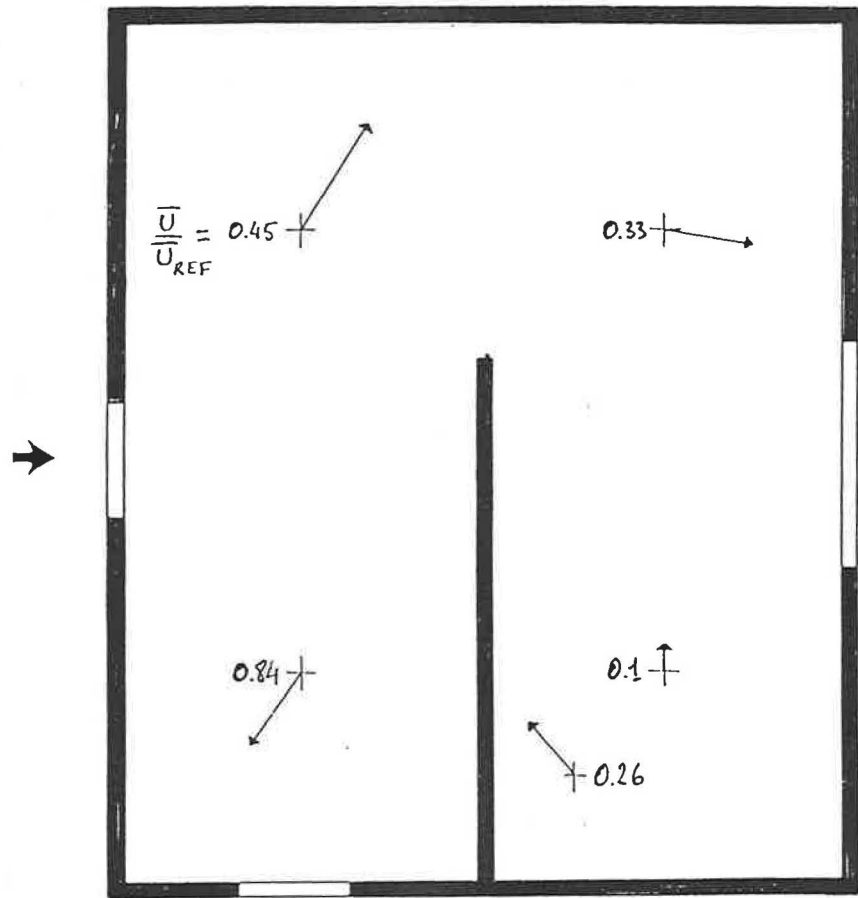


Figure 27 - Champ de vitesse et visualisation de l'écoulement dans la cellule incidence 0°

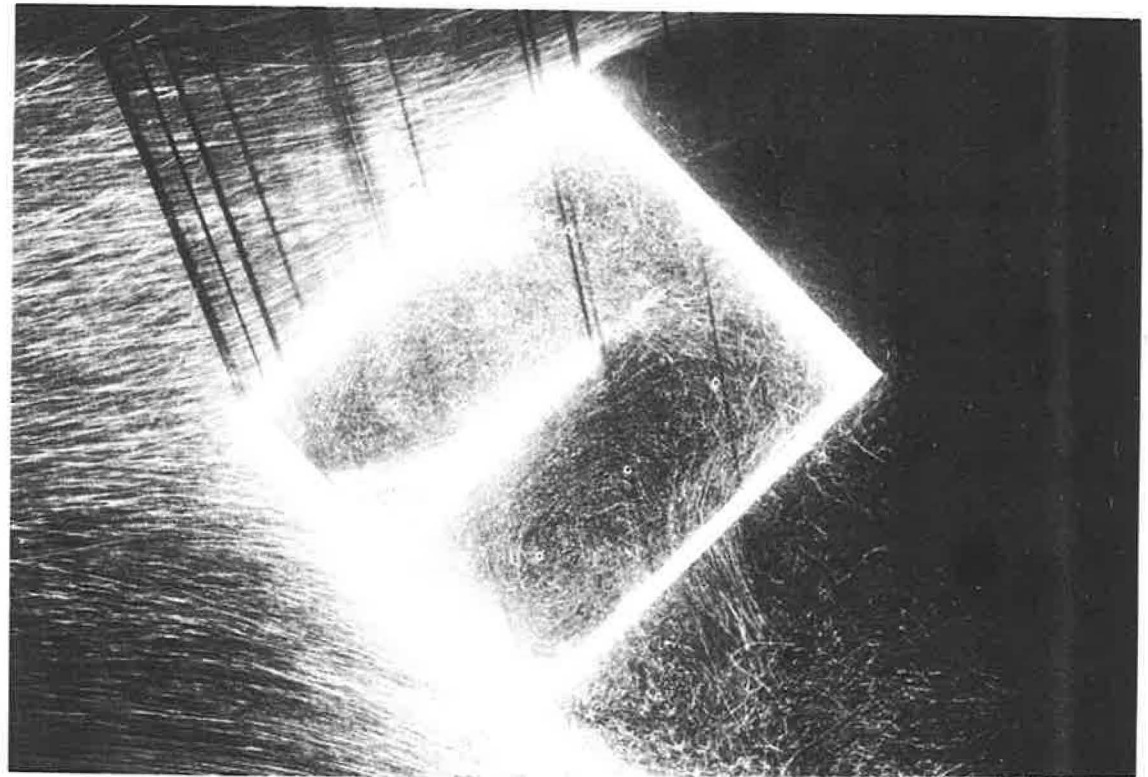
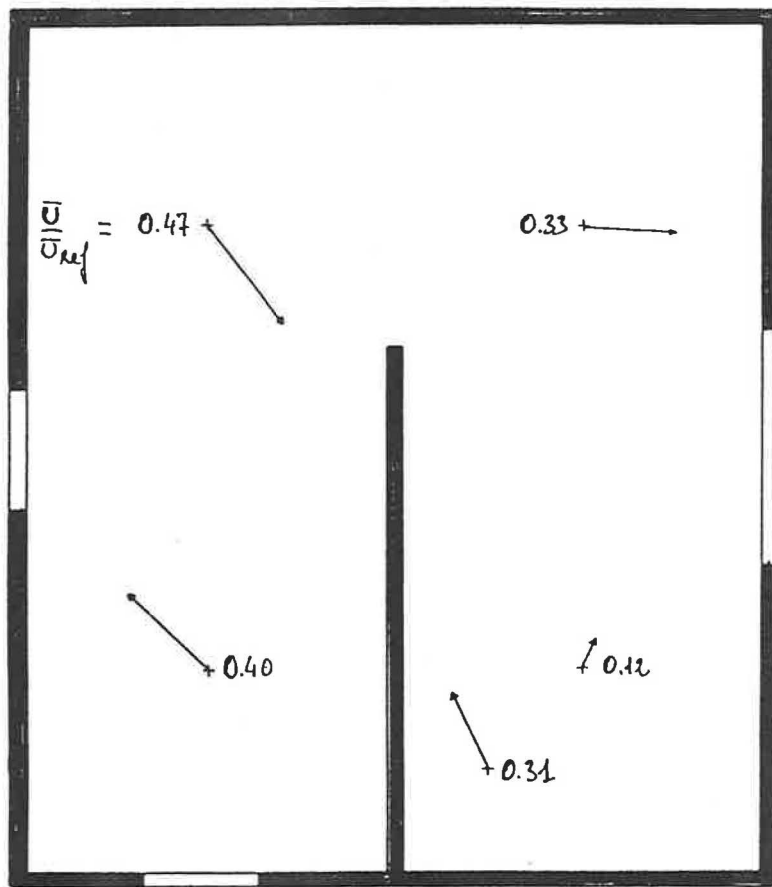


Figure 28 - Champ de vitesse et visualisation de l'écoulement dans la cellule incidence 315°

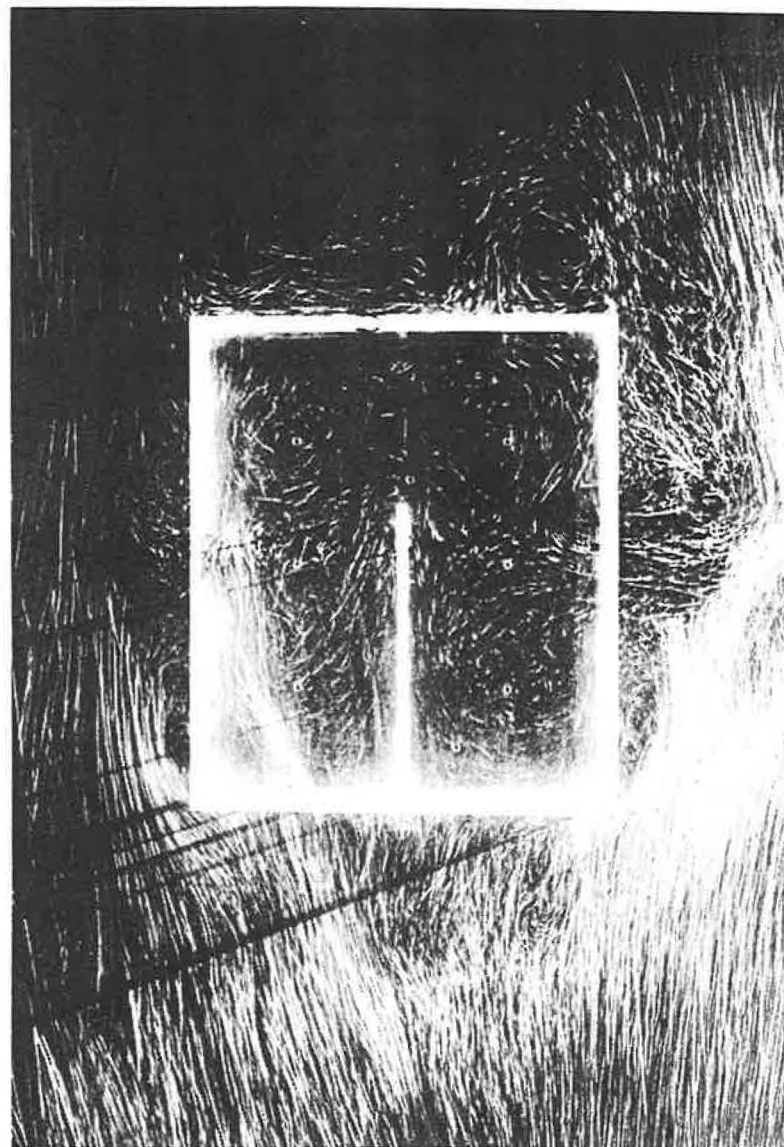
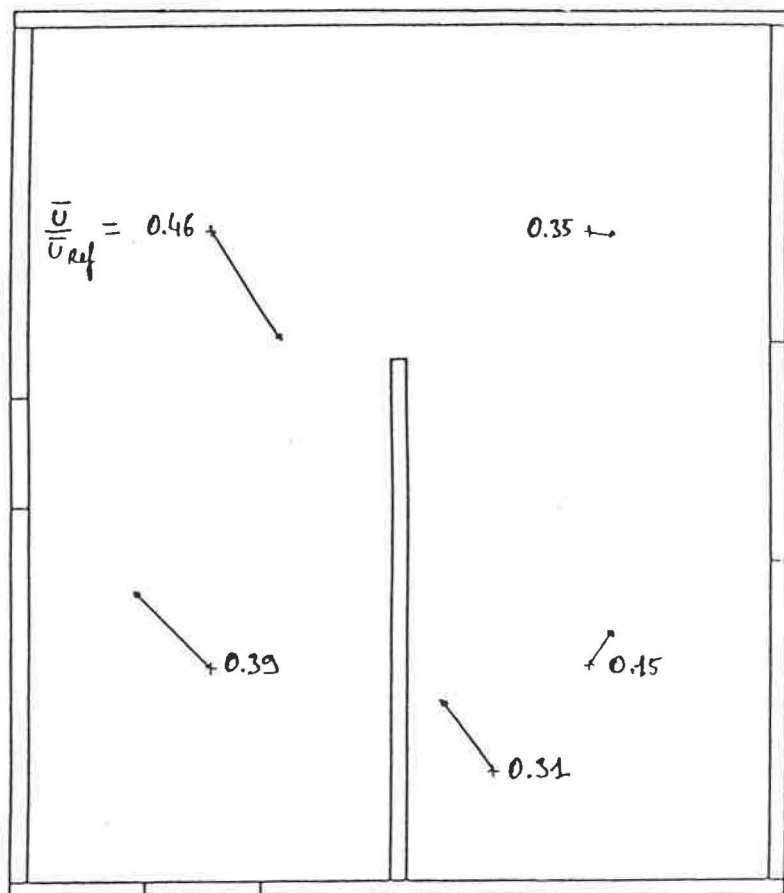


Figure 29 - Champ de vitesse et visualisation de l'écoulement dans la cellule incidence 270°

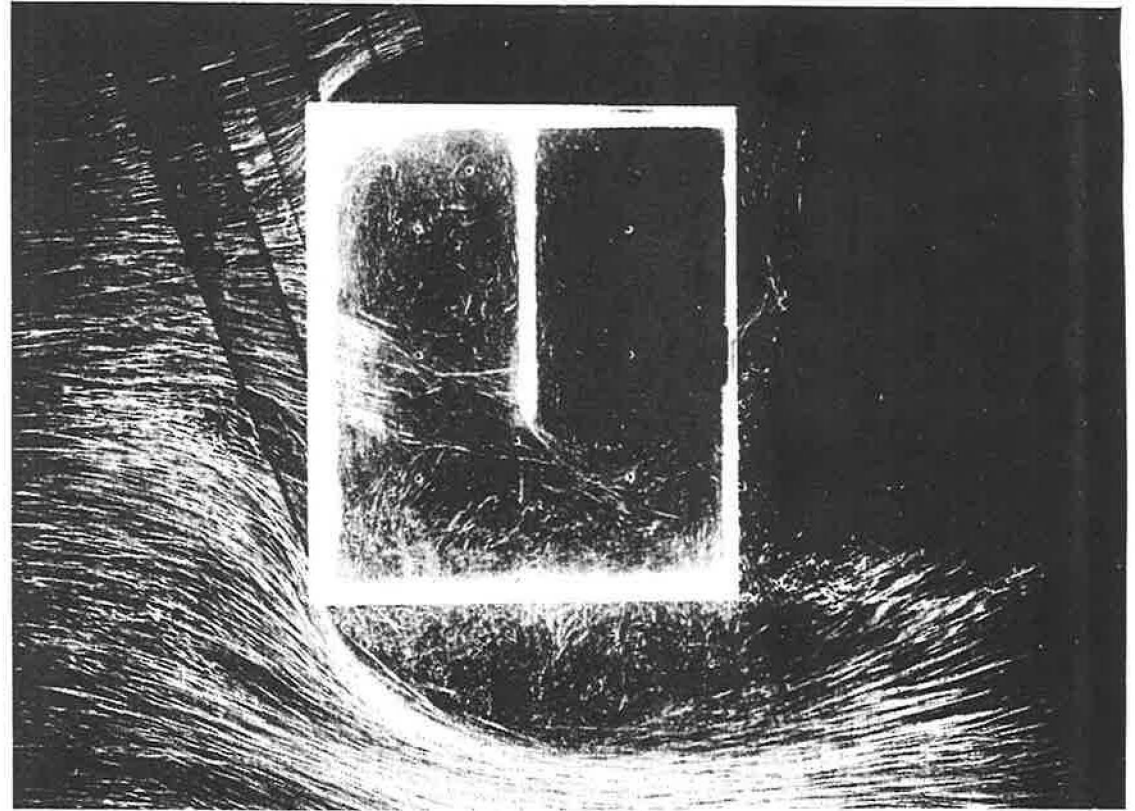
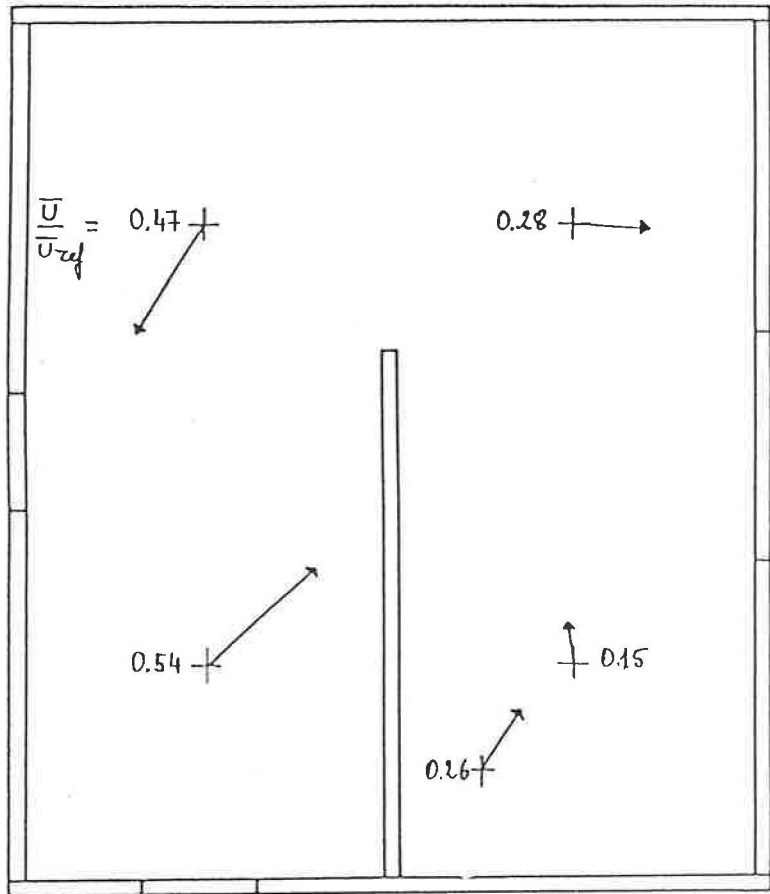


Figure 30 - Champ de vitesse et visualisation de l'écoulement dans la cellule incidence 180°

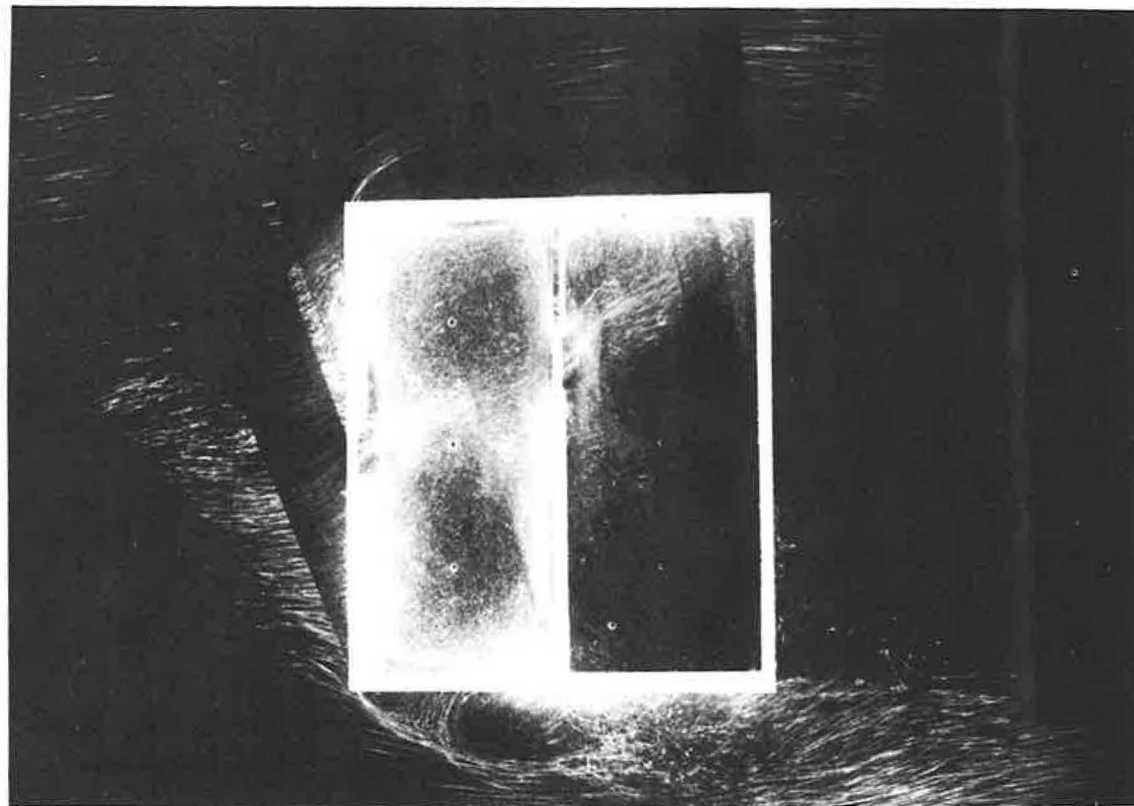
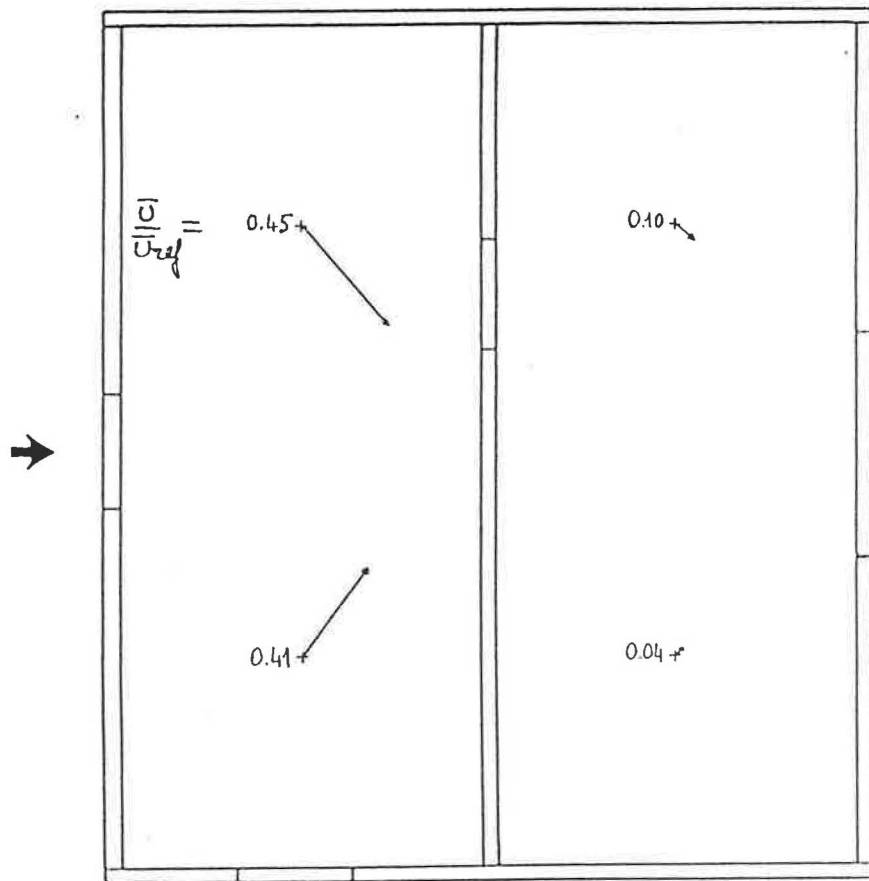


Figure 31 - Champ de vitesse et visualisation de l'écoulement dans la cellule cloisonnée incidence 0°

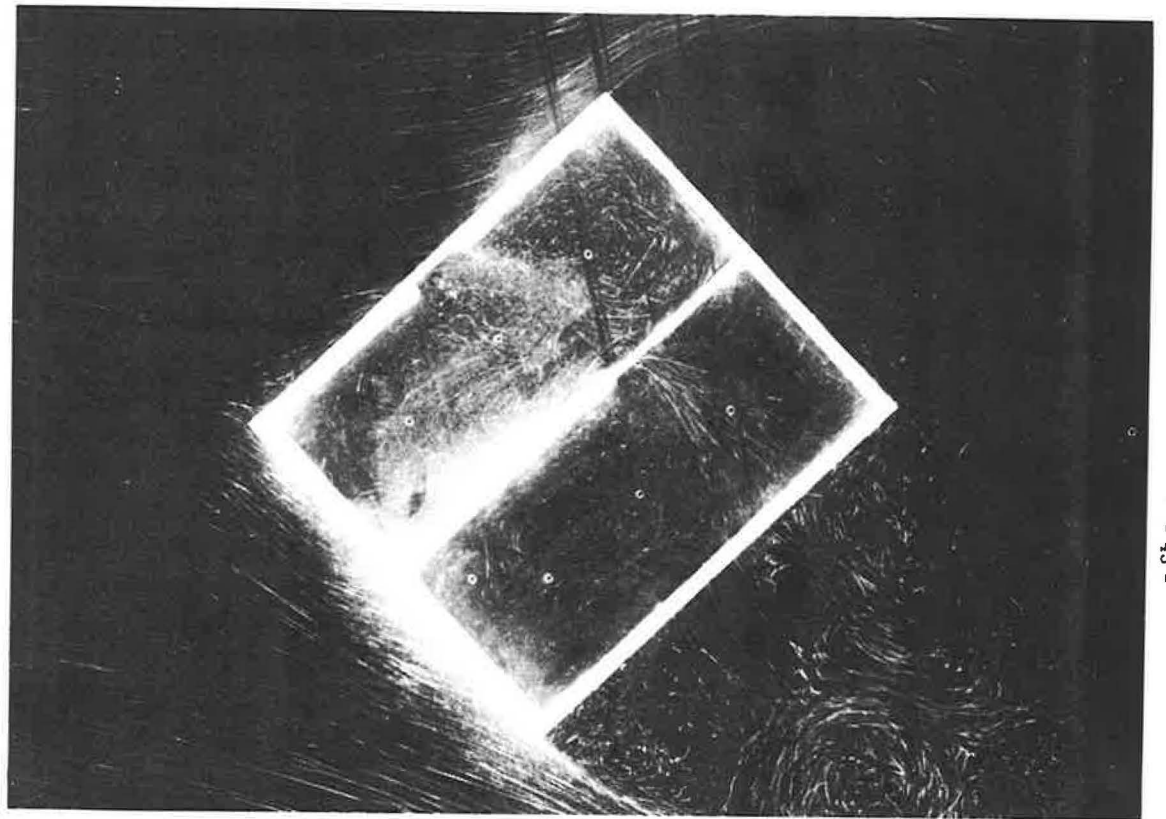
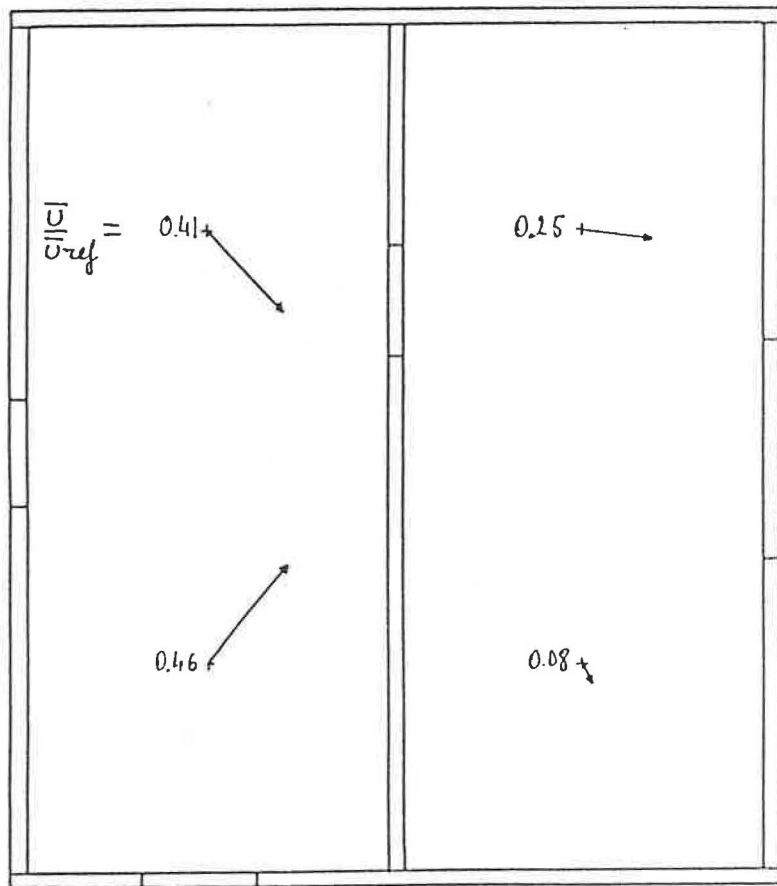


Figure 32 - Champ de vitesse et visualisation de l'écoulement dans la cellule cloisonnée incidence 315°

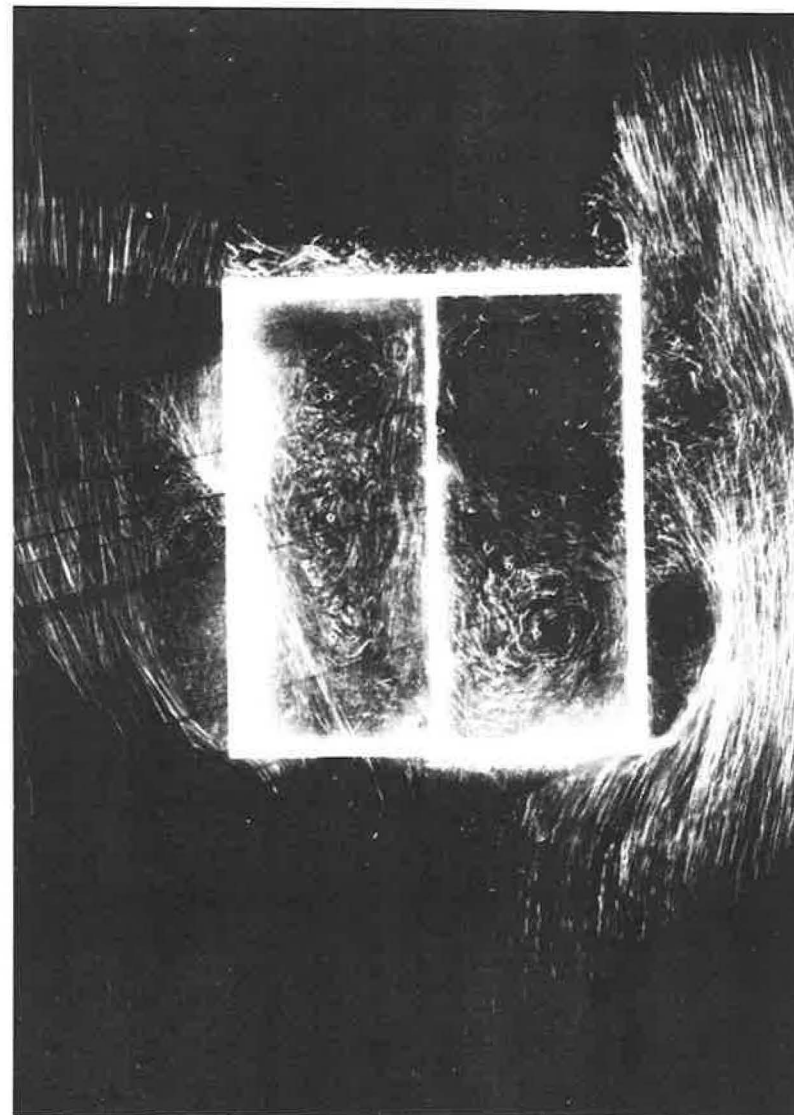
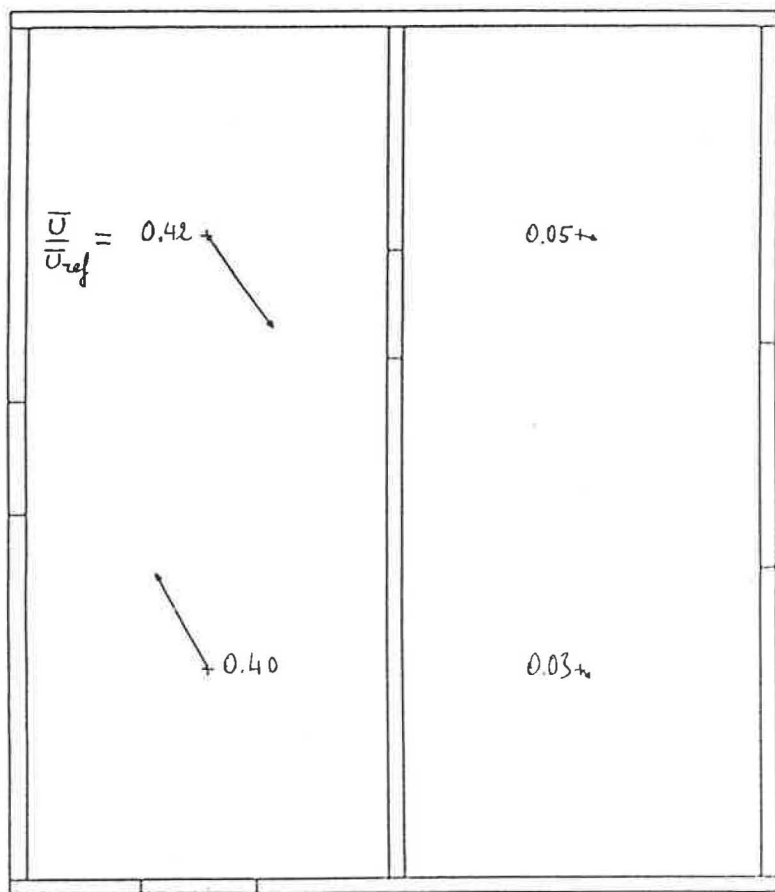


Figure 33 - Champ de vitesse et visualisation de l'écoulement dans la cellule cloisonnée incidence 270°

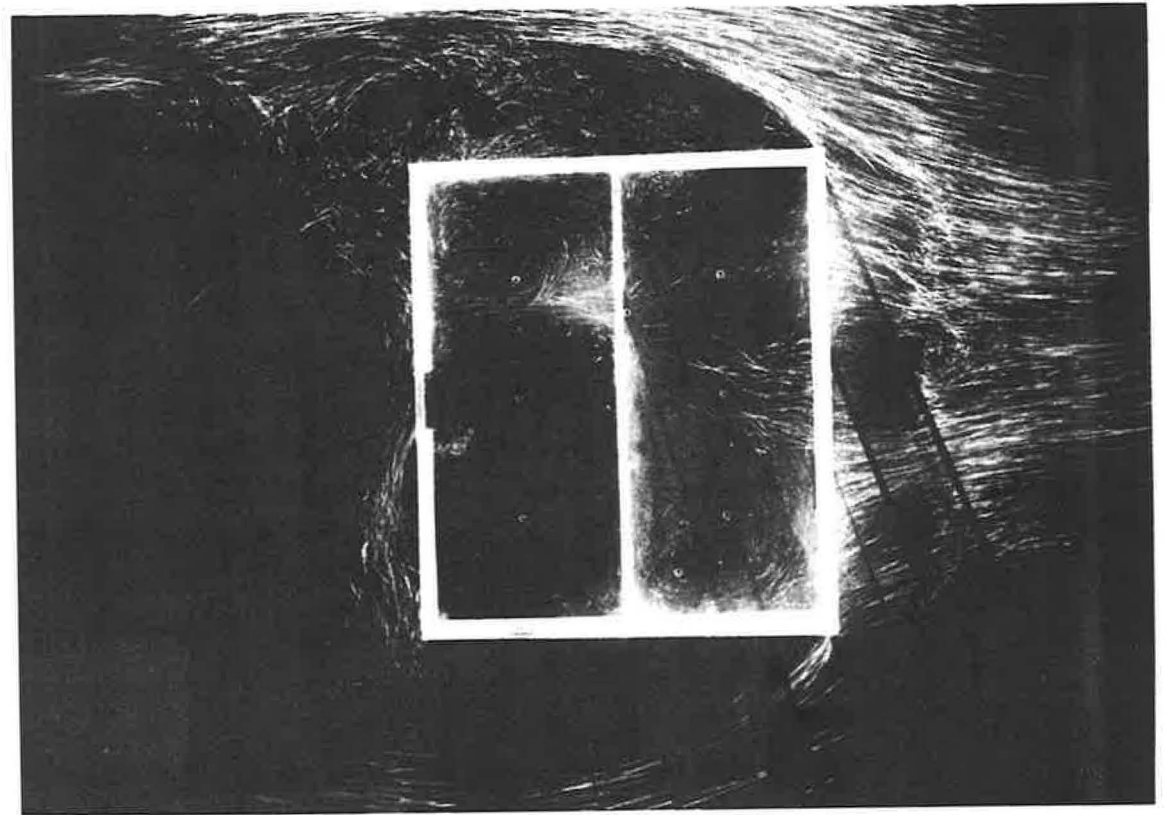
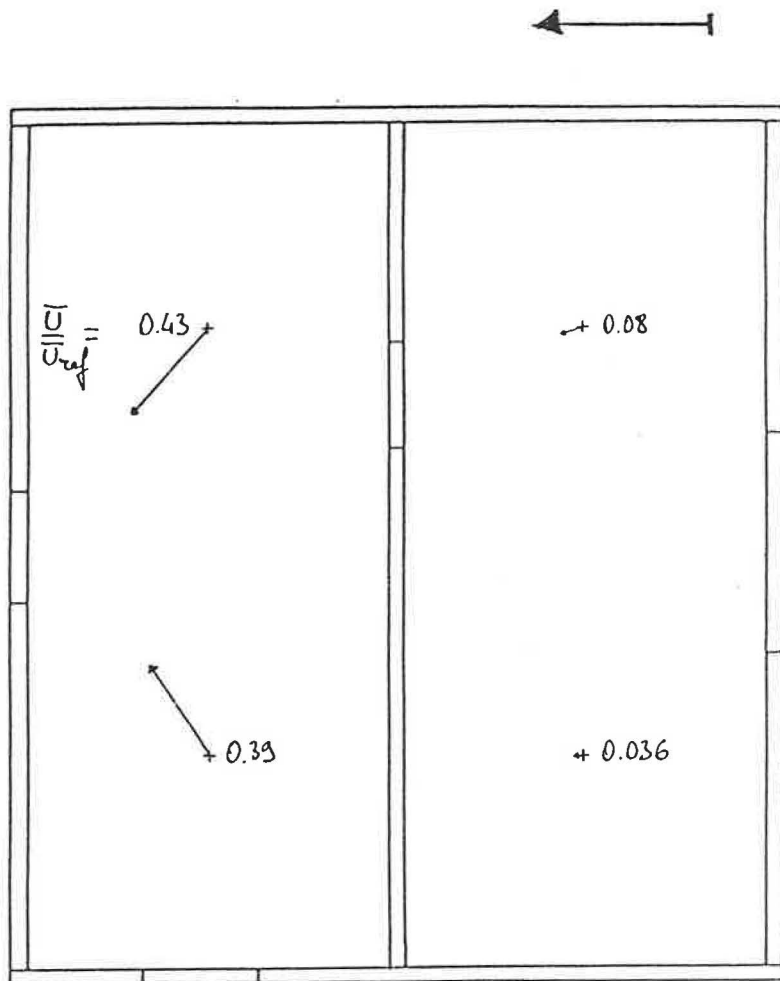


Figure 34 - Champ de vitesse et visualisation de l'écoulement dans la cellule cloisonnée incidence 180°

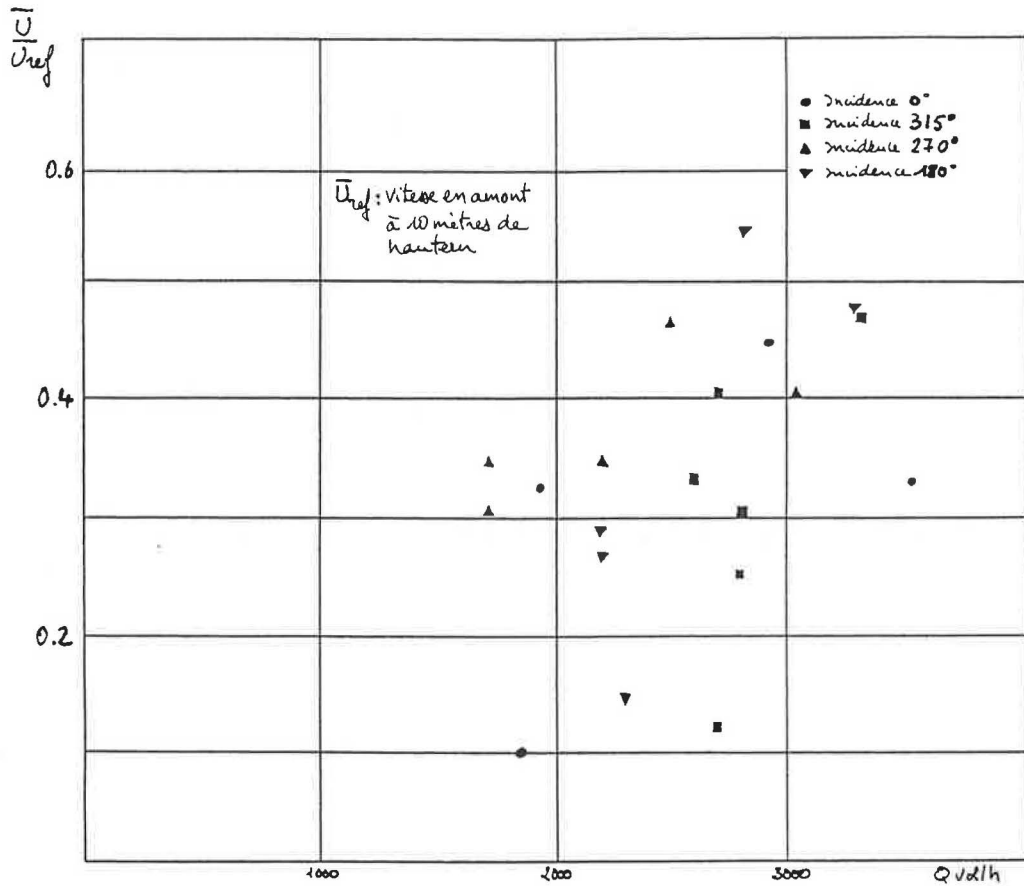


Figure 35 - Vitesse locale moyenne en fonction du taux de renouvellement d'air local moyen (cellule non cloisonnée)

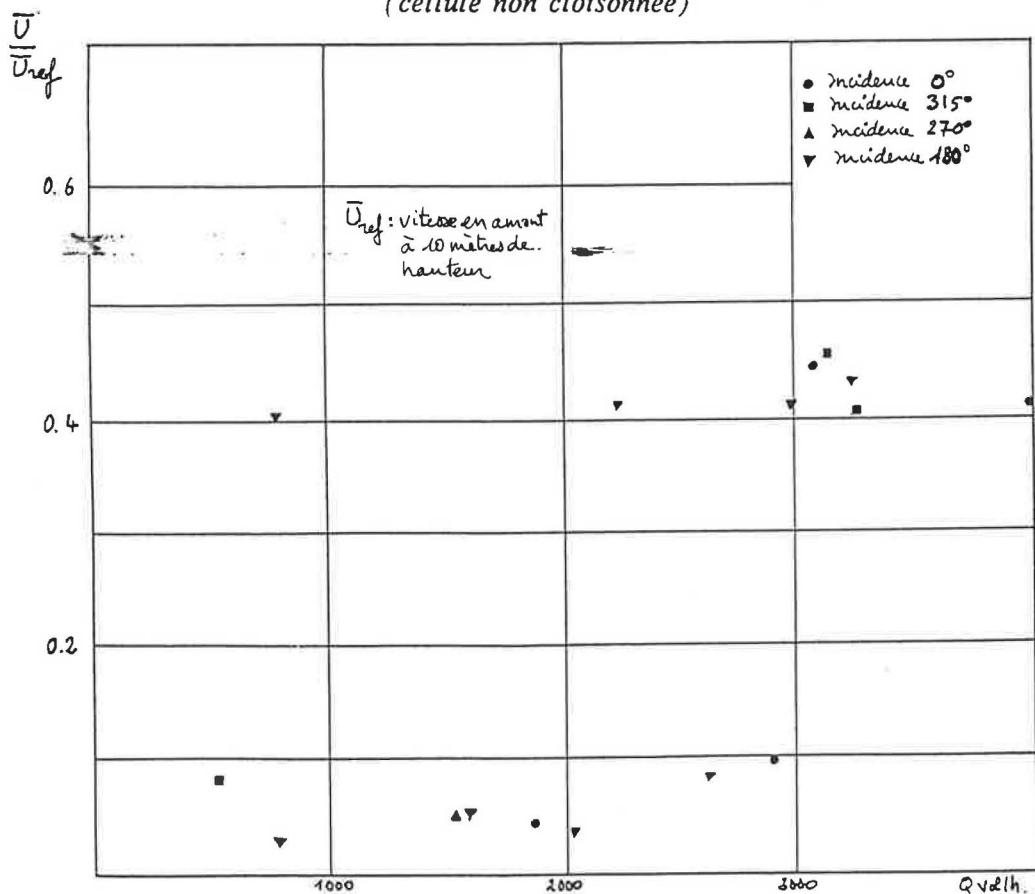


Figure 36 - Vitesse locale moyenne en fonction du taux de renouvellement d'air local moyen (cellule cloisonnée)

5 - CONCLUSION

Ces investigations expérimentales en soufflerie à couche limite turbulente, constitue une base de données importante concernant la ventilation naturelle sans tirage thermique des habitations des climats tropicaux chauds et humides.

Les données disponibles sont les suivantes :

- champ de pression locale moyenne en fonction de l'incidence du vent pour la cellule avec et sans ouverture
- taux de renouvellement d'air moyen locaux et globaux en fonction de l'incidence du vent, de deux rugosités de site et de deux aménagements intérieurs de l'habitation
- champ de vitesse moyenne locale et structure de l'écoulement à l'intérieur de la cellule d'habitation

Pour ce type de bâtiment, toutes ces informations se complètent, elles doivent permettre à terme des comparaisons fines et fiables avec les codes de calcul de ce type de ventilation.

La confrontation avec les résultats obtenus dans la soufflerie du laboratoire de mécanique des fluides de Poitiers et avec le CEBTP est en cours et fera l'objet d'un autre rapport.

Les ingénieurs du CSTB restent à la disposition des différents intervenants concernant l'interprétation ou l'utilisation des résultats présentés dans ce document.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. GANDEMER - G. BARNAUD

"Ventilation naturelle en climat tropical humide : Méthodologie de prise en compte du vent dans l'habitat et conseils pratiques"
CSTB Nantes EN ADYM 87.18 C

- [2] J.L. PEUBE - A. RENAUD - B. FENET

Ventilation naturelle en climat tropical humide - Convention AFME n° 842 0014 -
Rapport intermédiaire n° 1.
Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques
40 avenue du Recteur Pineau - Bat. H - 86012 POITIERS CEDEX

- [3] J. COUNIHAN

"Adiabatic atmospheric boundary layers : a review and analysis of data from the period
1880 - 1972"
Atmosphéric environment vol 9 p 871-905 (1975)

- [4] C.M. HUNT

"Air infiltration : A review of some existing measurement techniques and data"
Building air change rate infiltration measurements
ASTM STP 719 1980 p 3 - 23

- [5] M. BARAT - M. DOUCHEZ

"Détermination du renouvellement d'air - Utilisation des traceurs".
Rapport de recherche du CETIAT Orsay France.

- [6] S. MURAKAMI - T. SHODA - N. KOBAYASHI

"Wind effects on air flows in half enclosed spaces"
4th international conference on wind effects on building and structures
Heathrow 8-12 sept. 1975

- [7] R. VILLAGINES - C. SOLLIEC

"Etude aérodynamique relative à la tour de la porte de l'esplanade et à l'aménagement du CNIT. Partie 2 : Le CNIT : Ambiances intérieures et ventilation"
CSTB Nantes EN ADYM 87.20 C

- [8] R. VILLAGINES - J. GANDEMER

"Indoor air flows"
A fast response flame ionisation detector for gas concentration
Building research and practice. The journal of CIB number 3 1989.

- [9] F.E. FACKREL

"A flame ionisation detector for measuring fluctuating concentration"
J. Phys Sci Instrum Vol 13 - 1980

- [10] R. VILLAGINES

Réalisation d'une nouvelle chaîne de mesure de concentration gazeuse instantanée.
Contribution à l'étude et à la modélisation du transport turbulent en soufflerie.
Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes 4 juillet 1988.

ANNEXE

COEFFICIENTS DE PRESSION

**COEFFICIENTS DE PRESSION
DE LA CELLULE PORTE ET FENETRES FERMEES**
(PREMIERE SERIE D'ESSAIS)

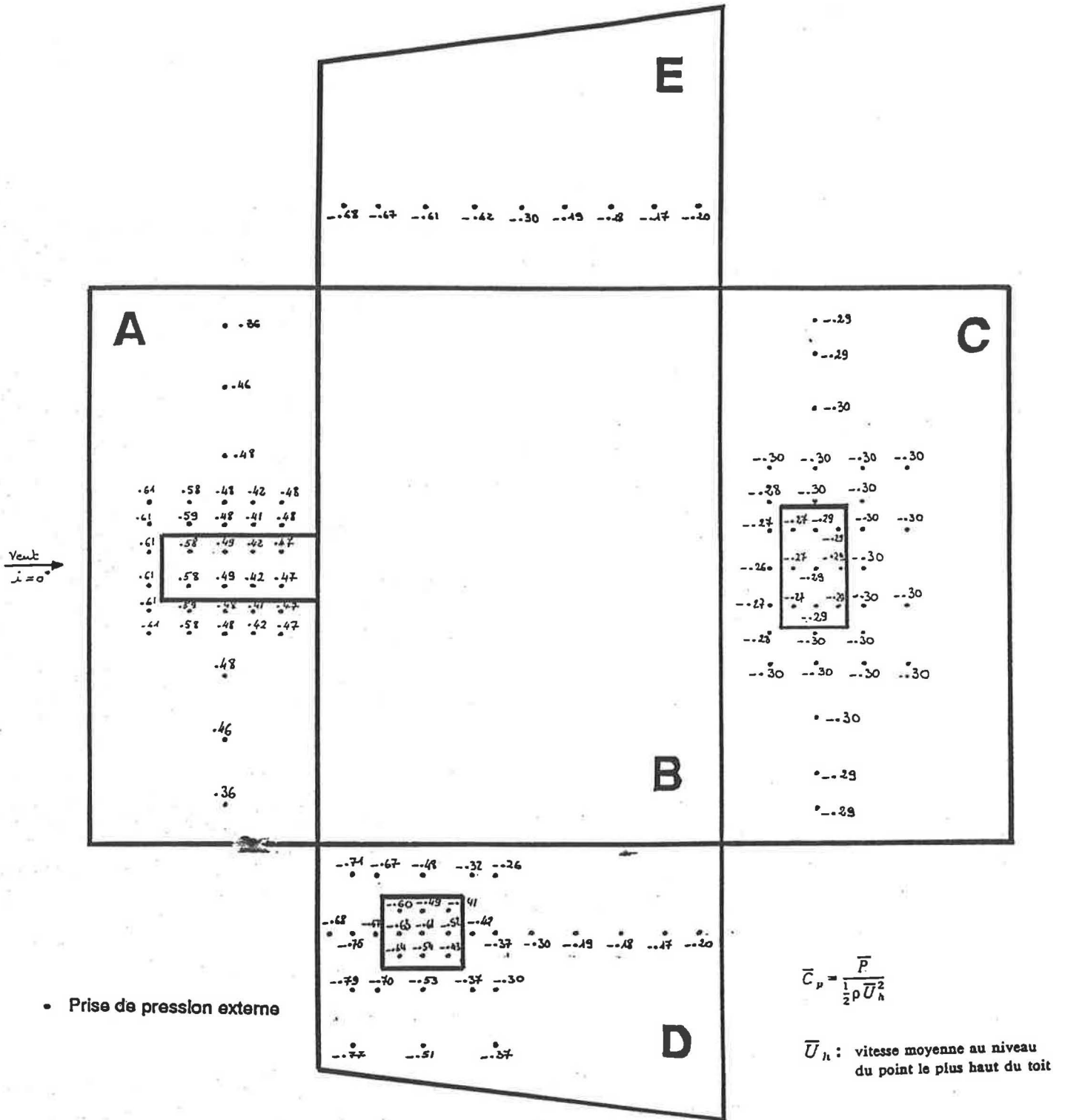


Figure A1 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 0°

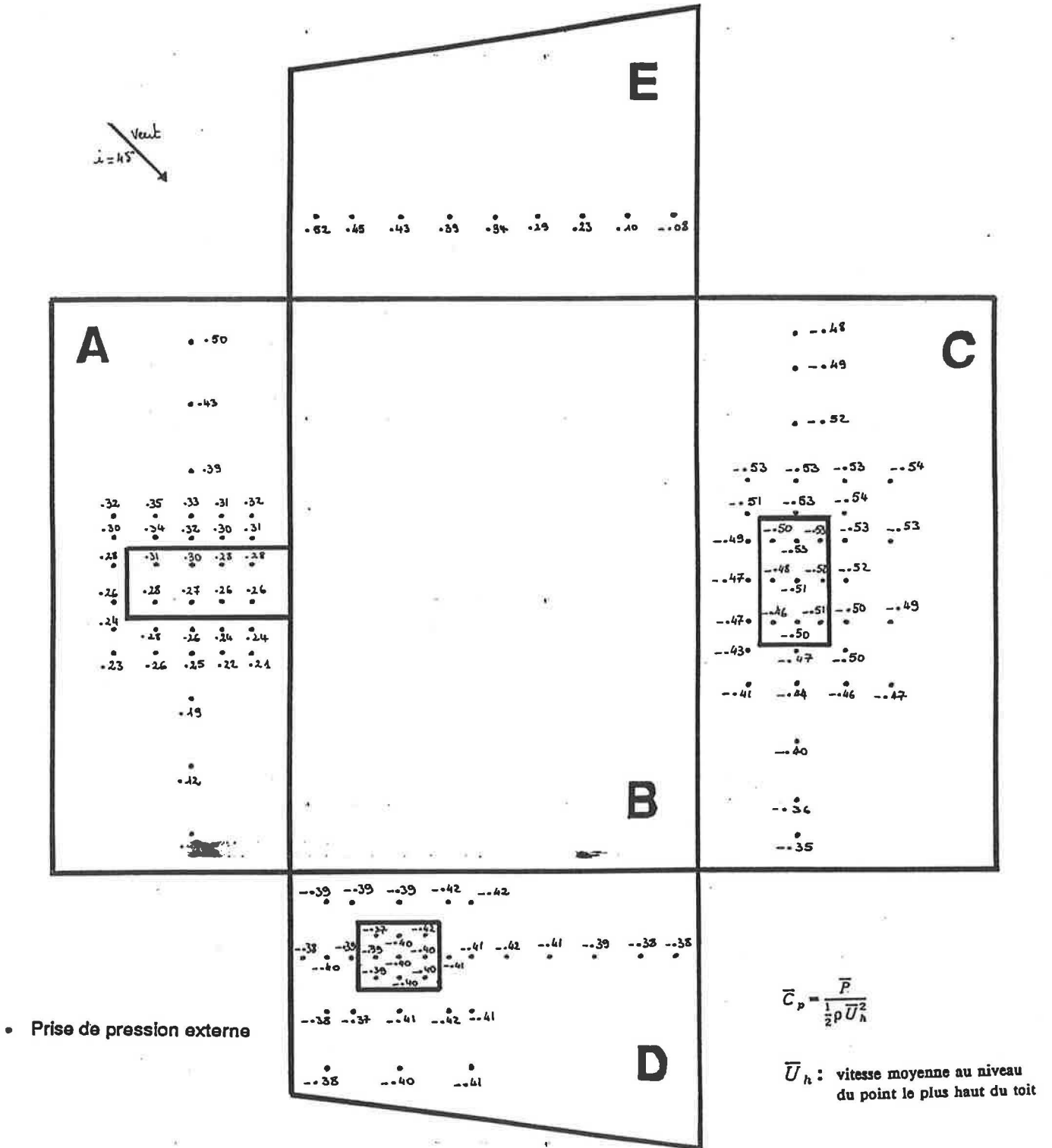


Figure A2 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 45°

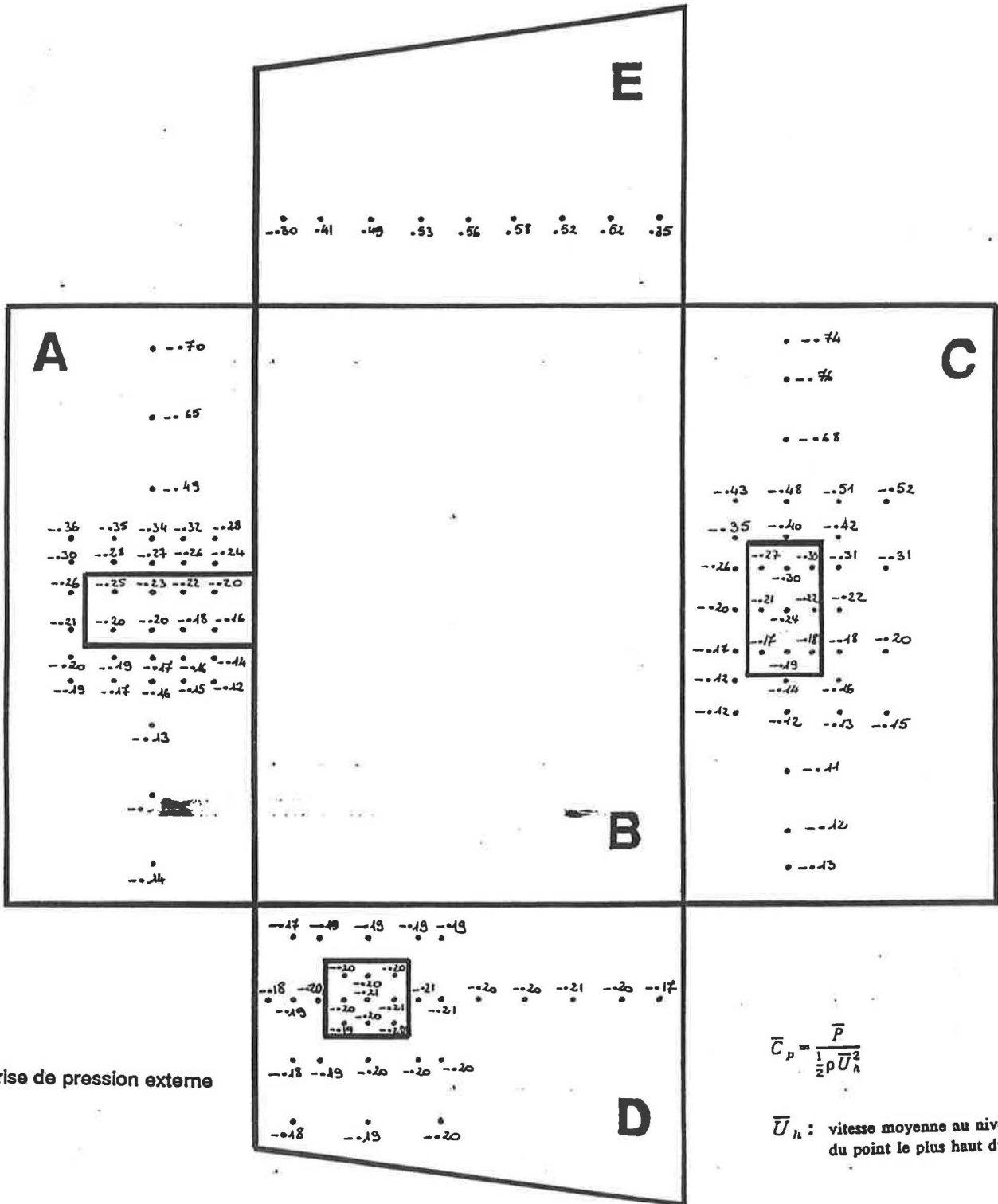


Figure A3 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 90°

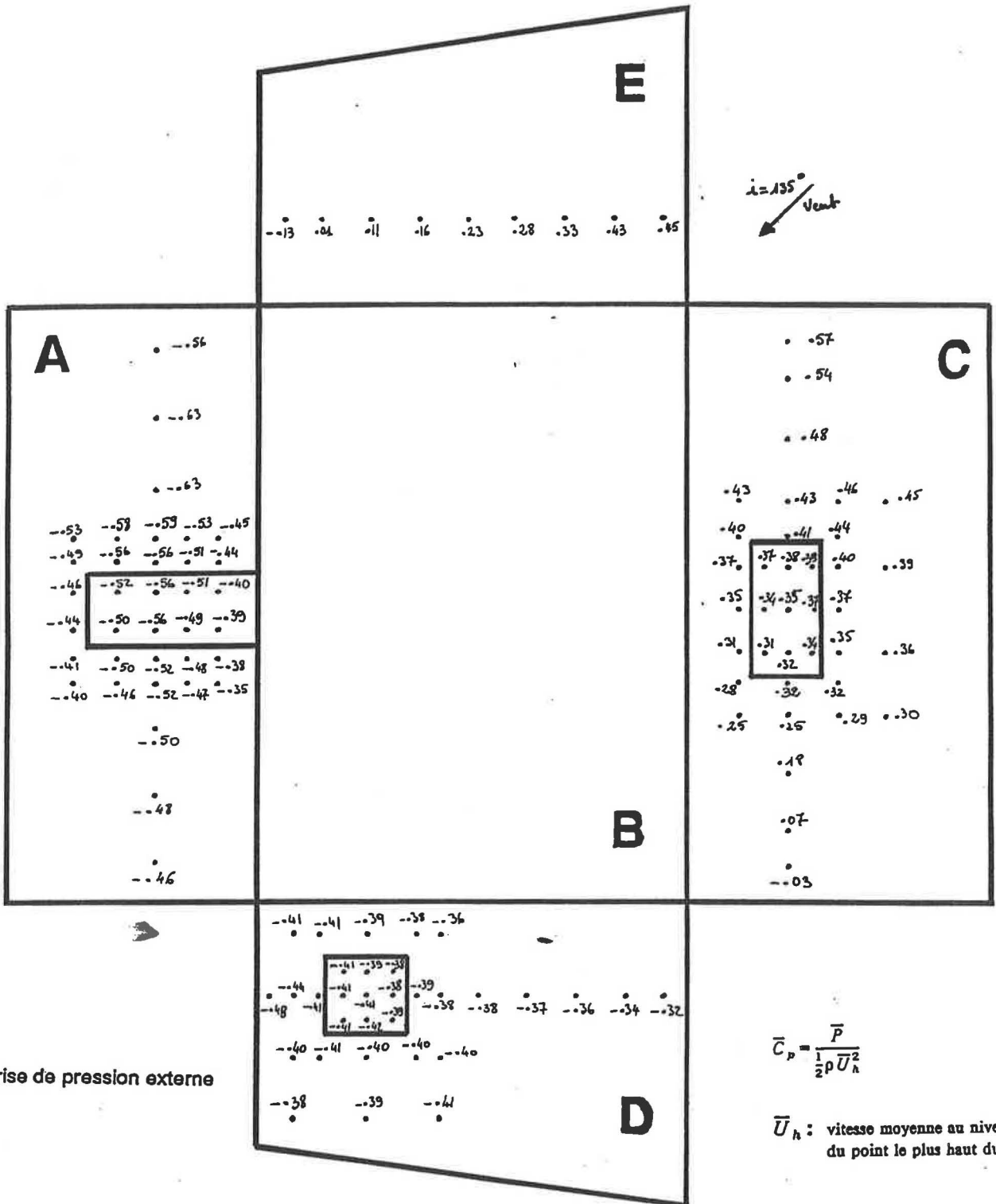


Figure A4 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 135°

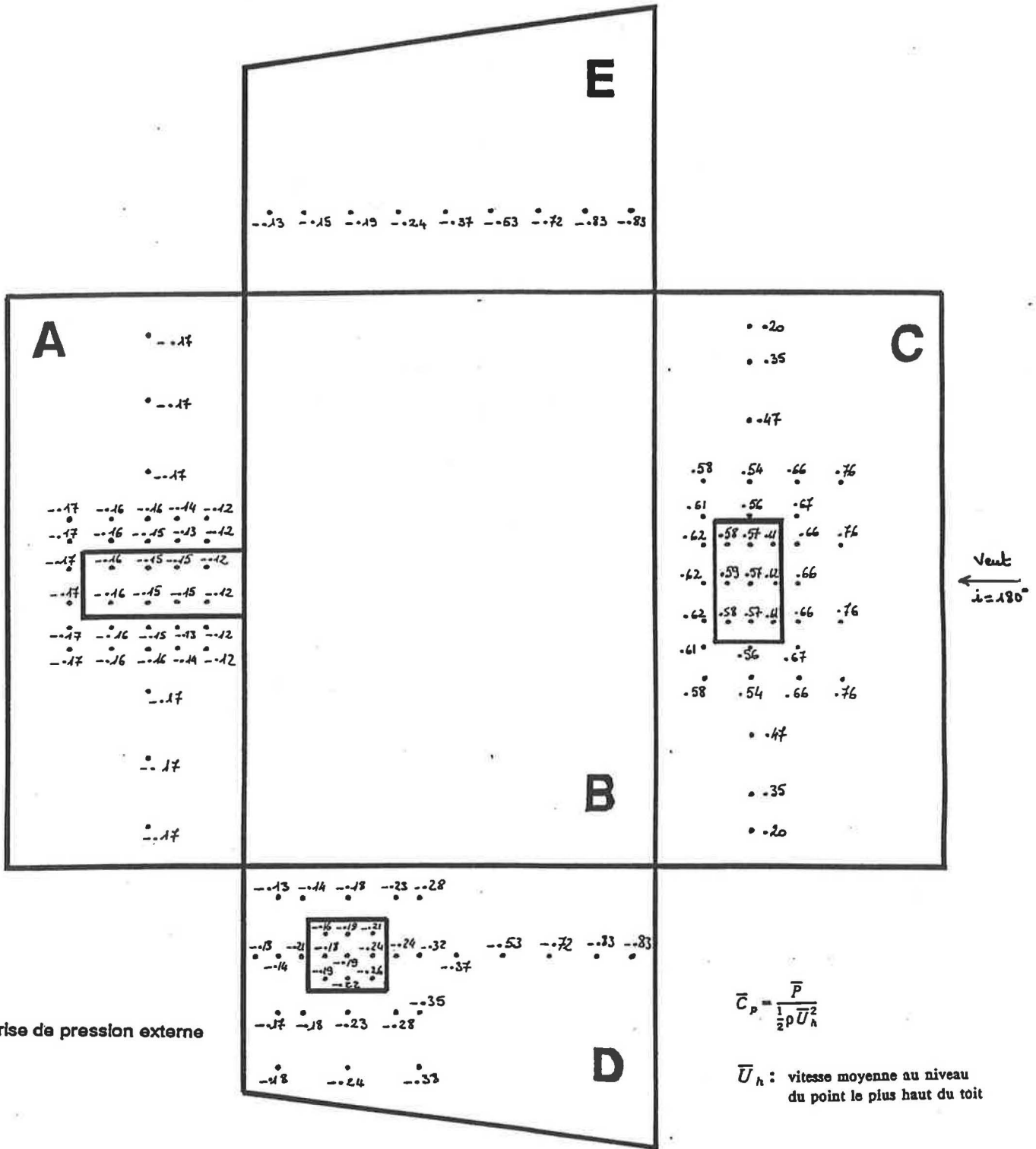


Figure A5 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 180°

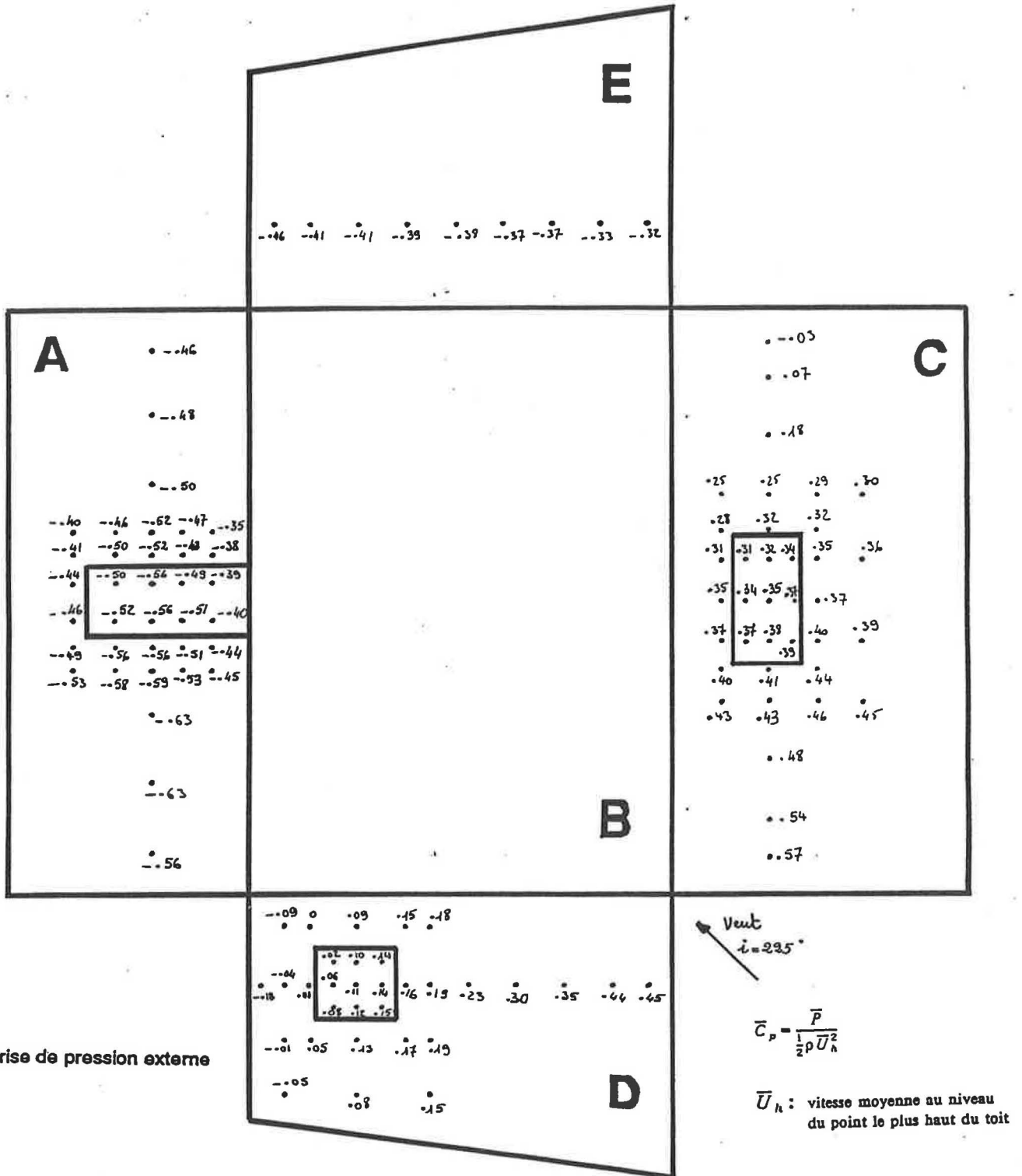


Figure A6 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 225°

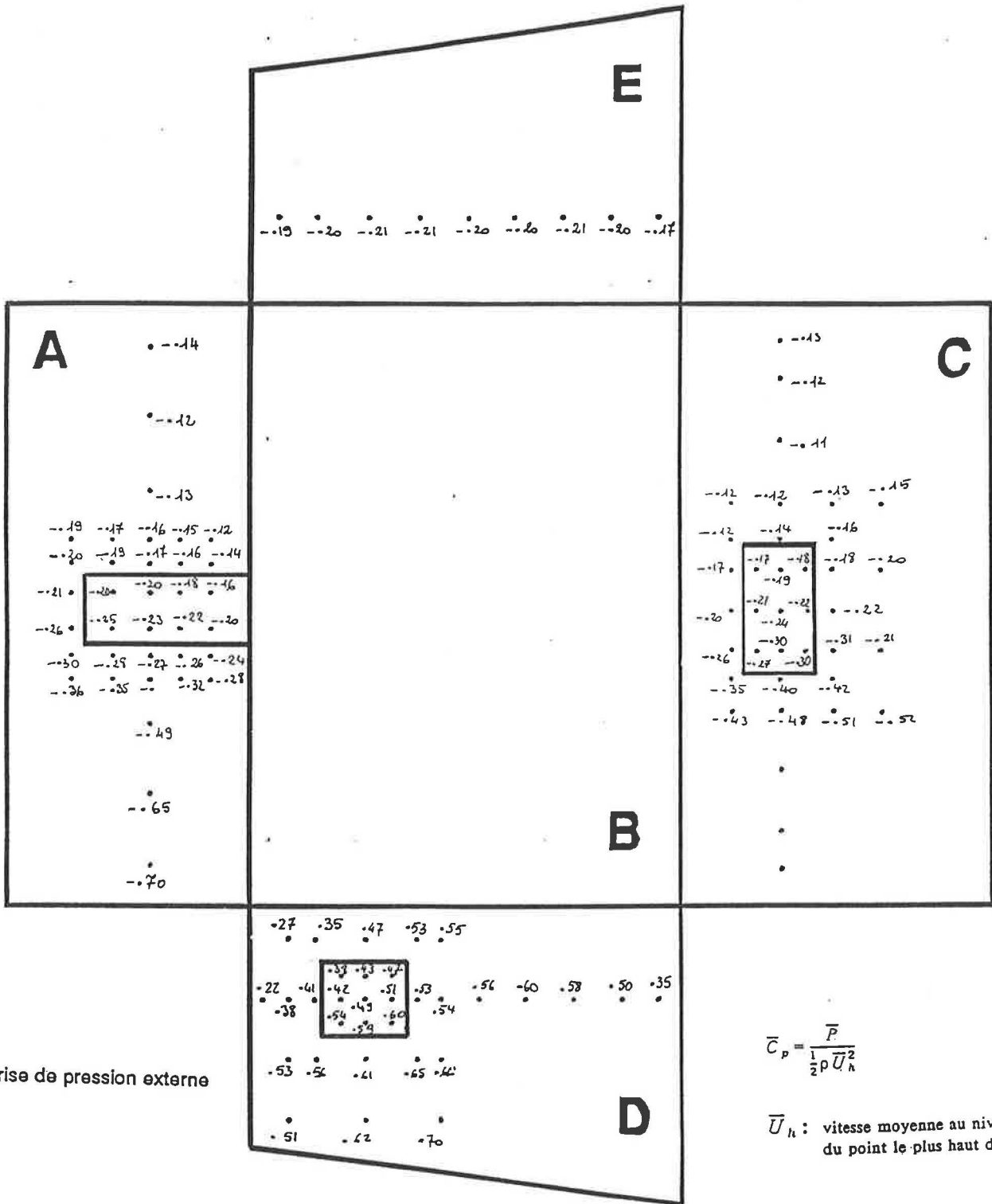


Figure A7 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 270°

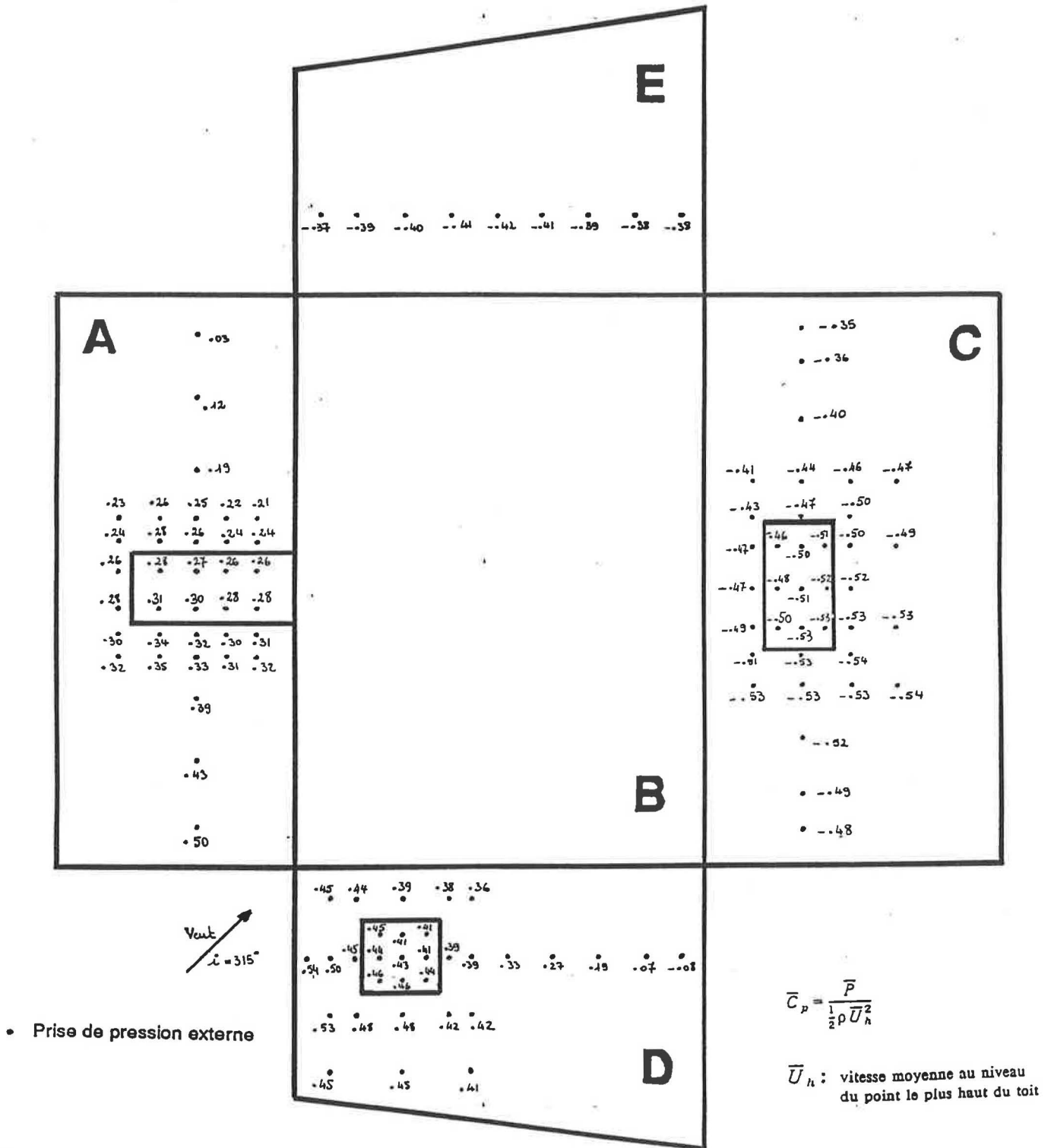


Figure A8 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 315°

**COEFFICIENTS DE PRESSION
DE LA CELLULE PORTE ET FENETRES FERMEES**

(SECONDE SERIE D'ESSAIS)

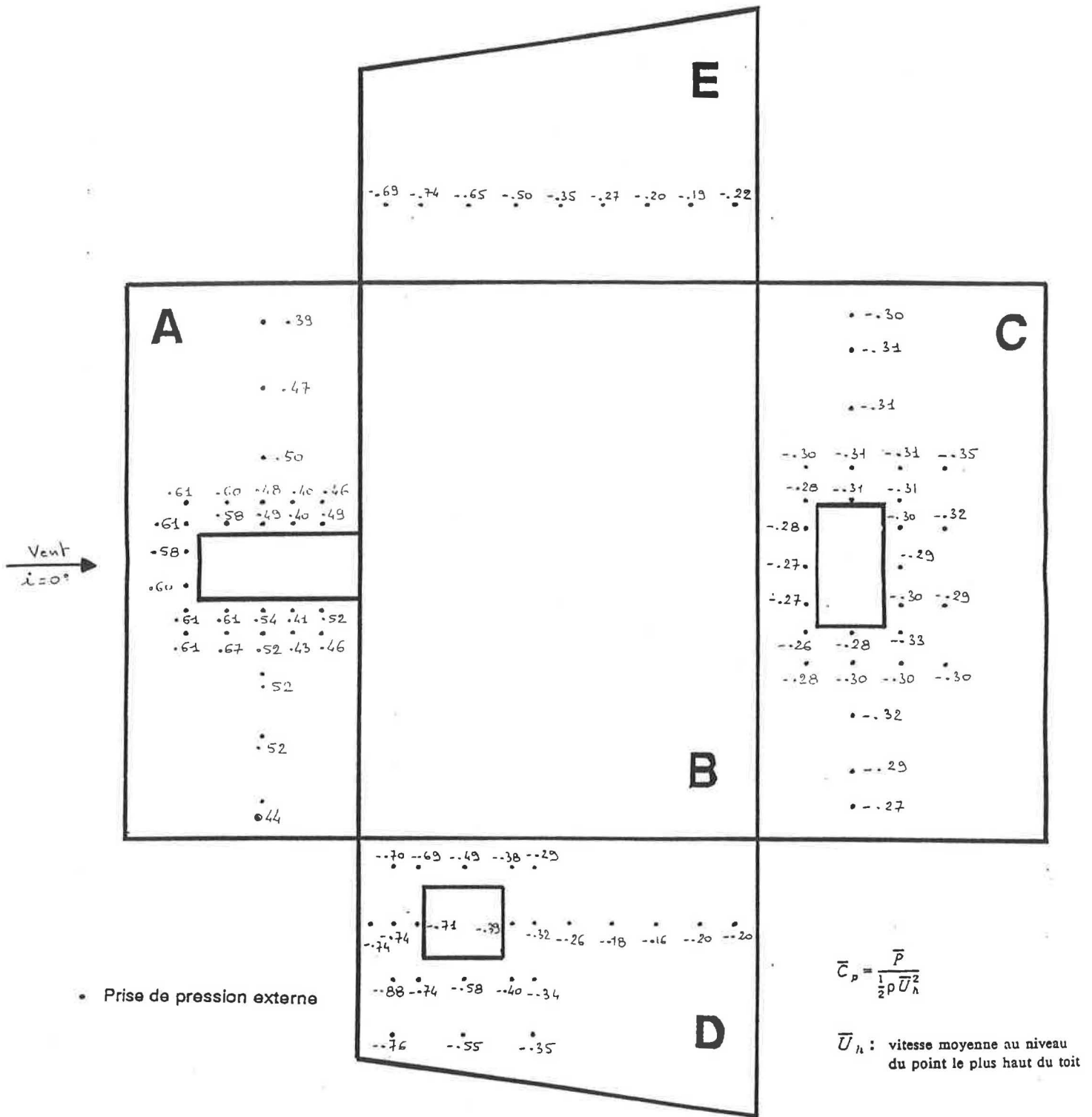


Figure A9 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 0°

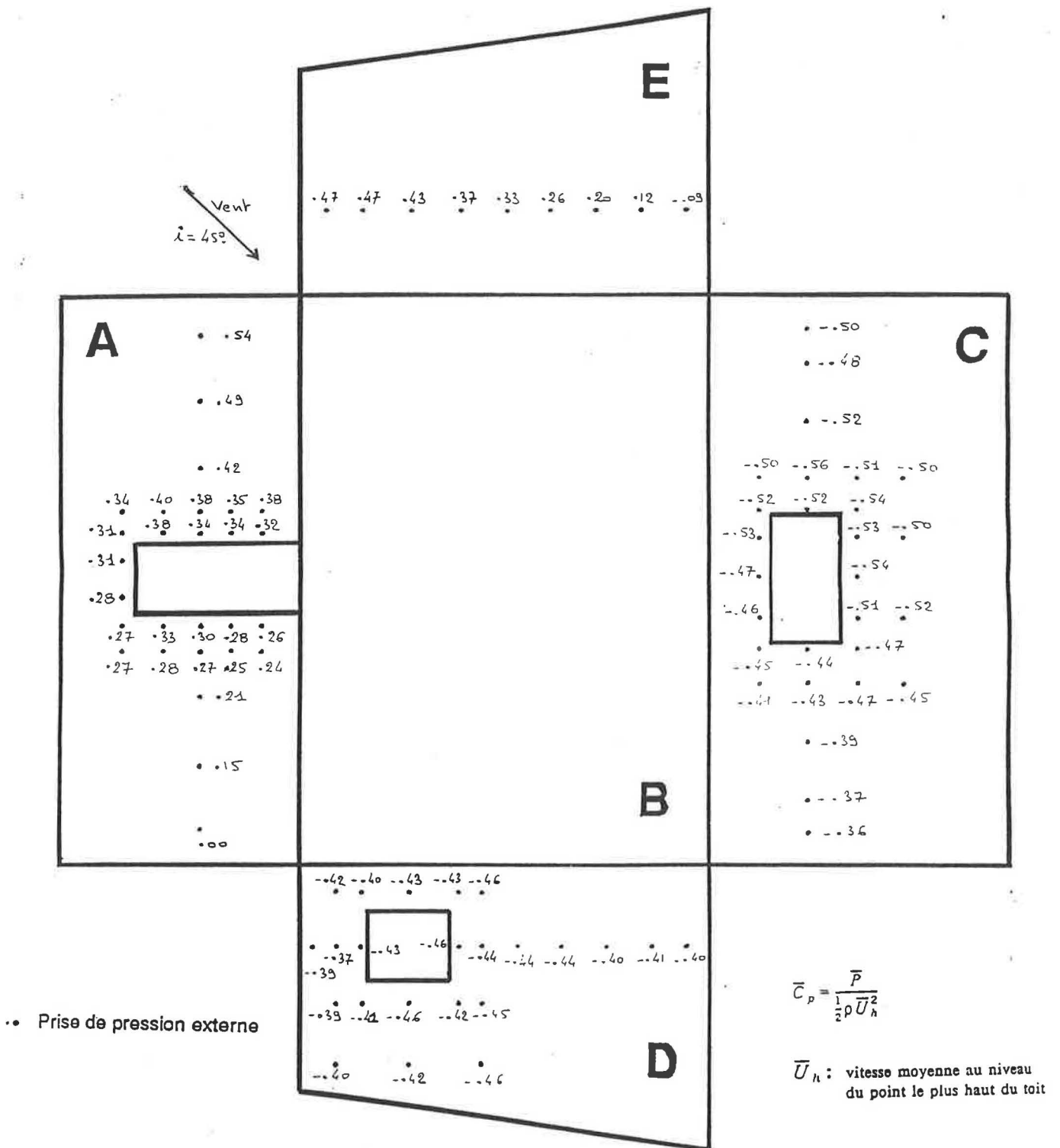


Figure A10 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 45°

Vent
i = 90°

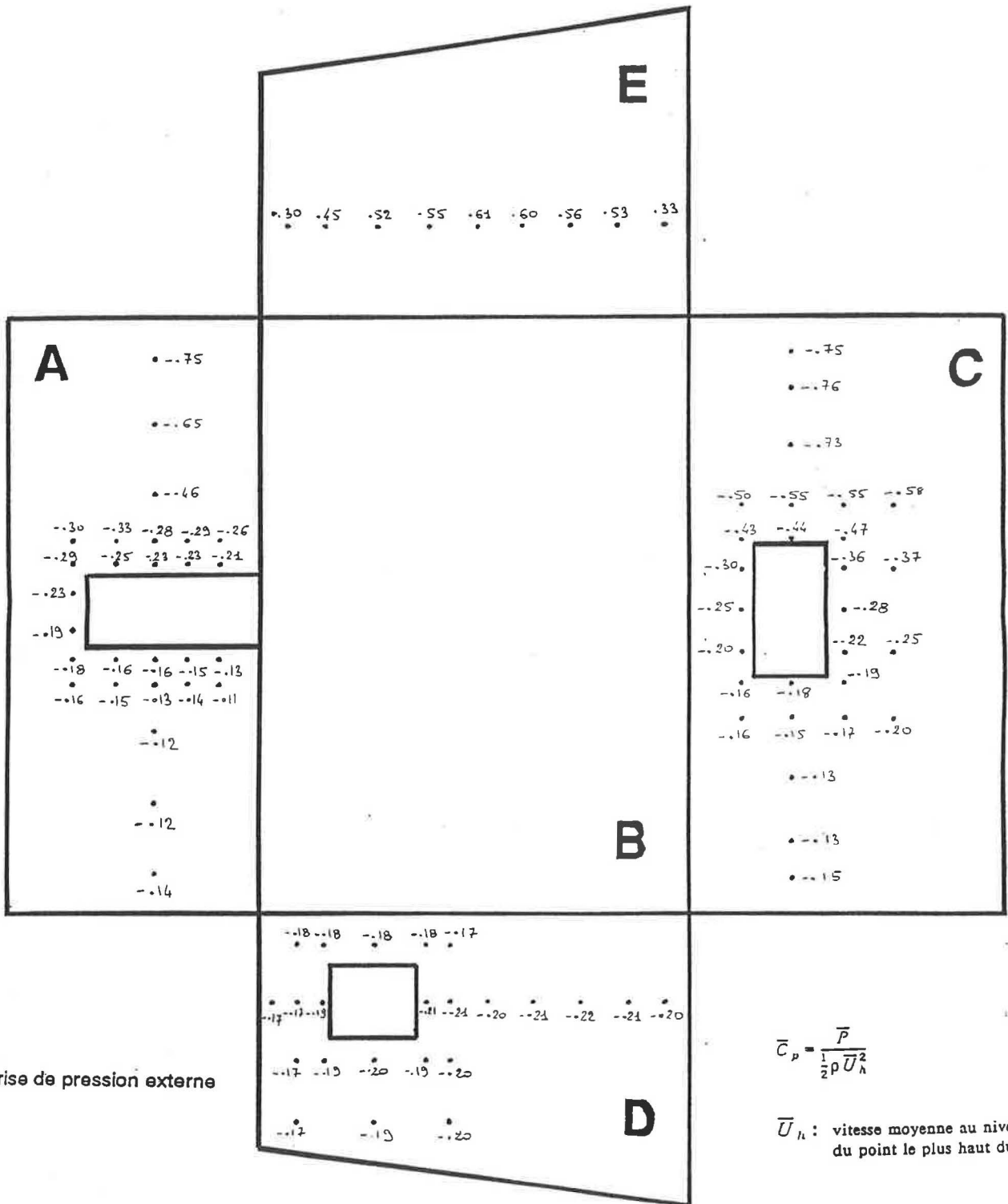


Figure A11 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 90°

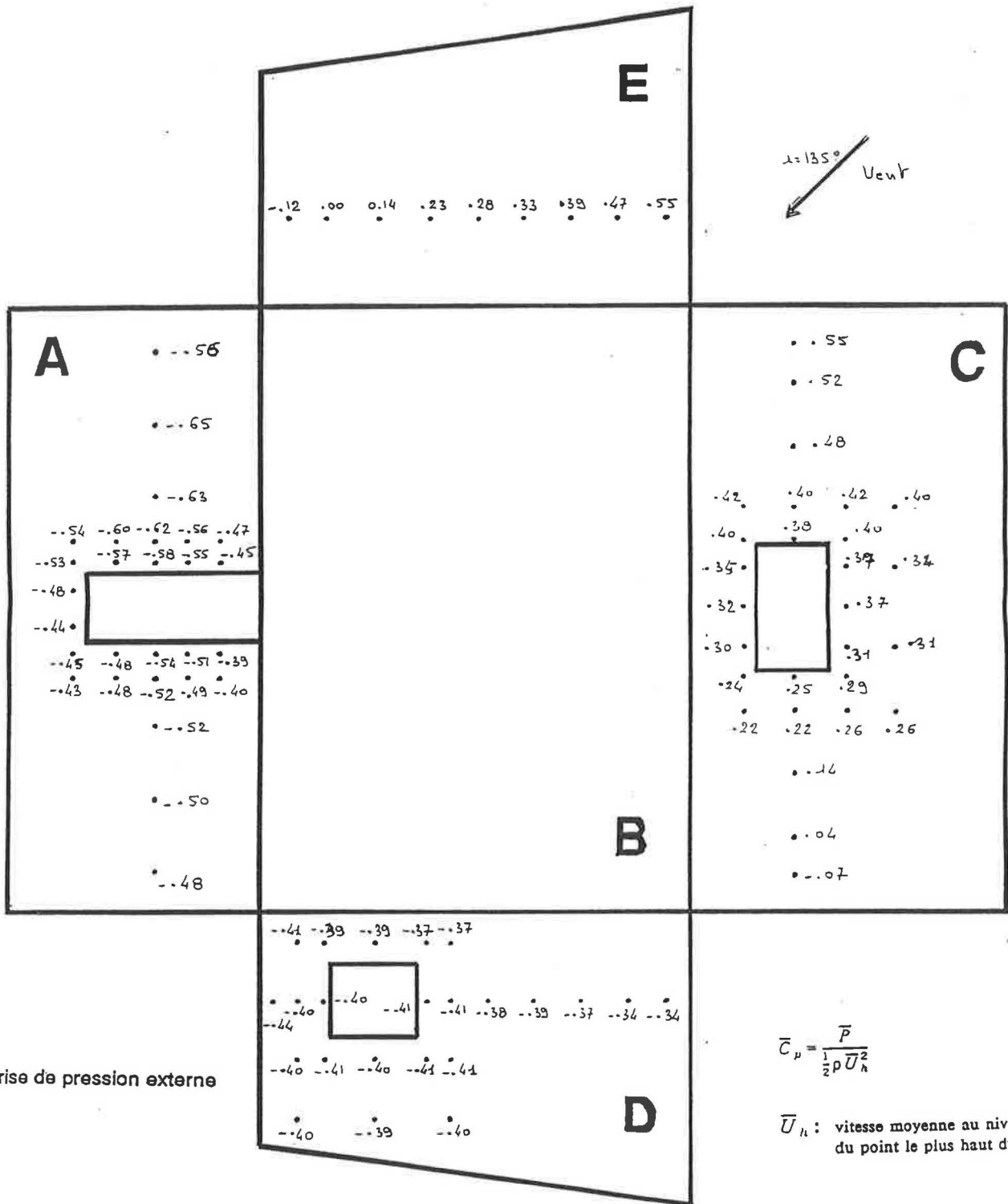


Figure A12 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 135°

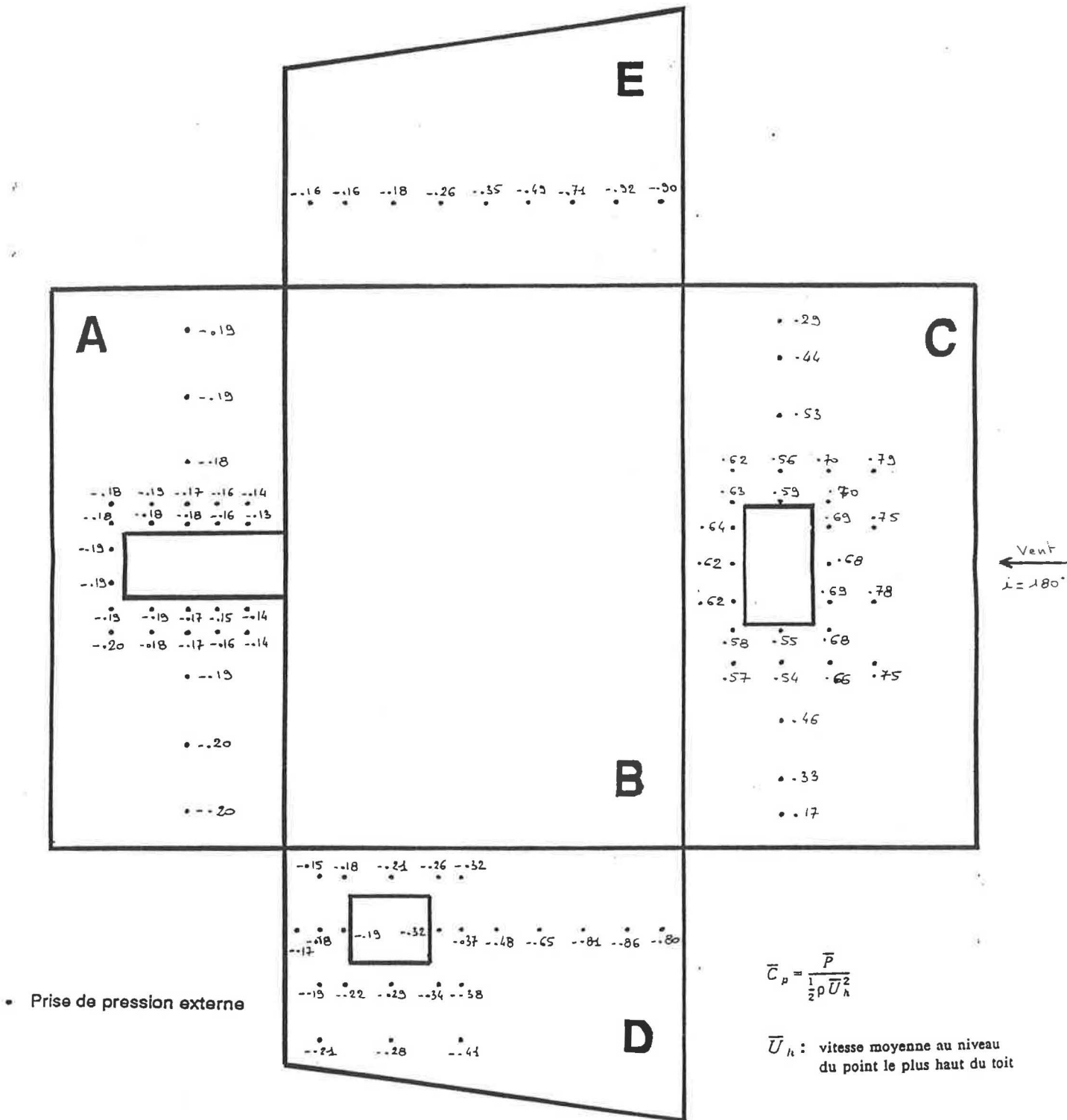


Figure A13 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 180°

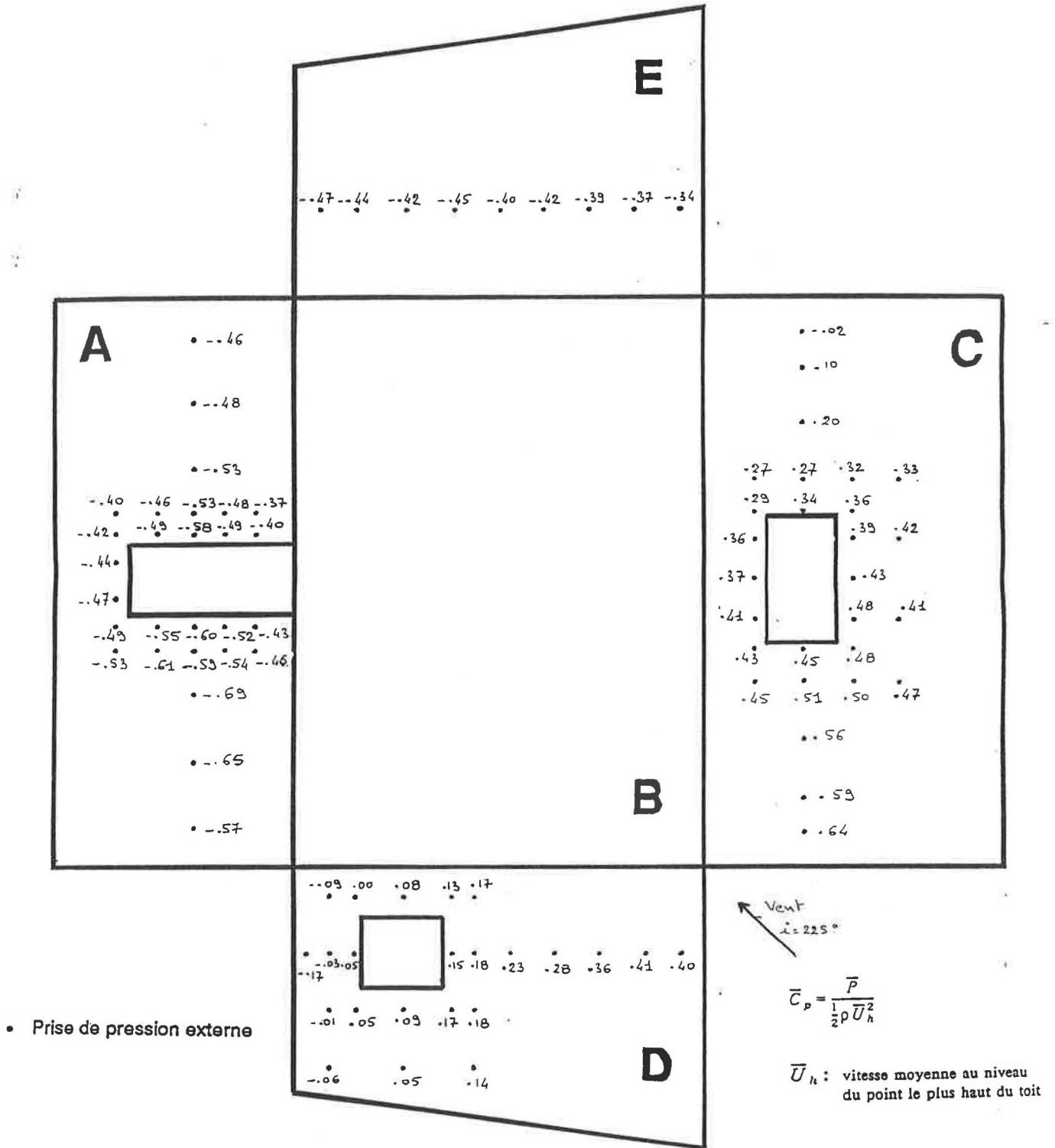


Figure A14 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 225°

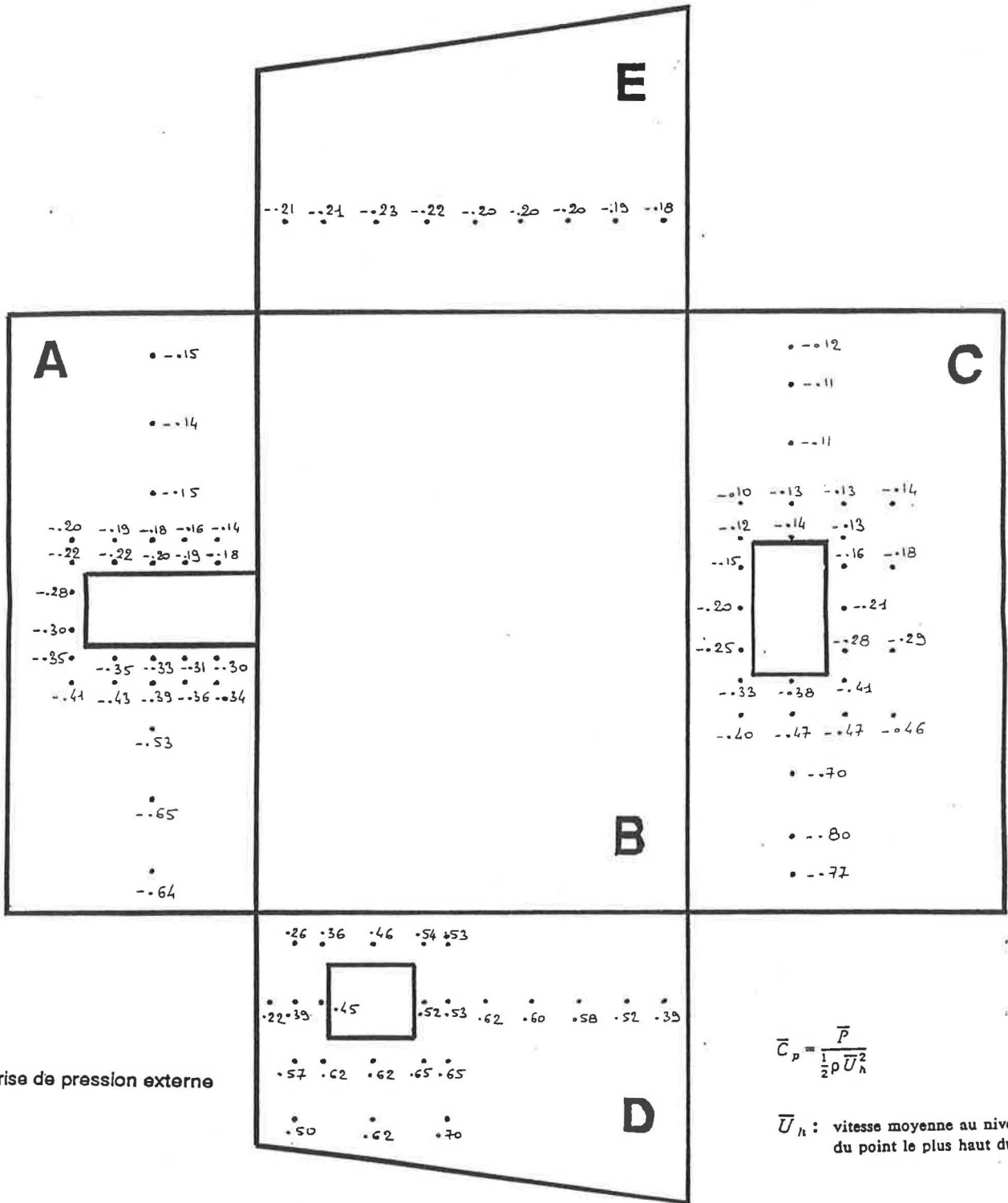


Figure A15 - Coefficients de pression de la cellule fermée
Incidence du vent 270°

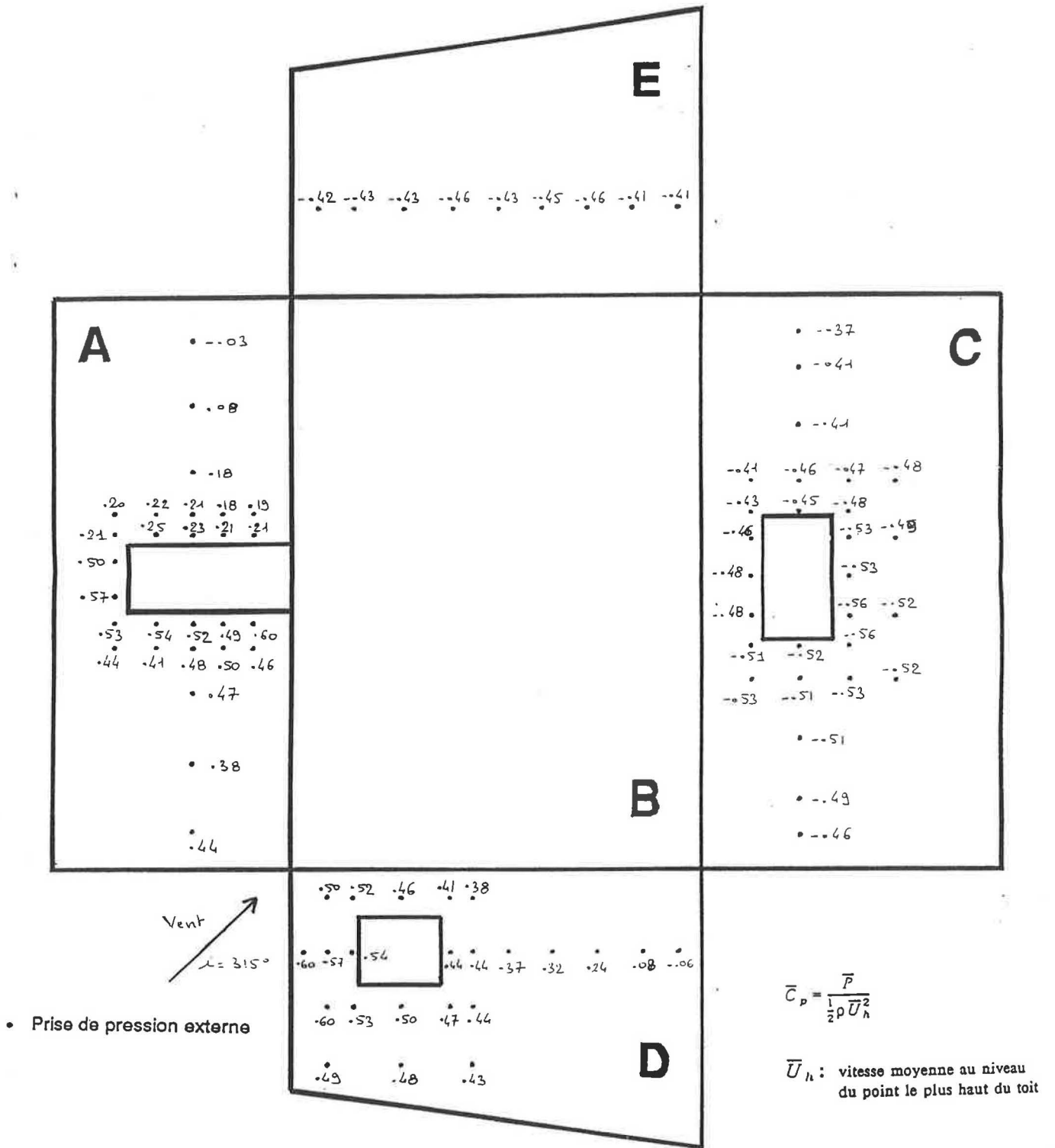


Figure A16 - Coefficients de pression de la cellule fermée
 Incidence du vent 315°

**COEFFICIENTS DE PRESSION
DE LA CELLULE PORTE ET FENETRES OUVERTES**

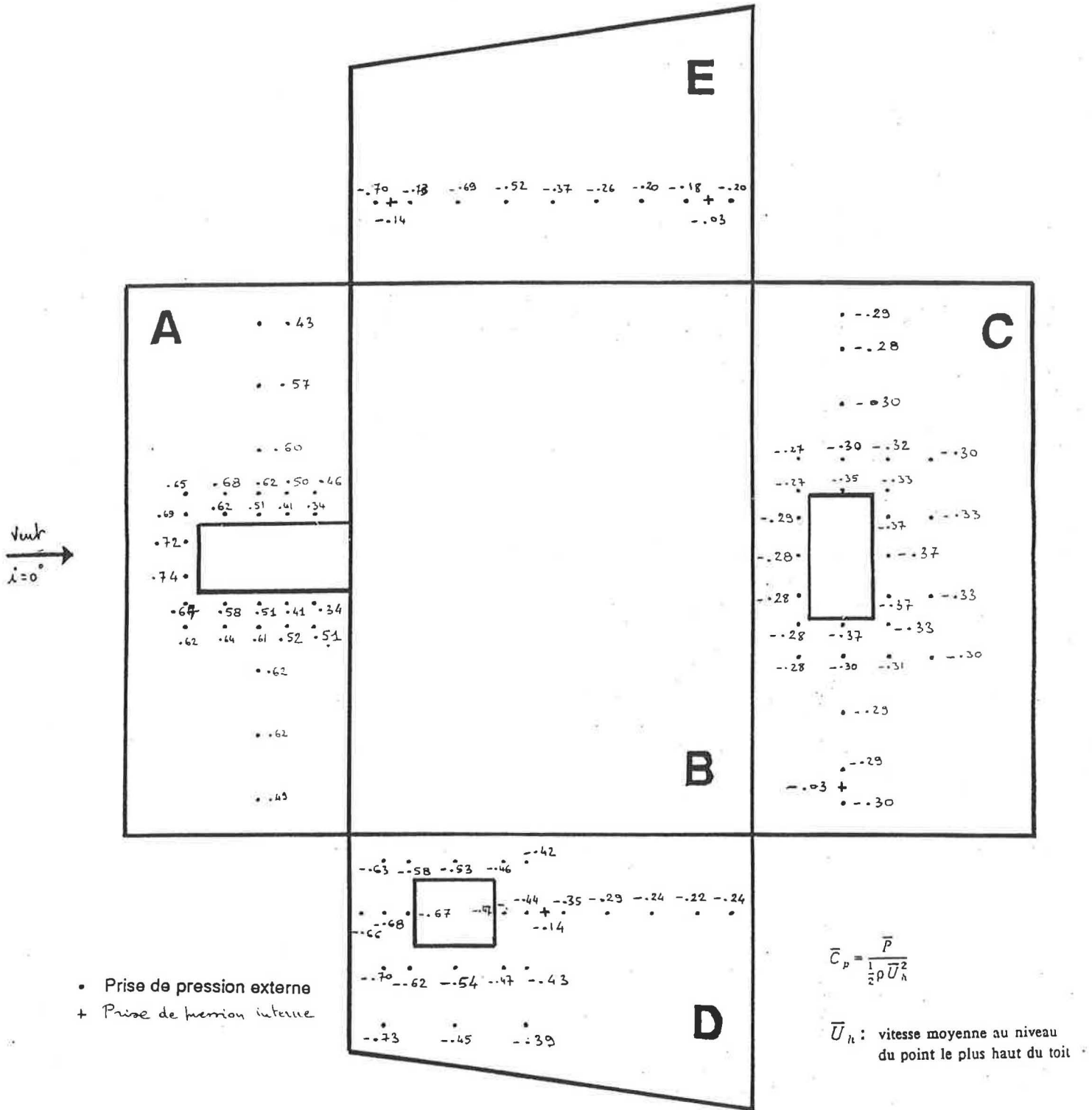


Figure A17 - Coefficients de pression de la cellule ouverte
Incidence du vent 0°

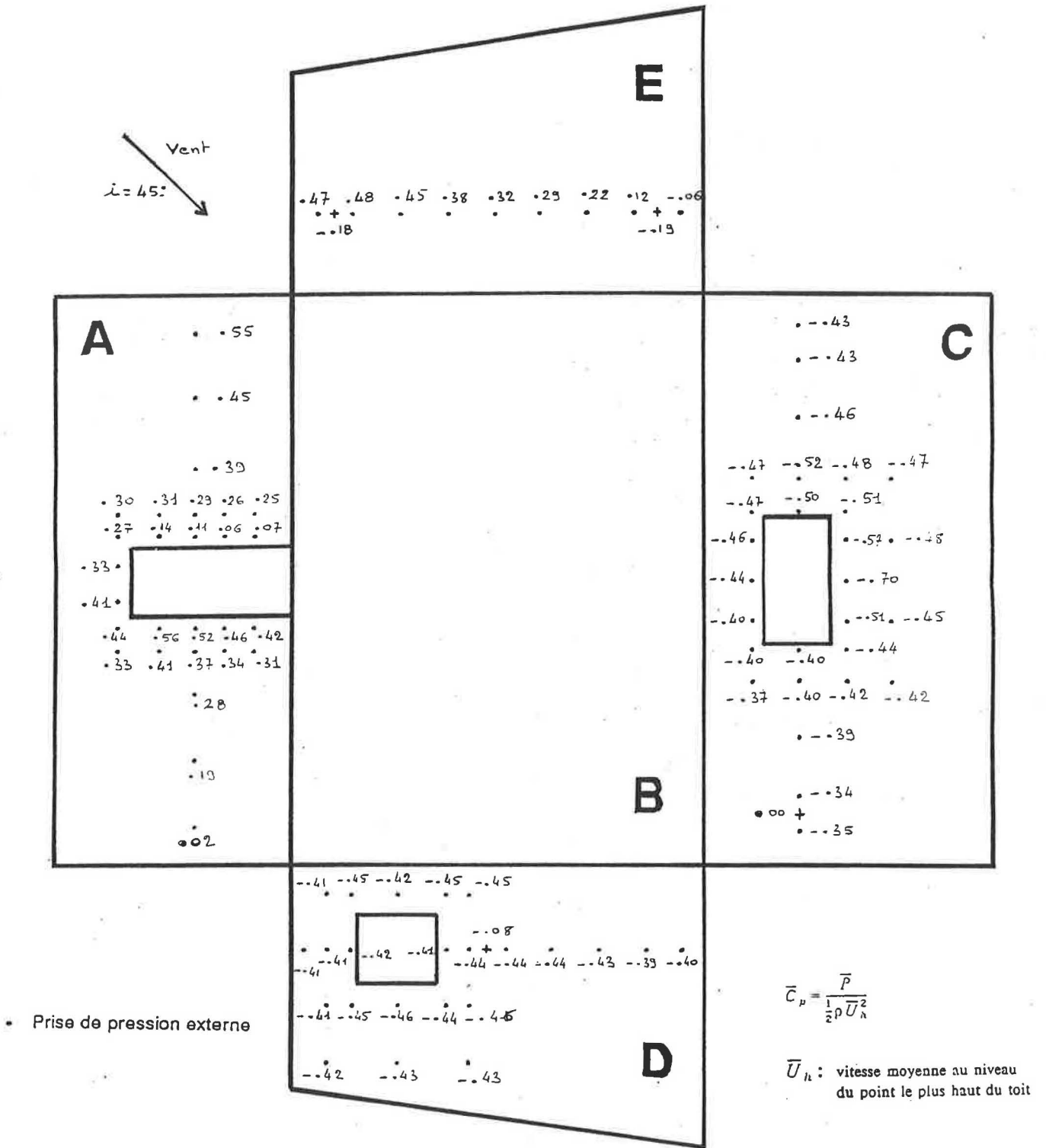


Figure A18 - Coefficients de pression de la cellule ouverte
Incidence du vent 45°

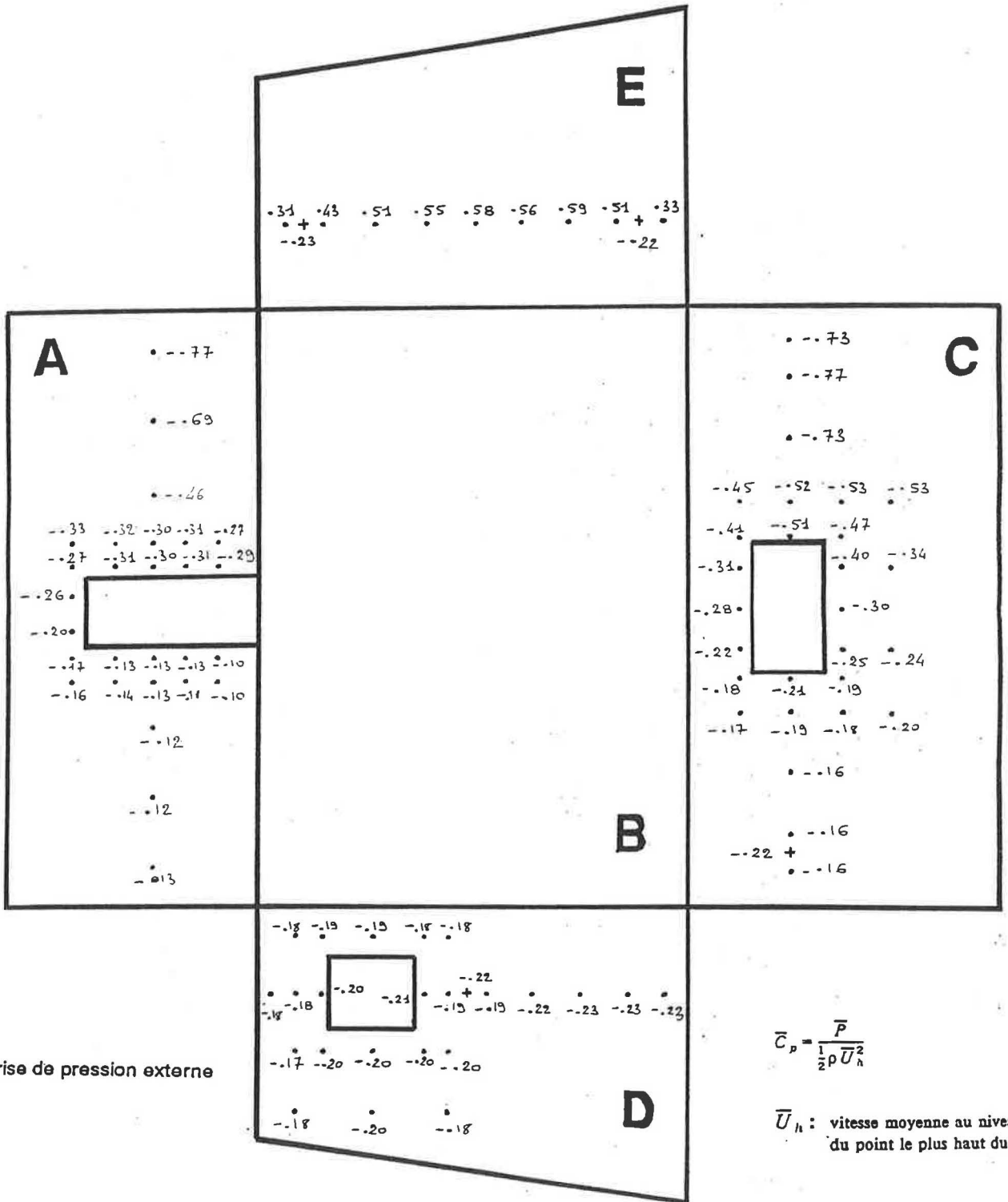
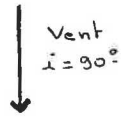


Figure A19 - Coefficients de pression de la cellule ouverte
Incidence du vent 90°

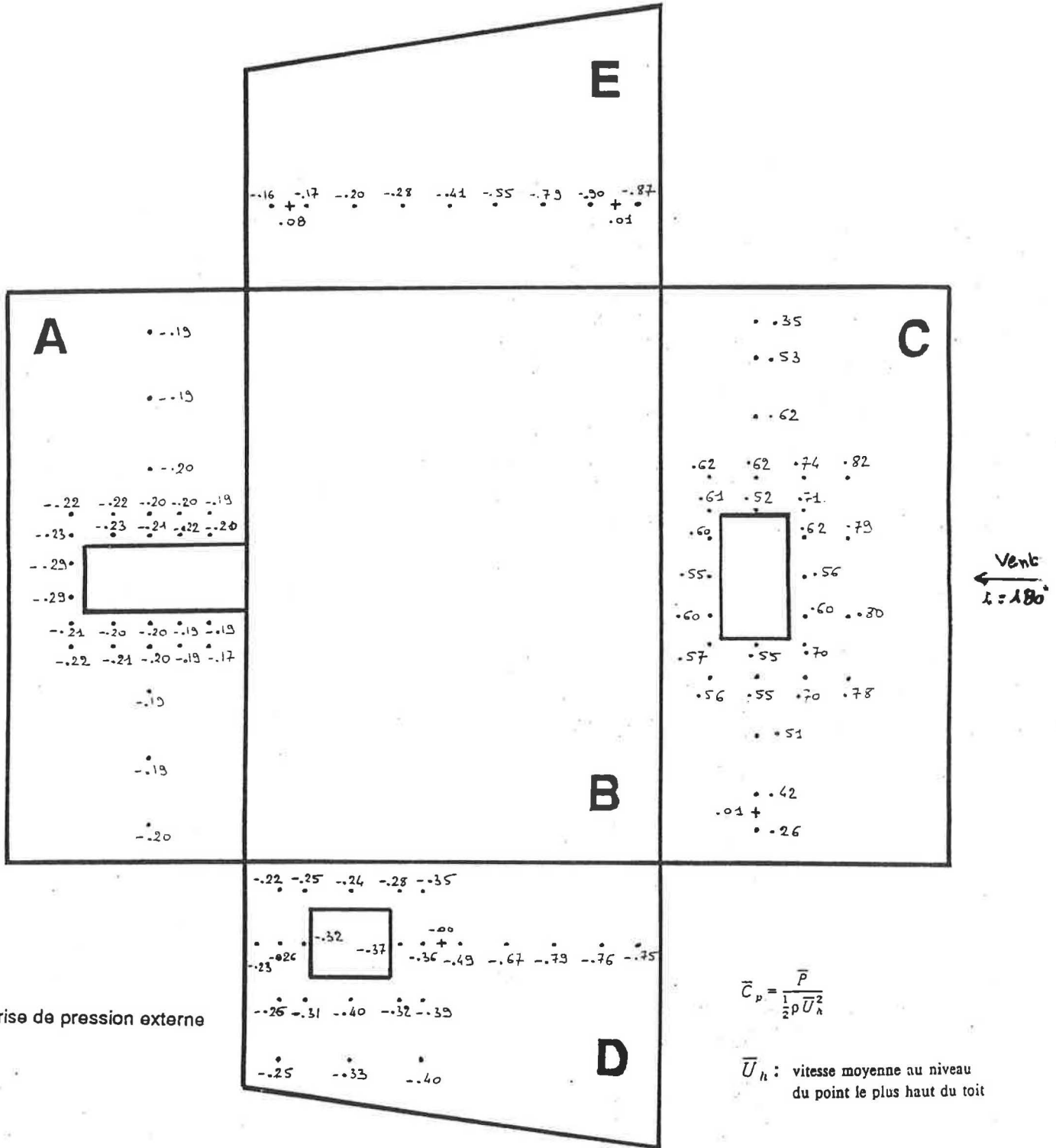


Figure A20 - Coefficients de pression de la cellule ouverte
Incidence du vent 180°

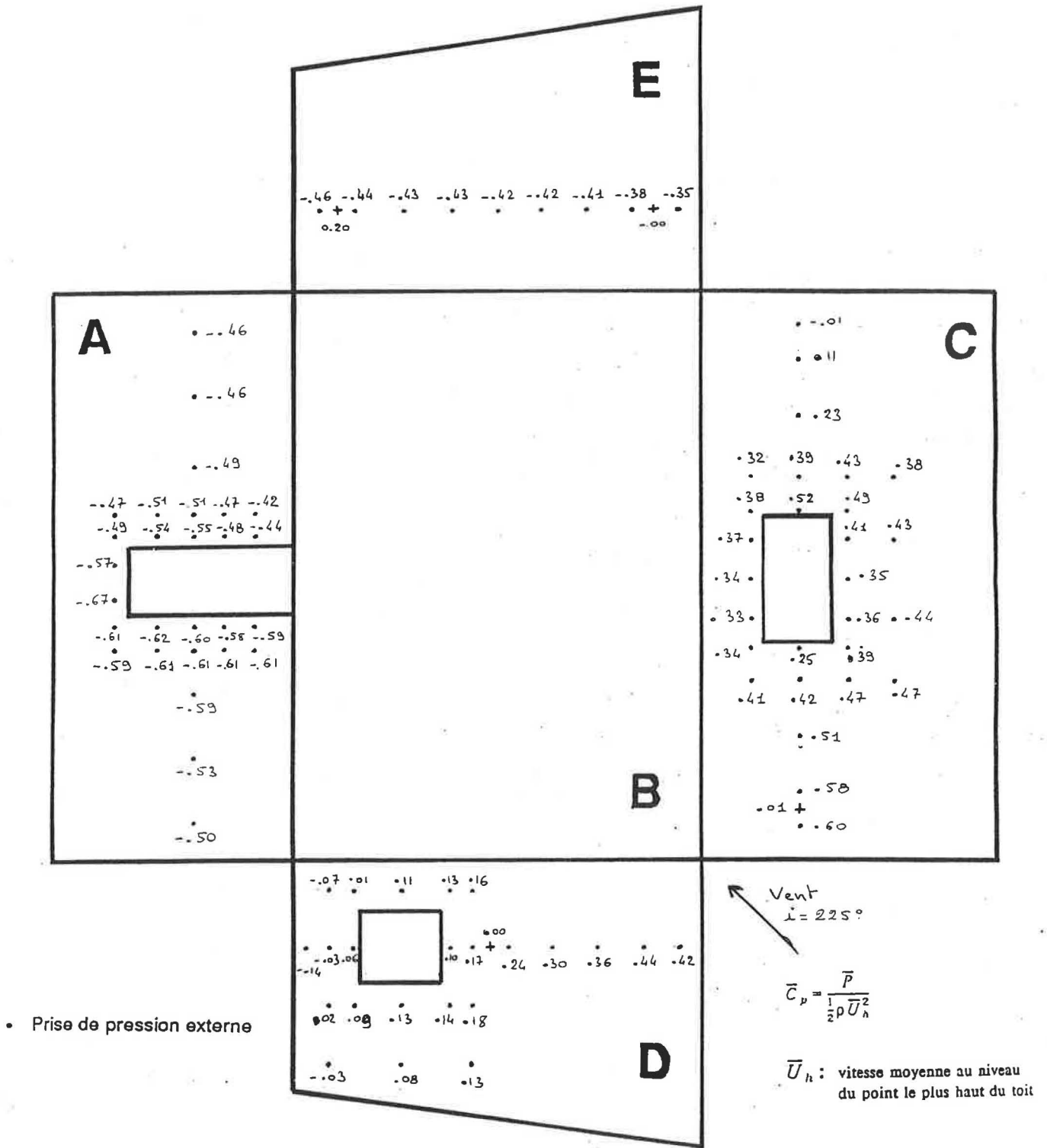


Figure A21 - Coefficients de pression de la cellule ouverte
 Incidence du vent 225°

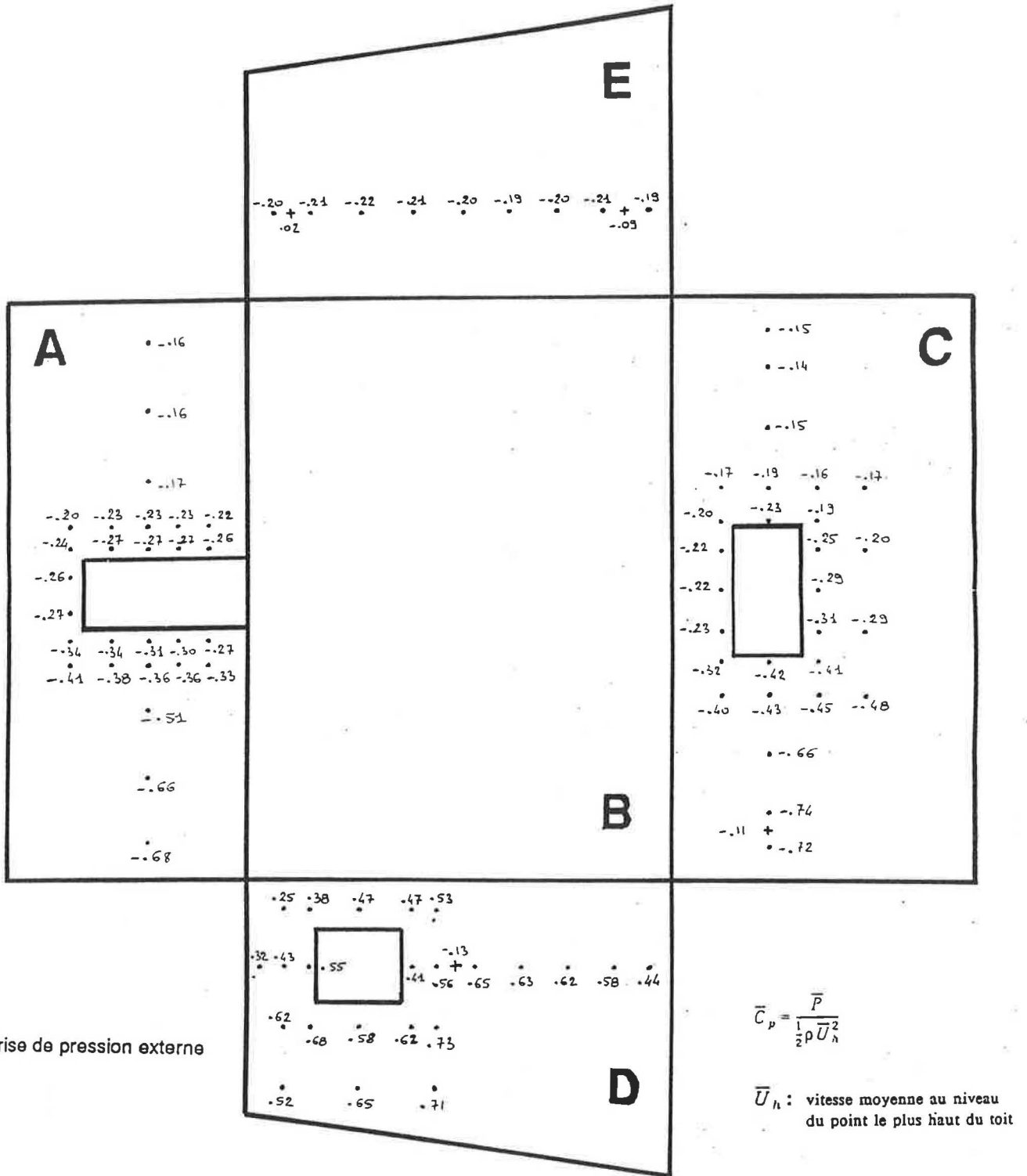


Figure A22 - Coefficients de pression de la cellule ouverte
Incidence du vent 270°

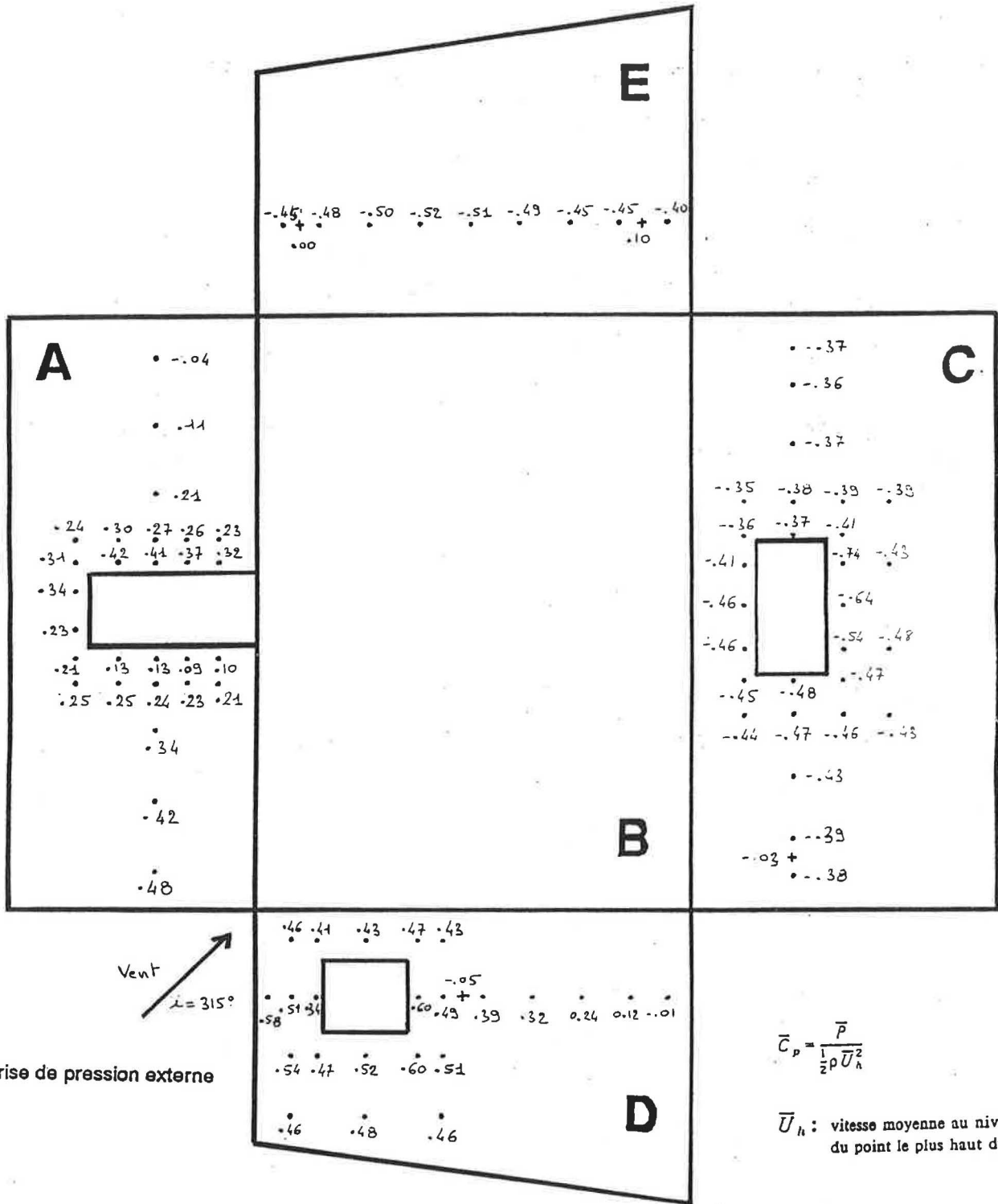


Figure A23 - Coefficients de pression de la cellule ouverte
 Incidence du vent 315°

SERVICE AERODYNAMIQUE ET ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE

Chef de Service : Jacques GANDEMER
Secrétaire : Catherine GUILBAUD

AERODYNAMIQUE DES STRUCTURES

Chef de Division :

Gérard GRILLAUD

Secrétaire :

Valérie TALBOT

Ingénieur :

Christian BARRE

Equipe technique :

Hervé BREBION
Pierre JAN
Henri MAILLE
Claude ORTION

ENVIRONNEMENT ET CHARGES AERODYNAMIQUES

Chef de Division :

Guy BARNAUD

Secrétaire :

Mylène RISGALLAH

Ingénieurs :

Camille SOLLIEC
James VILLAIN

Equipe technique :

Henri ALAIME
Jocelyne BERTHAUD
Joël DAHLER
Jacky MARY

Thésard :

Abdelwahab CHAIBI

CLIMATOLOGIE

Chef de Division :

Christian SACRE

Secrétaire :

Josiane GUERIN

Ingénieurs :

Didier DELAUNAY
Jean-Paul FLORI

Equipe technique :

Pierre JAN
Jean-Pierre LOCATELLI
Yves TETARD
Olivier VIAU

Thésards :

Sandrine LEVI-ALVARES
Cun-Xiao ZHANG

SOUFFLERIE CLIMATIQUE (cellule)

Jacques GANDEMER

Secrétaire :

Catherine GUILBAUD

Ingénieurs :

Marc DUFRESNE de
VIREL
Bernard LEMOULT
James VILLAIN

Equipe technique :

Jean-Pierre NOSSENT
Olivier VIAU