

RAPPORT DE RECHERCHE



Simulation de la pluie battante et de la distribution du mouillage sur les bâtiments



LA SCHL : AU CŒUR DE L'HABITATION

La Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) est l'organisme national responsable de l'habitation au Canada, et ce, depuis plus de 60 ans.

En collaboration avec d'autres intervenants du secteur de l'habitation, elle contribue à faire en sorte que le système canadien de logement demeure l'un des meilleurs du monde. La SCHL aide les Canadiens à accéder à un large éventail de logements durables, abordables et de qualité, favorisant ainsi la création de collectivités et de villes dynamiques et saines partout au pays.

Pour obtenir des renseignements supplémentaires, veuillez consulter le site Web de la SCHL à l'adresse suivante :
www.schl.ca

Vous pouvez aussi communiquer avec nous par téléphone, au 1-800-668-2642, ou par télécopieur, au 1-800-245-9274.

De l'extérieur du Canada : 613-748-2003 (téléphone);
613-748-2016 (télécopieur).

La Société canadienne d'hypothèques et de logement souscrit à la politique du gouvernement fédéral sur l'accès des personnes handicapées à l'information. Si vous désirez obtenir la présente publication sur des supports de substitution, composez le 1-800-668-2642.

**SIMULATION DE LA PLUIE BATTANTE
ET DE LA DISTRIBUTION DU
MOUILLAGE SUR LES BÂTIMENTS**

Auteurs

D. Inculet et D. Surry

**BLWTL-SS30-1994
Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory
University of Western Ontario**

**Novembre 1994
Édition revue et corrigée en février 1995**

Rapport définitif

**Partie d'une étude plus vaste sur le vent, la pluie
et l'enveloppe des bâtiments parrainée par la Société
canadienne d'hypothèques et de logement.**

**Rédigée pour
Jacques Rousseau
et
Pierre-Michel Busque
de la Division de l'Innovation dans l'habitation**

NOTE: ISSUED ALSO IN ENGLISH UNDER THE TITLE:

SIMULTATION OF WIND-DRIVEN RAIN AND WETTING PATTERNS ON BUILDINGS

DÉCHARGE

Cette étude fût conduite pour la Société Canadienne d'Hypothèques et de Logement aux termes de la partie IX de la Loi Nationale de l'Habitation. Les analyses, interprétations et recommandations sont celles du consultant et ne représente pas nécessairement les opinions de la Société Canadienne d'Hypothèque et de Logement et de ses divisions qui ont aidé à la réalisation de cette étude.

MANDAT DE LA SCHL

La Société canadienne d'hypothèques et de logement, l'organisme du logement du gouvernement du Canada, a pour mandat d'appliquer la Loi nationale sur l'habitation.

Cette loi a pour objet d'aider à améliorer les conditions d'habitation et de vie au Canada. C'est pourquoi la Société s'intéresse à tout ce qui concerne l'habitation, l'expansion et le développement urbains.

Aux termes de la Partie IX de la Loi, le gouvernement du Canada autorise la SCHL à affecter des capitaux à des recherches sur les aspects socio-économiques et techniques du logement et des domaines connexes, et à publier et diffuser les résultats de ces recherches. La SCHL a donc une obligation légale de veiller à ce que tout renseignement de nature à améliorer les conditions d'habitation et de vie soit connu du plus grand nombre possible de personnes ou de groupes de personnes.

La présente publication est l'un des nombreux moyens d'information que la SCHL a produits avec l'aide de capitaux du gouvernement fédéral.

TABLE DES MATIÈRES

SYNTHÈSE	1
REMERCIEMENTS	2
1 Modélisation de la pluie battante dans le tunnel aérodynamique	3
1.1 Modélisation du vent	3
1.2 Mise à l'échelle de la taille des gouttes de pluie	3
1.2.1 Paramètres de mise à l'échelle	3
1.2.2 Répartition de la taille des gouttes à l'échelle du modèle cible	4
1.3 Simulation de la pluie au moyen de buses	6
1.3.1 Choix des buses	6
1.3.2 Étalonnage d'une buse	6
1.3.3 Conception de la batterie de buses et répartitions résultantes de la taille des gouttes	8
2 Distributions du mouillage sur les bâtiments	9
2.1 Bâtiments d'essai	9
2.1.1 Phase I	9
2.1.2 Phase II	10
2.2 Méthode d'essai	10
2.3 Méthode d'analyse	11
2.4 Résultats	11
2.4.1 Phase I — analyse visuelle	11
2.4.2 Phase I — analyse quantitative	13
2.4.3 Phase II - analyse visuelle	15
3 Conclusions	17
RÉFÉRENCES	20
FIGURES	
TABLEAUX	
ANNEXE A—TECHNIQUES DE MESURE DE LA TAILLE DES GOUTTES	
ANNEXE B—RÉPARTITION DE LA TAILLE DES GOUTTES ISSUES DES BUSES À L'ÉCHELLE DU MODÈLE ET GRANDEUR NATURE	
ANNEXE C—PHOTOGRAPHIES DES DISTRIBUTIONS DE MOUILLAGE DE LA PHASE I	
ANNEXE D—PHOTOGRAPHIES DES DISTRIBUTIONS DE MOUILLAGE DE LA PHASE II	
ANNEXE E—VITESSES TERMINALES DES GOUTTES D'EAU	
ANNEXE F LES EFFETS DE LA PLUIE SUR LE VENT	

SYNTHÈSE

Désireuse de trouver des méthodes permettant de réduire la pénétration de la pluie dans les immeubles résidentiels de grande hauteur et d'accroître la résistance des types de construction, la Société canadienne d'hypothèques et de logement a parrainé une recherche portant sur la modélisation de la pluie battante. Le projet se composait des volets suivants :

- 1) une démonstration de la possibilité de modéliser matériellement la pluie battante dans un tunnel aérodynamique et l'interaction de celle-ci avec les bâtiments;
- 2) une étude de l'effet de la direction et de la vitesse du vent sur la distribution du mouillage à l'aide d'un modèle qui permettra des comparaisons avec l'expérience acquise sur le terrain;
- 3) une exploration de l'effet de la hauteur et des caractéristiques architecturales des bâtiments sur la distribution du mouillage.

L'expérience a eu lieu dans le tunnel aérodynamique de couche limite numéro deux de l'University of Western Ontario. La pluie a été simulée au moyen d'une batterie de neuf buses placées dans la veine à basse vitesse, laquelle fait 4 mètres de hauteur sur 5 mètres de largeur. Une répartition cible de la taille des gouttelettes a été obtenue au moyen de données publiées sur la pluie grandeur nature et d'une mise à l'échelle par le nombre de Froude. L'échelle de longueur utilisée était de 1/64, ce qui donnait des échelles de vitesse de vent et de temps de 1/8. La mise à l'échelle utilisée était un bon compromis viable entre la modélisation du vent et celle de la pluie.

Pour chaque vitesse de vent, il a fallu étalonner la taille des gouttelettes sur le lieu de l'expérience afin de pouvoir disposer les buses. Trois vitesses de vent ont été essayées, toutes reproduisant une exposition de type banlieue. Les répartitions de la taille des gouttelettes obtenues sur place ont été légèrement déformées dans le sens d'une plus grande taille, mais l'effet a été jugé négligeable.

La distribution du mouillage sur les faces des bâtiments a été enregistrée de façon visible sur du papier hydrosensible virant immédiatement du jaune au bleu au contact de l'eau. Le rapport contient des photographies des résultats obtenus. De plus, la taille des taches laissées par les gouttelettes sur le papier a permis de faire une analyse quantitative. Le facteur d'intensité locale (taux de mouillage par rapport au taux de précipitation) a été calculé pour plusieurs endroits.

Nous avons observé que la distribution du mouillage était « classique » sur la face exposée au vent et que le coin supérieur était le plus mouillé, suivi par les bords supérieur et latéraux. Dans les coins supérieurs, les facteurs d'intensité locale variaient de 0,15 à 2,5 environ selon les cas, et les coins recevaient de 2 à 50 fois plus de pluie que la région centrale de la face. Le mur latéral reste relativement sec. Avec un vent oblique, le mouillage peut être encore important le long du bord supérieur, du bord amont et parfois même du bord aval pour des obliquités de 30, 45 et 60 degrés. Les facteurs d'intensité locale peuvent augmenter de façon assez importante

avec la vitesse du vent. La distribution générale du mouillage sur un mur exposé au vent reste la même quelle que soit la hauteur du bâtiment bien que l'intensité du mouillage le long du bord supérieur augmente probablement avec la hauteur. Les corniches et les toits pointus peuvent réduire les impacts de pluie sur la face avant, tout en offrant des possibilités d'écoulement et, par suite, de protection contre la migration de surface.

La recherche a fait faire un bon en avant à la connaissance de la distribution du mouillage sur les faces de bâtiment — connaissance dont on ne saurait se passer pour définir un écran pare-pluie. De plus, elle a posé les bases qui serviront à chercher comment réduire les taux de mouillage. Ce sont là des apports inestimables à la science de la conception des bâtiments.

REMERCIEMENTS

L'initiative de la présente étude sur la simulation de la pluie et la distribution du mouillage sur les bâtiments revient à la Société canadienne d'hypothèques et de logement. Les contributions financières tant de la Société canadienne d'hypothèques et de logement que du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie sont appréciées à leur juste valeur. Nous remercions la Société canadienne d'hypothèques et de logement de la part qu'elle a prise dans l'élaboration du programme d'expériences.

Nous remercions également le personnel du laboratoire de sa contribution : monsieur D. Garnham a construit le modèle tandis que monsieur G. Dafoe a fabriqué le bâti portant les buses de pulvérisation et effectué les expériences. Monsieur M. Mikitiuk a aidé à prendre les photographies, et madame L. Hadden a participé à l'analyse de la taille des taches des gouttelettes. Nous sommes vivement reconnaissants à monsieur C. Harris de ses contributions importantes à l'étude, particulièrement pendant la phase II.

Enfin, nous tenons à remercier monsieur A. G. Davenport, directeur du Laboratoire du tunnel aérodynamique de couche limite, de ses directives, conseils et encouragements.

1 Modélisation de la pluie battante dans le tunnel aérodynamique

La modélisation de la pluie battante nécessite la mise à l'échelle simultanée du vent et de la pluie. La modélisation du vent est pratique courante au Laboratoire du tunnel aérodynamique de couche limite, aussi n'en parlerons-nous que brièvement. Par contre, la modélisation de la pluie à une échelle en harmonie avec le vent présente plusieurs difficultés nouvelles dont voici les détails.

1.1 Modélisation du vent

La mise à l'échelle de la pluie (voir 1.2.1 ci-dessous) a nécessité l'emploi de la veine à basse vitesse du tunnel aérodynamique de couche limite numéro deux de l'University of Western Ontario. La veine a une largeur de 5 m une hauteur de 4 m et une longueur de 52 m. et offre un avantage fortuit, soit l'existence d'un bassin à vagues sous le plancher amovible, ce qui permet de pulvériser de l'eau dans la veine et de la recueillir ensuite dans le bassin.

Le bâtiment d'essai initial a été modélisé d'après un immeuble d'Ottawa offrant une exposition de type banlieue; tous les essais ont été effectués avec une exposition amont de type banlieue. Les profils résultants (vitesse moyenne et intensité de la turbulence locale) sont donnés à la figure 1. Comme on le voit, l'exposant d'ajustement était d'environ 0,28, et la longueur de rugosité, z_0 , d'environ 0,3 m à partir de la couche limite inférieure. Comme on le verra plus loin en 1.2.2, l'échelle de longueur utilisée était de 1/64.

Pour choisir les vitesses de vent, on a considéré, entre autres facteurs, les pressions de vent données en [5]. Les vitesses dans la veine de 0,6, 1,5 et 2,3 m/sec au sommet du bâtiment de la phase I correspondaient à des pressions de vent grandeur nature à 10 m de hauteur et en terrain découvert, égales à 15, 75 et 200 Pa respectivement.

1.2 Mise à l'échelle de la taille des gouttes de pluie

1.2.1 Paramètres de mise à l'échelle

En regardant les équations de mouvement d'une gouttelette dans le vent et en négligeant la turbulence, on trouve les conditions de similitude suivantes pour les gouttelettes :

$$1) \left[\frac{V_t}{U} \right]_{Ms} = \left[\frac{V_t}{U} \right]_{FS}$$

avec V_t = vitesse terminale

U = vitesse du vent

(ceci définit l'angle de la pluie battante)

$$2) \left[\frac{U^2}{Hg} \right]_{Ms} = \left[\frac{U^2}{Hg} \right]_{FS}$$

avec H = hauteur du bâtiment

g = constante de gravitation

(c'est la mise à l'échelle par le nombre de Froude

Ainsi, pour une échelle de longueur quelconque (prise ici égale à 1/64), l'échelle de vitesse de vent est simplement la racine carrée de l'échelle de longueur (1/8 ici), et l'échelle de temps est la longueur d'échelle divisée par l'échelle de vitesse (encore 1/8 ici).

1.2.2 Répartition de la taille des gouttes à l'échelle du modèle cible

Pour déterminer la répartition désirée de la taille des gouttes à l'échelle du modèle, il faut d'abord déterminer la répartition grandeur nature, ce qui se fait ici grâce à des travaux publiés. Ensuite, en appliquant la mise à l'échelle de la vitesse à la vitesse terminale des gouttes (il faut aussi des données publiées sur les vitesses terminales), on peut déterminer la répartition à l'échelle du modèle.

À la grandeur nature, la taille des gouttes peut varier de 100 μ m à 6 000 μ m environ. Plusieurs modèles théoriques de répartition de la taille des gouttes grandeur nature ont été proposés. Les plus utilisés sont peut-être les suivants :

a) le meilleur [1] :

$$F = 1 - e^{-(d/a)^n} \quad \text{avec } a = A I^p$$

F est la fraction d'eau liquide dans l'air qui a des gouttes d'un diamètre inférieur à d (mm), I est l'intensité de la précipitation (mm/h), et les valeurs de A , p et n sont respectivement de 1,3, 0,232 et 2,25. De plus,

$$G = C I^q$$

G est le volume d'eau liquide par unité de volume d'air (mm^3/m^3) et les valeurs de C et de q sont respectivement de 67 et 0,846.

b) Marshall et autres [11] :

$$n(d) = n_0 e^{-d} \quad \text{avec } n_0 = 4,1 I^{0,21} \text{ mm}^{-1}$$

$n(d)$ est le nombre de gouttes par mètre cube d'air par unité de diamètre au diamètre d (mm) et $n_0 = 8 \times 10^3 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$.

Des données et des modèles expérimentaux existent aussi pour les vitesses terminales des gouttes. Gunn et Kinzer [7] présentent des données expérimentales pour des gouttes en air stagnant d'un diamètre de 100 m à 5 800 m (pression de 760 mm, température de 20 C, humidité relative de 50 %). Markowitz [10] a établi l'expression suivante pour la vitesse terminale :

$$V_{t=9.58} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{d(mm)}{1.77} \right)^{1.147} \right\} \right] (m/s)$$

Cette expression correspond bien aux données de Gunn et de Kinzer pour des diamètres de goutte supérieurs à 300 m.

Les résultats du modèle de Marshall sont donnés à la figure 2 pour des intensités de précipitation grandeur nature de 1, 10 et 100 mm/h. Remarquer que les résultats sont présentés en tant que pourcentage de volume accumulé *sur une surface horizontale* bien que la répartition de la taille des gouttes soit normalement donnée pour un *volume d'air*. Un facteur équivalent aux vitesses terminales a été incorporé au modèle de Marshall. Cette présentation est due à la technique de mesurage utilisée dans la présente étude, laquelle donne la répartition collectée sur une surface horizontale dans le temps.

L'utilisation du modèle de Marshall et autres et une combinaison de la loi de Stokes (pour $d < 80$ m), les données de Gunn et Kinzer (pour $100 < d < 300$ m) et l'expression de Markowitz (pour $d > 300$ m) (voir le graphique de la vitesse terminale en fonction du diamètre des gouttes à l'annexe E) ont permis de déterminer la répartition désirée de la taille des gouttes à l'échelle du modèle. Cette répartition est montrée à la figure 3 pour les mêmes intensités de précipitation grandeur nature qu'à la figure 2. On n'a pas cherché dans cette première étude à modéliser une intensité particulière de précipitation mais à se situer dans un intervalle acceptable.

Pour arriver à la répartition cible, il a fallu garder l'échelle de vitesse aussi grande que possible (les gouttes très petites mènent au problème de l'évaporation) sans nuire à la validité de la mise à l'échelle eu égard à la couche limite. Le choix d'une échelle de vitesse de 1/8 et, par conséquent, d'une échelle géométrique de 1/64 a permis une mise à l'échelle adéquate.

Il est intéressant de noter que, au-dessus d'un diamètre équivalent de 4 000 m, une augmentation de la taille des gouttes n'entraîne qu'une très petite augmentation de la vitesse terminale parce que l'augmentation de la masse est compensée par une augmentation correspondante de la déformation — le fond des grandes gouttelettes tend à s'aplatir. À un diamètre de 500 m, le « paramètre de déformation des gouttes » est de 0,98; à 1 000 m, il est de 0,93; à 2 500 m, il est de 0,71; et, à 4 000 m, il est de 0,52 [2]. Il est naturellement impossible de modéliser cette déformation à petite échelle avec de l'eau, mais on ne croit pas que ce paramètre soit important. Il est toutefois utile de remarquer que, en raison de l'aplatissement de la courbe de la vitesse terminale aux grands diamètres, il devient difficile de modéliser les gouttes dont le diamètre grandeur nature est supérieur à, disons, 6 000 m. La correspondance univoque indispensable entre les tailles grandeur nature et les tailles à l'échelle du modèle par la vitesse

terminale concentrerait la partie grand diamètre du spectre grandeur nature dans une bande étroite du spectre à l'échelle du modèle.

Comme la taille des gouttes modélisées ne subit pas une réduction géométrique constante, le taux de précipitation à l'échelle du modèle doit être rapporté au taux grandeur nature équivalent par la répartition de la fréquence grandeur nature de la taille des gouttes et le taux correspondant de précipitation.

1.3 Simulation de la pluie au moyen de buses

Deux possibilités existent pour simuler la répartition de la taille des gouttes de pluie. L'une consiste à utiliser un jeu de buses qui produit les spectres voulus de tailles, et l'autre, à « fabriquer » la répartition des tailles à partir d'une série d'essais indépendants ayant chacun des tailles uniformes. Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients, mais le matériel nécessité par la deuxième est plus coûteux et les essais exigent plus de main d'œuvre. Pour cette raison, à l'occasion de cette première étude, on a utilisé des buses produisant une gamme de tailles.

Dans l'un et l'autre cas, il est supposé implicitement qu'il y a très peu d'interaction entre les gouttes, même par forte pluie. Cela implique que c'est la *forme* du spectre choisi qui définit le taux équivalent de précipitation grandeur nature, et non l'*intensité* réelle de la précipitation modélisée. À titre d'exemple, la relation de Marshall prédit environ 3 000 gouttes par mètre cube dans une pluie de 10 mm/h. Cela donne, en moyenne, environ 6 cm entre les gouttes. L'intervalle moyen entre les grosses gouttes qui contiennent la majeure partie de la masse d'eau doit être encore plus grand.

Une autre hypothèse implicite est que l'ajout de la pluie modélisée à la simulation du vent de la couche limite ne déforme pas abusivement les caractéristiques du vent, en particulier les propriétés de la turbulence. La brève expérience décrite à l'annexe F donne à penser que l'effet de la pluie modélisée sur le vent modélisé est sans importance.

1.3.1 Choix des buses

Une buse a été choisie pour produire approximativement la répartition montrée à la figure 3. Le « TN8 Unijet Spray Nozzle Tip » de la Spraying Systems Company a été retenu (cône creux, pulvérisation fine, pression standard). Le diamètre des gouttes à un volume accumulé de 10 % est de 100 μ m, et, à 90 %, il est de 300 μ m (dans un volume d'air). Bien que plusieurs autres buses auraient pu convenir pour ce qui est de la taille des gouttes, celle-ci a été choisie pour son débit relativement faible — à 25 lb/po², son débit est de 350 ml/min. C'était important pour effectuer des essais de longue durée (voir 2.2). L'angle de pulvérisation était d'environ 80 degrés à 25 lb/po².

1.3.2 Étalonnage d'une buse

Si on pouvait disposer les buses de façon qu'elles garnissent complètement le plafond du tunnel sans pratiquement aucun espace entre elles, en l'absence d'évaporation, la gamme des tailles de goutte partout dans la pluie entraînée par le vent serait identique à celle que produirait une buse séparée. Malheureusement, ce n'est pas faisable, et, à la place, une batterie discrète de buses a été

prévue. Cela a abouti au problème de l' « effet de filtre » sur la taille des gouttes dans le tunnel et à la nécessité d'étalonner les tailles comme expliqué ci-dessous.

Quelle que soit la vitesse du vent, les petites gouttes sont entraînées plus loin de la buse que les grosses à cause de la différence de leur vitesse terminale. Par conséquent, pour chaque vitesse de vent, la taille des gouttes sur le lieu de l'expérience a été étalonnée en fonction de la distance entre ce lieu et la position de la buse située en amont (la hauteur de la buse étant maintenue constante). Un tel étalonnage permet de calculer l'espacement longitudinal des buses. Il importe de noter que, par suite de l'effet de filtre, la taille des gouttes issues d'une buse quelconque diminue toujours avec la hauteur le long de toute ligne verticale située à l'intérieur de la pluie battante simulée. La forme de la répartition peut aussi différer. Pour cette raison, des profils verticaux de la répartition des tailles ont aussi été relevés à certains points en amont afin d'assurer une gamme représentative de tailles en tout point de la hauteur du bâtiment.

L'étalonnage a aussi porté sur la mesure de l'étalement transversal des gouttes. Quand la distance depuis la buse augmente, la diffusion horizontale s'élargit par suite de la turbulence. Ici encore, il a fallu procéder à un étalonnage pour chaque vitesse et chaque distance entre le lieu de l'expérience et la buse située en amont. Cela a été fait seulement au niveau du sol. Les résultats ont montré que la taille des gouttes ne varie pas transversalement et que le nombre de gouttes diminue simplement avec l'éloignement, comme on pouvait s'y attendre.

Le mesurage nécessaire aux étalonnages reposait sur deux techniques :

- 1) un instrument de mesure à rayon laser (granulomètre MALVERN 2600);
- 2) un papier hydrosensible fabriqué par Ciba-Geigy qui vire définitivement du jaune au bleu au contact de l'eau. Sur certaines photographies, les taches bleues apparaissent en rouge en raison de l'utilisation d'un filtre sur l'appareil de prise de vue.

Les deux techniques ont donné des résultats assez semblables malgré les difficultés causées par des erreurs. Elles sont décrites en détail à l'annexe A.

Nous avons tenté d'effectuer les étalonnages dans une humidité relative élevée (disons >65 %) afin que les gouttes gardent à peu près la même taille pendant leur chute à travers la couche limite. Pendant les essais, les buses ont toujours été à 2 m de hauteur pour minimiser l'évaporation tout en donnant aux gouttes amplement le temps d'atteindre leur vitesse terminale (celles de moins de 100 µm de diamètre atteignent normalement leur vitesse terminale en moins de 0,25 m, et celles de 500 µm, en 0,7 m). Nous avons aussi tenté d'effectuer les étalonnages à la même humidité relative que les expériences finales de distribution du mouillage. Hélas, une certaine erreur s'est introduite, car il s'est révélé difficile de régler l'humidité dans le tunnel, et celle-ci a fluctué entre 60 et 80 %.

Il faut ajouter que les buses étaient dirigées *vers l'amont*. Les gouttes étaient donc emportées horizontalement par le vent et non poussées par la pression dans la buse. L'orientation de la buse permettait aussi un mélange plus turbulent de la pulvérisation à la sortie.

1.3.3 Conception de la batterie de buses et répartitions résultantes de la taille des gouttes

Le plan de disposition des buses repose sur l'étalonnage d'une seule buse. Une photographie montrant le tunnel et la batterie de neuf buses est donnée à la figure 4. L'espacement longitudinal a été choisi de façon à donner au moins la gamme de tailles de goutte montrée à la figure 3. Il n'a pas été possible de modéliser avec précision les répartitions, en particulier pour toutes les hauteurs, mais on croit avoir obtenu une modélisation adéquate pour cette première étude. La figure 5 donne un exemple des répartitions de tailles à l'échelle du modèle, obtenues pour la vitesse intermédiaire de vent. La répartition grandeur nature correspondante est donnée à la figure 6. Les répartitions résultant des trois vitesses de vent sont données à l'annexe B. Ces résultats reflètent les répartitions au milieu du tunnel à différentes hauteurs, soit au pied du bâtiment de la phase I, tout près du sommet et à quatre hauteurs intermédiaires. Toutes les hauteurs ont été essayées simultanément pendant 2 secondes. La comparaison des figures 2 et 6 d'une part et des figures 3 et 5 d'autre part montre que les répartitions de tailles obtenues étaient déformées dans le sens d'une plus grande taille par rapport aux répartitions visées. Toutefois, si on se réfère aux travaux de Choi [4], ce n'est sûrement pas un problème important. Ajoutons que le taux d'une précipitation de courte durée peut dépasser les taux horaires publiés, ce qui laisse supposer l'existence de répartitions de tailles supérieures. La technique d'analyse fonctionne seulement sur un très petit échantillon de papier hydrosensible; il s'ensuit que les courbes ne sont pas aussi régulières qu'avec un champ d'analyse plus vaste. À l'analyse, quelques gouttelettes ont été trouvées plus grosses qu'il est matériellement possible après conversion à leur équivalent grandeur nature; elles ont été éliminées des répartitions. La technique d'analyse est décrite à l'annexe A. Le Malvern n'a pas servi à l'analyse faite pour la batterie de buses.

Pour déterminer l'espacement transversal des buses, des bandes témoin de papier hydrosensible longues de 1 m ont été disposées dans la largeur du tunnel et successivement recouvertes jusqu'à ce que la densité des gouttelettes ait été trouvée uniforme. Mentionnons que les essais d'où les espacements ont été tirés n'ont duré que 5 secondes et que, par conséquent, ces espacements n'étaient pas forcément l'idéal pour un essai de durée plus longue ou un autre essai de 5 secondes (5 secondes à l'échelle du modèle équivalent à 40 secondes grandeur nature).

Sur les figures 5 et 6 et à l'annexe B, on voit, pour chaque hauteur, les taux de précipitation à l'échelle du modèle et grandeur nature, calculés à partir des taches de gouttelette sur le papier hydrosensible (voir l'annexe A). Les moyennes des taux de précipitation sur toute la hauteur du bâtiment de la phase I s'établissent à 24,5 mm/h, 11,7 mm/h et 3 mm/h pour des vitesses de vent au sommet du bâtiment de 0,6 m/sec, 1,5 m/sec et 2,3 m/sec respectivement, toutes à l'échelle du modèle. Ces valeurs se traduisent par des valeurs grandeur nature de 0,69 mm/h, 0,24 mm/h et 0,06 mm/h pour des vitesses de vent au sommet du bâtiment de 4,8 m/sec, 12 m/sec et 18,4 m/sec respectivement¹. Bien que la présomption de la simulation de pluie soit que les gouttelettes se comportent indépendamment les unes des autres et que, par suite, le taux de précipitation n'importe pas (mis à part son effet sur la répartition de la taille des gouttes), il faut ultimement connaître ce taux afin de pouvoir déterminer le facteur qui représentera le rapport entre le taux de mouillage du bâtiment et le taux de précipitation. Une simple collecte et une simple pesée de précipitation dans un récipient au niveau du sol ont donné des valeurs semblables — sur une période de 2 minutes, cette méthode élémentaire a donné des taux de précipitation dans le tunnel de 24 mm/h, 9,8 mm/h

¹ Remarquer encore que les *répartitions* de la taille des gouttes étaient représentatives de taux de précipitation grandeur nature beaucoup plus élevés.

et 4 mm/h pour les mêmes vitesses de vent que ci-dessus. La concordance est presque remarquable, étant donné que les essais au papier hydrosensible n'ont duré que 2 *secondes*, et donne confiance dans la méthode du papier hydrosensible. Nous considérons ce résultat comme très encourageant. Il est utile de mentionner que la pratique d'éliminer de l'analyse grandeur nature les gouttelettes de grosseur matériellement impossible ne résulte pas en une quelconque tendance aisément discernable de conversion du taux de précipitation à l'échelle du modèle en taux de précipitation grandeur nature (ces gouttelettes ont été conservées dans l'analyse à l'échelle du modèle).

Les taux de précipitation au niveau du sol, tant dans la largeur du tunnel que le long de son axe médian à la position du bâtiment, sont donnés au tableau 1, à l'échelle du modèle et à la grandeur nature. Les taux de précipitation sont relativement uniformes transversalement jusqu'à 1 m de l'axe médian (c'est important, étant donné que le bord du bâtiment d'essai peut être placé jusqu'à 0,65 m de l'axe médian). Comme prévu, la variation est plus importante dans le sens de la longueur du tunnel, surtout à la vitesse de vent la plus faible. Les essais ont été effectués séparément à partir des profils verticaux de taux de précipitation discutés plus haut. Cependant, bien que les deux séries d'essais auraient dû idéalement durer 2 secondes, le chronométrage a probablement souffert d'une certaine imprécision, causant une divergence dans le calcul des taux de précipitation. Précisons pourtant que la tuyauterie d'alimentation des buses était munie d'une soupape de sûreté qui permettait d'arrêter la pulvérisation presque instantanément. On pouvait par conséquent mieux régler la durée des essais et éviter le problème de la variation de la taille des gouttes pendant l'arrêt.

2 Distributions du mouillage sur les bâtiments

Les essais se sont faits en deux phases. La première consistait à étudier l'effet de la vitesse et de l'angle du vent sur les distributions du mouillage sur un bâtiment « de référence », avec un regard exploratoire sur l'effet des caractéristiques de surface — dans ce cas, des balcons. La deuxième était une étude de l'effet de la hauteur du bâtiment et des détails architecturaux de plus grande taille tels que les corniches et les toits pointus.

2.1 Bâtiments d'essai

2.1.1 Phase I

Le bâtiment de référence choisi par la SCHL était un immeuble d'appartements de 18 étages situé à Ottawa. La hauteur grandeur nature de l'immeuble est d'environ 60 m, ses dimensions en plan étant de 81 m x 18 m. Des balcons font saillie sur les grands côtés du bâtiment. L'exposition est du type banlieue. L'échelle géométrique de 1/64 a abouti à un modèle simple de 0,94 m de hauteur, 1,3 m de largeur et 0,29 m de profondeur. Le modèle est constitué d'un cur de bois et d'un extérieur en mousse; des balcons facultatifs sont prévus. Chaque balcon fait 1,2 m de haut et 2,4 m de large et dépasse de 0,75 m de la face du bâtiment grandeur nature.

2.1.2 Phase II

Au cours de cette phase, trois bâtiments « de référence » ont été étudiés :

Bâtiment A : 60 m de haut x 40 m de large x 20 m de profondeur (grandeur nature)

Bâtiment B : 40 m de haut x 40 m de large x 20 m de profondeur

Bâtiment C : 20 m de haut x 40 m de large x 20 m de profondeur

Ces bâtiments ont permis d'étudier l'effet de la hauteur à l'intérieur de la même couche limite, avec des rapports de forme inhérents changeants. Les largeurs ont été diminuées par rapport à celle de la phase I pour réduire l'obstruction du tunnel.

Parallèlement aux bâtiments de référence, l'effet de plusieurs grands détails architecturaux a été étudié :

Corniche — La première faisait 2 m de profondeur x 4 m de hauteur (grandeur nature), et la deuxième, 1 m de profondeur x 4 m de hauteur. Les deux corniches font le tour du bâtiment et n'augmentent pas sa hauteur hors tout.

Toit pointu — Avec pignons et deux côtés en pente à 45 degrés. Les pignons étaient sur les côtés étroits du bâtiment.

Angles rentrants — Un prolongement a été ajouté aux côtés étroits du bâtiment de façon à créer un angle rentrant d'environ 2,5 m x 2,5 m (grandeur nature) sur toute la hauteur du bâtiment.

De plus, la distribution du mouillage sur un bâtiment circulaire a été brièvement explorée.

2.2 Méthode d'essai

Bien que plusieurs options aient été examinées, c'est le papier hydrosensible qui a été retenu pour l'étude de la distribution du mouillage. À chaque essai, des panneaux d'aggloméré taillés à la dimension des faces du bâtiment et couverts d'un quadrillage de bandes de papier hydrosensible ont été fixés au modèle. On a ainsi obtenu une image visuelle immédiate et permanente de la distribution du mouillage sur les faces et la possibilité d'effectuer une analyse quantitative. Pour la plupart des essais, deux côtés du bâtiment, un large et un étroit, ont été couverts de papier hydrosensible (les côtés exposés au vent).

Le chronométrage des essais était basé sur l'ouverture et la fermeture du robinet d'alimentation. On a ainsi évité ainsi d'avoir à déterminer l'instant où la pluie commence et cesse d'atteindre le bâtiment, car il y a un écart entre le moment où les buses commencent ou cessent de débiter et le moment où la pluie commence ou cesse d'atteindre le bâtiment. La durée des essais a été imposée par la zone la plus mouillée du bâtiment — nous avons tenté d'arrêter les essais avant que les traces de goutte deviennent indistinctes sur le papier hydrosensible bien que cela fût difficile. Avant les essais, l'humidité relative régnant dans le tunnel était réglée au besoin à la valeur d'étalonnage.

Typiquement, il fallait l'augmenter en ouvrant le robinet pendant un certain temps pendant que la soufflerie était en marche.

Un sommaire des essais effectués aux phases I et II est donné au tableau C.1 de l'annexe C et au tableau D.1 de l'annexe D respectivement. Remarquer qu'une orientation de 0 degré correspond à une exposition au vent du côté large du bâtiment comme le montre la figure 7.

Le programme d'essai comprenait aussi le tournage d'un vidéo sur l'interaction des gouttelettes d'eau avec l'air circulant autour du bâtiment. En particulier, de la fumée a été injectée dans l'écoulement pendant le tournage pour révéler les différences d'écoulement des gouttelettes et de l'air.

2.3 Méthode d'analyse

Comme nous l'avons vu, le recouvrement des faces du bâtiment par un quadrillage de papier hydrosensible donnait une image visuelle permanente de la distribution du mouillage. Les images elles-mêmes transmettaient des renseignements précieux, permettant de faire des observations générales et de déterminer rapidement les effets des détails architecturaux. Cette méthode visuelle et qualitative a été utilisée à la phase I comme à la phase II. Remarquer toutefois que les comparaisons à vue sont quelque peu faussées par suite du rapport non linéaire entre la taille des gouttes grandeur nature et celle des gouttes à l'échelle du modèle. Bien qu'il soit improbable que cela nuise aux évaluations qualitatives de la distribution du mouillage, il doit en être tenu compte dans les évaluations quantitatives.

La méthode d'essai a aussi permis d'analyser quantitativement les *taux relatifs de mouillage* à certains endroits du bâtiment par la mesure des taches laissées par les gouttelettes sur le papier hydrosensible et le calcul des volumes d'eau qu'elles représentent (voir l'annexe A). Les *taux de mouillage* ont de plus été calculés par l'incorporation de la durée de l'essai aux calculs. Quant aux *facteurs d'intensité locale*, ils ont été obtenus par l'utilisation du taux de précipitation (on a utilisé les moyennes données en 1.3.3 pour les taux de précipitation sur toute la hauteur du bâtiment). Les facteurs d'intensité locale sont le rapport du taux de mouillage au taux de précipitation. Comme l'analyse quantitative exigeait beaucoup de main d'œuvre, elle n'a été faite que pour certains endroits, et ce, seulement pour les essais de la phase I.

2.4 Résultats

2.4.1 Phase I — analyse visuelle

Les photographies de la figure 8 donnent un exemple de distribution du mouillage (bâtiment de référence orienté à 0 degré et exposé à un vent de 1,5 m/sec au sommet). Toutes les photographies de la phase I sont réunies à l'annexe C, chaque figure correspondant à un essai. La vue a) montre toujours la distribution du mouillage sur les deux côtés du bâtiment tandis que les vues b), c) et d) sont des détails de la vue a) : b) montre le coin supérieur du côté large, c) est une vue encore plus rapprochée du même coin, et d) montre la moitié supérieure du côté étroit. Remarquer que la vue d) est couchée à l'horizontale. On peut voir les effets de l'angle et de la

vitesse sur la *distribution* du mouillage (c'est-à-dire les intensités relatives du mouillage sur le même côté). Pour chaque vitesse de vent, on peut en outre déduire l'effet de l'angle sur l'intensité du mouillage puisque la durée des essais a toujours été la même. Par contre, on ne peut pas voir directement l'effet de la vitesse sur l'intensité du mouillage puisque les taux de précipitation et la durée de l'essai variaient d'une vitesse à l'autre.

Les effets suivants peuvent être observés :

Effet de l'angle sur la distribution du mouillage

Mur au vent

La distribution du mouillage est semblable à celle montrée en [12], le coin supérieur étant le plus mouillé, suivi du bord supérieur et du bord latéral. Voir les figures C.1b, C.4b, C.9b, C.3d, C.8d et C.11d.

Mur latéral (c.-à-d. parallèle à la direction du vent)

La face latérale reste relativement sèche. Voir les figures C.1d, C.4d, C.9d, C.3b, C.8b et C.11b.

Autres angles (30, 45 et 60 degrés)

L'effet de l'angle sur la distribution du mouillage dépend en partie du rapport de forme des côtés du bâtiment :

Dans le cas du côté *large*, le bord amont est le plus mouillé tandis que le bord aval reste relativement sec. Le bord supérieur subit aussi un mouillage relativement intense, en particulier près du bord amont. La région la plus fortement mouillée semble se rapetisser à l'approche du bord supérieur quand l'angle entre la face du bâtiment et la direction du vent diminue (voir par exemple les figures C.4b, C.5b, C.6b, C.7b et C.8b).

Dans le cas du côté *étroit* et d'angles de 45 et 60 degrés entre la face et la direction du vent, la distribution du mouillage est semblable à celle d'un mur au vent (voir les figures C.2d, C.6d, C.7d et C.10d). Par contre, dans le cas d'un angle de 30 degrés, le mouillage est plus important le long du bord aval de la face que le long du bord amont (voir la figure C.5d). Cela est probablement dû à la séparation. Remarquer que cette dernière observation provient d'un seul essai.

Effet de l'angle sur l'intensité du mouillage

En général, le mouillage tend à être moins intense quand la face passe d'une exposition au vent à une exposition de côté.

Effet de la vitesse du vent sur la distribution du mouillage

Mur au vent

Il apparaît que l'accroissement de la vitesse du vent fait plus augmenter le mouillage dans la région centrale de la face que sur les bords bien que les essais ne soit pas concluants. Cela se remarque particulièrement sur le côté étroit quand on compare les essais faits à la vitesse la plus faible (4,8 m/sec grandeur nature) à ceux faits à l'une ou l'autre des deux autres vitesses (comparer les figures C.3d, C.8d et C.11d).

Angle de 45 degrés

Un effet comparable se remarque sur le côté large, car, lorsque la vitesse du vent augmente, la région mouillée « s'étend » plus loin vers l'aval à partir du coin amont (comparer les figures C.2b, C.6b et C.10b). Cet effet n'est pas aussi visible sur le côté étroit, la distribution du mouillage, dans ce cas, ressemblant davantage à celle d'une face au vent.

Effet des balcons

L'effet de cette particularité de surface semble minime dans le cas d'un vent perpendiculaire à la face du bâtiment (voir les figures C.12a et b). Il y a pourtant un certain effet *local* d'abri quand la direction du vent est oblique (voir la figure C.12c). Comme on peut s'y attendre, le mouillage est encore très faible lorsque le vent souffle parallèlement à la face (voir la figure C.12d).

Il faut remarquer une fois de plus que la durée des essais n'a été que de 5 à 10 secondes, soit approximativement 1 minute grandeur nature. Cela peut malheureusement causer une variabilité considérable d'un essai à l'autre. Il n'en reste pas moins que les tendances mentionnées ci-dessus sont évidentes.

Une observation intéressante enregistrée sur vidéo a été l'« effet de tôle » de la pluie lorsque cette dernière réagit aux rafales de vent.

2.4.2 Phase I — analyse quantitative

Les résultats de l'analyse quantitative sont donnés aux figures 9 à 12. Les nombres indiqués sur les faces du bâtiment dans ces figures sont les facteurs d'intensité locale. Ils ont été déterminés à partir d'une zone de 0,4 m² (grandeur nature) centrée sur les points indiqués. D'une manière très générale, les tendances dénotées par les facteurs d'intensité locale concordent avec les résultats de l'analyse visuelle donnés en 2.4.1.

La concordance n'est pourtant pas toujours absolue. Afin de critiquer la méthode, nous avons comparé les facteurs d'intensité locale réellement obtenus à la tendance qui ressort d'un simple examen visuel des bandes de papier hydrosensible. Les deux concordaient souvent mais pas toujours. Il faut souligner que l'analyse quantitative a été faite une seule fois pour chaque endroit et qu'elle est en partie subjective. L'annexe A indique quelques sources possibles d'erreur.

Effets de l'angle sur les facteurs d'intensité locale

Mur au vent

À part les contradictions mentionnées ci-dessus, les facteurs d'intensité locale montrés aux figures 9 et 10 semblent refléter la distribution « classique » du mouillage. Dans les coins, le facteur d'intensité est compris entre 0,15 et 2,5 environ, et le rapport entre les coins et la région centrale est de 2 à 50 environ.

Autres angles (30, 45 et 60 degrés)

Dans le cas du côté *large*, l'effet d'un vent oblique est montré à la figure 12 pour un angle de 45 degrés entre la direction du vent et le côté. L'observation faite en 2.4.1, à savoir que le mouillage diminue considérablement du bord amont au bord aval, est confirmée, et on peut apprécier l'ampleur de la variation. Le long du bord supérieur, par exemple, le facteur d'intensité locale varie de 0,7 environ dans le coin amont à 0,05 dans le coin aval pour une vitesse de vent de 12 m/sec. Remarquer que le facteur d'intensité locale dans le coin amont est assez proche de celui d'un mur au vent à la même vitesse.

Dans le cas du côté *étroit*, la figure 11 montre l'effet d'angles de 30 et de 45 degrés entre la direction du vent et le côté. On voit que la diminution observée du mouillage, quand la face passe d'une exposition au vent à une exposition de côté, se vérifie particulièrement dans les 80 % inférieurs de la face. Le long du bord supérieur, quelques zones restent fortement mouillées, même à l'angle de 30 degrés où le facteur d'intensité locale au coin supérieur aval est encore de 0,52.

Effet de la vitesse du vent sur le facteur d'intensité locale

Mur au vent

Le facteur d'intensité locale peut augmenter de façon assez considérable quand la vitesse du vent augmente. La figure 9 montre les facteurs d'intensité locale sur le côté *étroit* pour trois vitesses de vent. Quand la vitesse du vent passe de 4,8 m/sec à 12 m/sec puis à 18,4 m/sec au sommet du bâtiment (grandeur nature), les valeurs au coin supérieur sont respectivement de 0,15, 0,7 et 2,5 environ.; les valeurs correspondantes dans la moitié centrale inférieure sont respectivement de 0,003, 0,4 et 0,7 environ. On remarque un effet identique sur la figure 10 pour le côté *large* où, pour des vitesses de vent de 12 m/sec et 18,4 m/sec, les valeurs de coin sont respectivement de 0,9 et 1,5 environ; les valeurs correspondantes dans la moitié centrale inférieure sont respectivement de 0,2 et 0,8 environ.

Remarquer que, pour la vitesse de vent la plus élevée (18,4 m/sec grandeur nature), les facteurs d'intensité locale semblent plus faibles dans l'ensemble sur le côté large que sur le côté étroit. Cet effet n'est pas aussi apparent à la vitesse la plus faible, soit 12 m/sec, c'est pourquoi cette vitesse n'a pas donné lieu à une comparaison.

Il serait extrêmement intéressant de comparer les facteurs d'intensité locale de la présente étude à des résultats obtenus numériquement, comme ceux de Choi [3]. Bien qu'une comparaison directe soit impossible en raison de différences dans la géométrie du bâtiment de référence et du

fait que la moyenne des facteurs d'intensité locale de Choi est calculée sur des surfaces beaucoup plus grandes, il est possible de faire quelques réflexions encourageantes :

- 1 Les facteurs d'intensité locale obtenus ici et ceux de Choi sont généralement du même ordre de grandeur. Les résultats numériques de Choi sont valables pour des bâtiments ayant des rapports de forme (haut./larg./prof.) de 4/1/1 et 4/8/2, des vitesses de vent au sommet du bâtiment (40 m) de 6,3 m/sec et 12,6 m/sec et un profil de vitesse moyenne de vent semblable à celui de notre étude. Notre réflexion découle par conséquent d'une comparaison grossière, d'une part, entre notre côté « large » et le bâtiment 4/8/2 de Choi, et, d'autre part, de notre côté « étroit » avec le bâtiment 4/1/1 de Choi. Seuls, les résultats des faces avant perpendiculaires au vent ont donné lieu à une comparaison.
- 2 Choi a aussi trouvé que les facteurs d'intensité locale sur la face avant augmentent considérablement quand la vitesse du vent augmente.
- 3 Choi a trouvé que plus le bâtiment est large, plus les facteurs d'intensité locale diminuent.

2.4.3 Phase II - analyse visuelle

L'effet de la hauteur du bâtiment et des détails architecturaux sur la distribution et l'intensité du mouillage peut être déduit directement des photographies des essais de la phase II puisque les durées d'essai sont restées constantes. Toutes les photographies des essais de la phase II sont réunies à l'annexe D. Il est possible de faire les observations suivantes :

Effet de la hauteur du bâtiment

Les photographies de la distribution du mouillage sur les bandes de papier hydrosensible des trois bâtiments de référence de la phase II sont montrées aux figures D.1 à D.3. Les vues a), b) et c) de chaque figure représentent la distribution du mouillage des bâtiments B, A et C respectivement.

Mur au vent

La distribution générale du mouillage reste la même quelle que soit la hauteur du bâtiment. Il apparaît cependant que l'intensité du mouillage, le long du bord supérieur, augmente avec la hauteur du bâtiment, à cause probablement de l'accroissement de la vitesse du vent au sommet du bâtiment (voir les figures D.1 et D.3).

Mur latéral

Il apparaît que la hauteur du bâtiment a très peu d'effet, si elle en a un, sur le mouillage d'un mur latéral. Le mur reste assez sec dans tous les cas (voir la figure D.3).

Angle de 45 degrés

Pour cet angle d'orientation (voir la figure D.2), les résultats sont peu concluants par rapport à ceux de la phase I et exigeraient des investigations plus poussées pour être expliqués. La

distribution du mouillage sur les deux faces du bâtiment le plus court, le bâtiment C, ressemble à celle d'une face au vent. Lorsqu'on passe du bâtiment C au bâtiment B puis au bâtiment A, progressivement plus hauts, le mouillage sur les deux faces s'intensifie progressivement sur le bord amont par rapport au bord aval.

Effet d'une corniche

La corniche offre une excellente protection à la face du bâtiment, dans la région située juste au-dessous d'elle. Cette observation est valable pour toutes les hauteurs et à tous les angles examinés (0, 45 et 90 degrés). Dans le cas de la corniche de 2 m, la région sèche fait environ 1,5 m de hauteur et s'étend sur toute la largeur du bâtiment; dans le cas de la corniche de 1 m, elle fait environ 0,75 m de hauteur. En revanche, la corniche elle-même subit un mouillage abondant qui ressemble à celui de la face d'un bâtiment. Voir les figures D.4, D.5 et D.6.

Abstraction faite de la zone sèche supérieure, la distribution du mouillage sur la face du bâtiment est la même qu'en l'absence de corniche. Il apparaît cependant que l'intensité du mouillage est moindre sur les bords. Les régions centrales semblent avoir reçu la même quantité d'impacts de pluie qu'en l'absence de corniche.

Effet d'un toit pointu

Il apparaît que, à l'instar de la corniche, le toit pointu réussit à réduire l'intensité du mouillage sur la face avant (mais peut-être pas aussi efficacement). Comparer la figure D.7 au cas de référence de la figure D.1a. La distribution générale du mouillage est la même que celle du cas de référence.

Le côté au vent du toit pointu subit un mouillage d'une intensité considérable; le côté sous le vent est relativement sec près du sommet mais légèrement mouillé vers le bas. L'extrémité du toit, comme la face latérale, est sèche.

Effet des angles rentrants

Cette modification architecturale ne semble pas avoir un effet quelconque sur la face au vent. Remarquer pourtant que la face au vent du renforcement reçoit très peu de pluie. L'eau qu'elle reçoit tombe en majeure partie sur le coin supérieur (voir la figure D.8).

Bâtiment cylindrique

La région la plus mouillée est la partie au vent du bord supérieur, jusqu'à 45 degrés environ de part et d'autre de la génératrice avant, suivie de la génératrice avant elle-même. Le mouillage est inexistant au-delà de 60 degrés environ (voir la figure D.9).

C'est vers l'arrière que le mouillage du toit est le plus intense (c'est-à-dire en aval). Il reste à peu près uniforme dans les deux tiers arrière.

Essai de longue durée avec corniche

La distribution du mouillage résultant d'un essai d'une durée de 27 secondes, avec la corniche de 2 m, est montrée à la figure D.10. On ne peut plus distinguer les taches de gouttelette les unes des autres, mais la distribution du mouillage est flagrante. Il faut savoir que le contraste entre la corniche et la partie centrale de la face du bâtiment peut être plus grand qu'il paraît parce que le papier hydrosensible ne peut indiquer qu'un *premier* mouillage. L'essai a été poursuivi jusqu'à ce que l'eau ait commencé à couler de la corniche; il n'est pas valable à cause de la migration de l'eau à la surface.

3 Conclusions

Nous avons présenté une nouvelle méthode de simulation de la pluie battante et de la distribution du mouillage sur les bâtiments, tant la conception que les résultats obtenus. Ces résultats sont, en grande partie, encourageants. Les conclusions principales sont les suivantes :

Simulation de la pluie battante

- 1 Il est possible d'utiliser une batterie de 9 buses dirigées vers l'amont à une hauteur de 2 m dans le tunnel aérodynamique de couche limite numéro deux pour simuler la pluie battante; la modélisation peut être réalisée avec une échelle de longueur de 1/64 et une mise à l'échelle de la vitesse de 1/8 (mise à l'échelle de Froude). L'étalonnage d'une buse est nécessaire pour chaque vitesse de vent afin de déterminer le plan de disposition de la batterie.
- 2 La répartition de la taille des gouttes obtenue sur le lieu de l'expérience a été mesurée et trouvée légèrement déformée dans le sens d'une plus grande taille par rapport aux répartitions visées. L'effet a été jugé négligeable.
- 3 Par suite de l'« effet de filtre » dû à des buses discrètes, il est impossible d'obtenir une répartition de tailles de goutte *complètement* uniforme sur un lieu d'expérience dans le tunnel. Toutefois, l'uniformité obtenue sur toute la hauteur du bâtiment et dans sa largeur a été jugée suffisante.
- 4 Deux méthodes ont été trouvées pour l'analyse de la taille des gouttes : un papier hydrosensible qui vire du jaune au bleu au contact de l'eau et un granulomètre à rayon laser. L'une et l'autre entraînent certaines erreurs dans la présente application, mais elles donnent des résultats assez semblables.
- 5 Le papier hydrosensible permet de mesurer les taux de précipitation produits dans le tunnel avec un succès satisfaisant.

Simulation de la distribution du mouillage sur les bâtiments

- 1 Il est possible de déterminer la distribution du mouillage sur les faces d'un bâtiment au moyen d'un quadrillage de bandes de papier hydrosensible. La méthode donne une image

visuelle immédiate de la distribution du mouillage d'impact (et non de la migration à la surface).

- 2 Il est possible de calculer les taux de mouillage à partir de la taille des taches de gouttelette sur le papier hydrosensible et des durées d'essai. On peut ensuite calculer les facteurs d'intensité locale au moyen des taux de précipitation.
- 3 Le papier hydrosensible ne permet que des durées d'essai très limitées parce que les taches de gouttelette doivent être distinctes les unes des autres. Cela peut causer une variabilité considérable dans les résultats.

Effet de l'angle du bâtiment et de la vitesse du vent sur le mouillage

- 1 La distribution « classique » du mouillage a été observée sur le mur au vent, le coin supérieur étant le plus mouillé, suivi du bord supérieur et du bord latéral. Les facteurs d'intensité locale dans les coins étaient compris entre 0,15 et 2,5 environ dans les cas analysés. Les coins étaient soumis à 2 à 50 fois plus d'impacts de pluie que la région centrale de la face.
- 2 Le mur latéral reste relativement sec. Quand la direction du vent est oblique, la distribution du mouillage dépend du rapport de forme et de l'angle du bâtiment; aux angles de 30, 45 et 60 degrés, le mouillage peut être considérable le long du bord supérieur, du bord amont et parfois même du bord aval.
- 3 Les facteurs d'intensité locale peuvent augmenter assez considérablement lorsque la vitesse du vent augmente.

Effet de la géométrie du bâtiment et des caractéristiques architecturales sur le mouillage

- 1 La distribution générale du mouillage sur un mur au vent reste la même quelle que soit la hauteur du bâtiment bien que l'intensité du mouillage le long du bord supérieur augmente probablement avec la hauteur.
- 2 Les facteurs d'intensité locale peuvent être plus faibles sur une face large que sur une face étroite dans le cas d'une exposition au vent, mais les résultats sont peu concluants.
- 3 Une corniche peut être très efficace pour protéger une face de bâtiment dans la région située juste au-dessous d'elle. Elle peut aussi diminuer le mouillage des bords latéraux. La corniche elle-même est très mouillée mais offre de bonnes possibilités d'écoulement et, par suite, de protection contre la migration de surface.
- 4 Un toit pointu semble aussi réduire les impacts de pluie sur la face avant.
- 5 Les balcons ont uniquement un effet local d'abri quand la direction du vent est oblique.

Travaux futurs recommandés

La présente étude, à notre connaissance la première du genre à porter sur la simulation de la pluie battante et de la distribution du mouillage dans un tunnel aérodynamique, a montré que la méthode employée est viable. Le sujet étant nouveau, il reste des possibilités d'amélioration et de complément d'étude. Voici quelques idées de sujet :

- Pour réduire l'effet de « filtrage » de la taille des gouttes que produit une batterie de buses discrètes, augmenter le brassage à la sortie des buses pour créer un grand nuage de gouttelettes.
- Explorer l'idée d'uniformisation de la taille des gouttes et de « construction » du spectre.
- Expérimenter l'utilisation d'un traceur et d'une charge électrostatique pour la mesure des taux de mouillage afin d'allonger la durée des essais.
- Continuer les travaux sur les modifications architecturales afin d'atténuer les taux de mouillage.

RÉFÉRENCES

- [1] Best A. C. "The Size Distribution of Raindrops", Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society", Vol. 76, pages 16-36, 1950.
- [2] Brazier-Smith "On the Shape and Fall Velocities of Raindrops", Journal of the Royal Meteorological Society", Vol. 118, pages 756-, 1992.
- [3] Choi E.C.C. "Simulation of Wind-Driven Rain around a Building", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 46-47, pages 721-729, 1993.
- [4] Choi E.C.C. "Parameters Affecting the Intensity of Wind-Driven Rain on the Front Face of a Building", actes du Invitational Seminar on Wind, Rain and the Building Envelope, The University of Western Ontario, London, Canada, 16-18 mai 1994.
- [5] CAN/CSA-A440-M90 (1990), Fenêtres, Norme nationale du Canada.
- [6] Ciba-Geigy Limited "Water-Sensitive Paper for Monitoring Spray Distribution", Bâle, Suisse.
- [7] Gunn R. et Kinzer G. D. "The Terminal Velocity of Fall for Water Droplets in Stagnant Air", Journal of Meteorology, Vol. 6, pages 243-248, 1949.
- [8] Inculet D., Surry D. et Skerlj P.F. "The Experimental Simulation of Wind and Rain Effects on the Building Envelope", à présenter à l'International Conference on Building Envelope Systems and Technology, Singapour, 7-8 décembre 1994.
- [9] Malvern Instruments "2600 Particle Sizer User Manual", Malvern, Worcestershire, Angleterre.
- [10] Markowitz A. M. "Raindrop Size Distribution Expressions", Journal of Applied Meteorology, Vol. 15, pages 1029-1031, 1976.
- [11] Marshall J. S., Langille R. C. et Palmer W. McK. "The Distribution of Raindrops with Size", Journal of Meteorology, Vol. 5, pages 165-166, 1948.
- [12] Robinson G. et Baker M. C. "Wind-Driven Rain and Buildings", Division de la recherche sur le bâtiment, Conseil national de recherches du Canada, Technical Paper No. 445, 1975.
- [13] Surry D., Inculet D.R., Skerlj P.F., Lin J.-X. et Davenport A.G. "Wind, Rain and the Building Envelope: A Status Report of Ongoing Research at the University of Western Ontario", actes de l'Invitational Seminar on Wind, Rain and the Building Envelope, The University of Western Ontario, London, Canada, 16-18 mai 1994 (à paraître dans le Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics).

RPR 601 EXPOSITION DU PROFIL VERTICAL=6 DATE 17/09/93

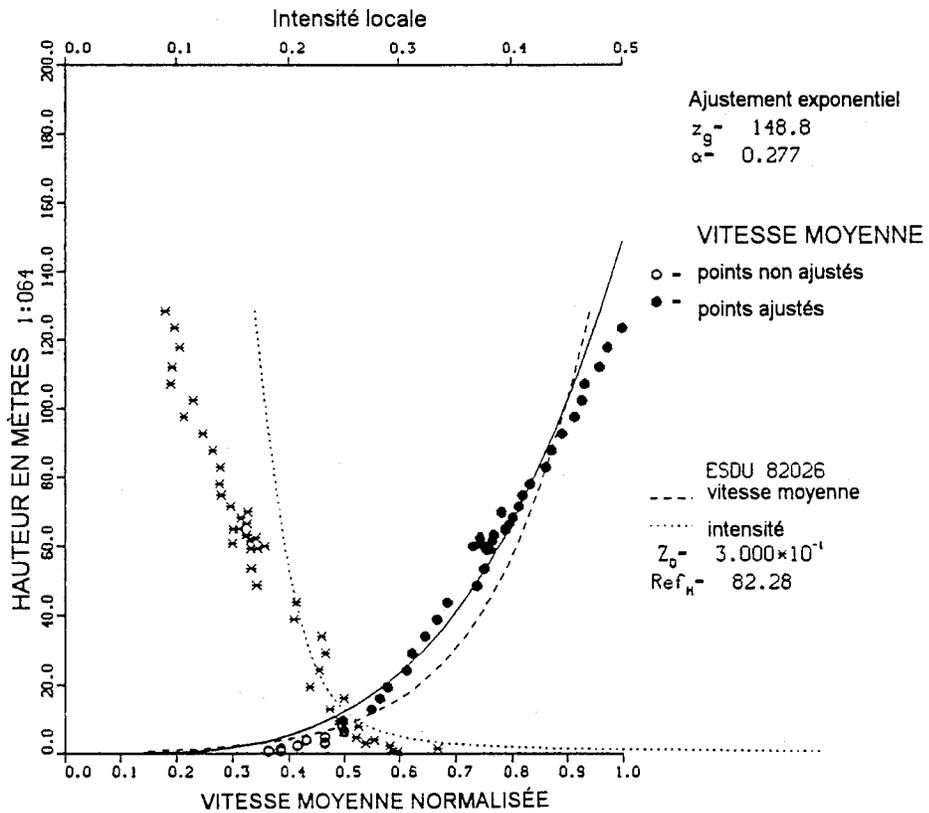


Figure 1. Vitesse moyenne et profils d'intensité de la turbulence sur le lieu de l'expérience

Répartition des tailles de goutte grandeur nature

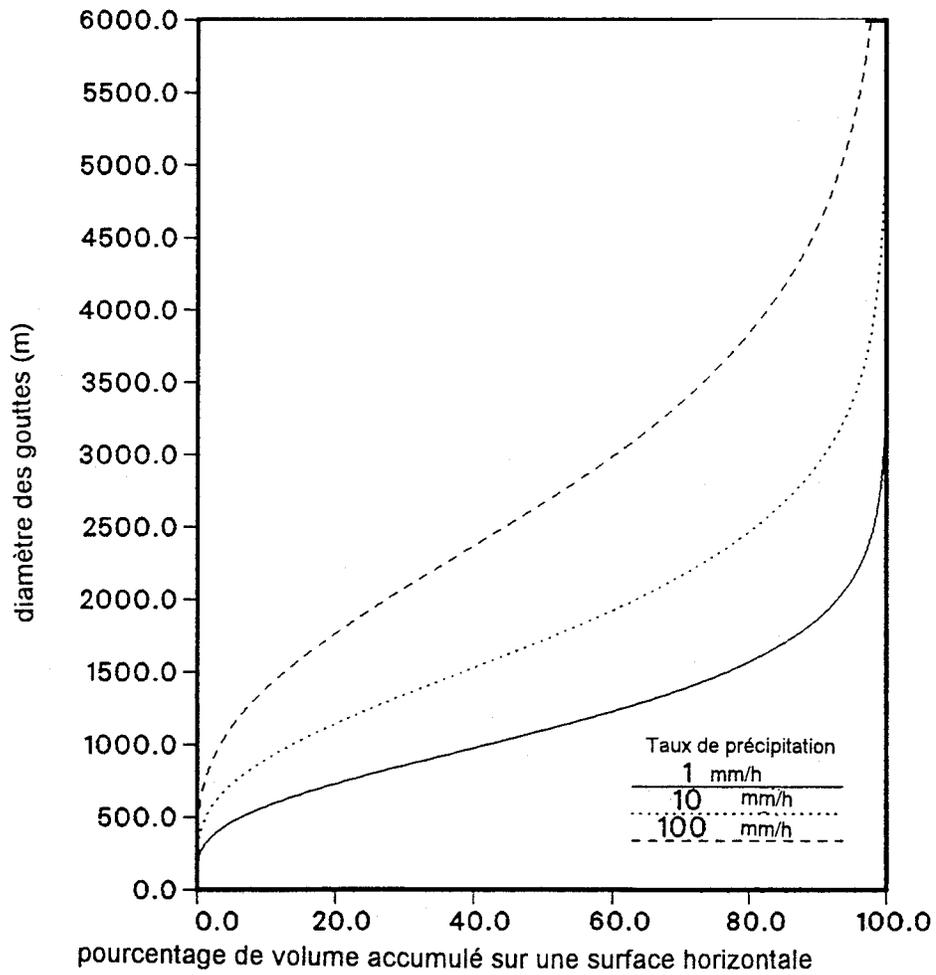


Figure 2. Répartition cible des tailles de goutte grandeur nature

Répartition des tailles de goutte à l'échelle du modèle

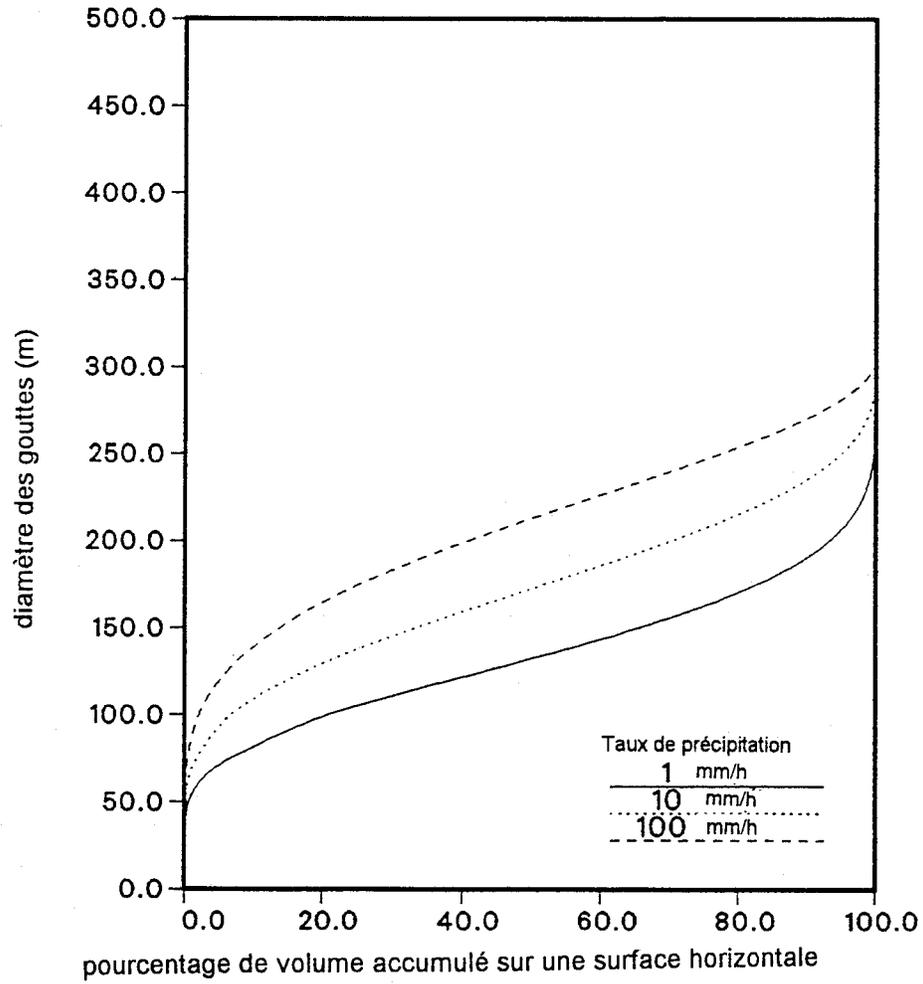


Figure 3. Répartition cible des tailles de goutte à l'échelle du modèle

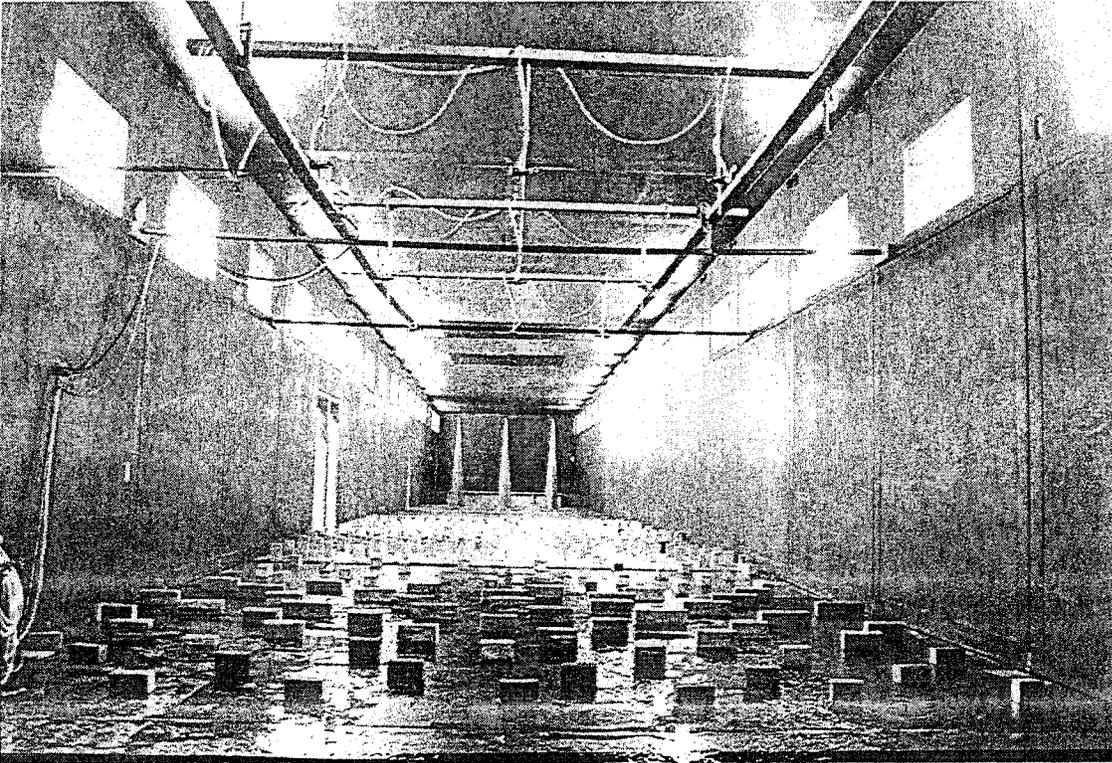


Figure 4. Batterie de buses dans le tunnel aérodynamique

Batterie de buses, profil vertical à b=0 m
 vitesse=1,5 m/sec au sommet du bâtiment
 (valeurs à l'échelle du modèle)

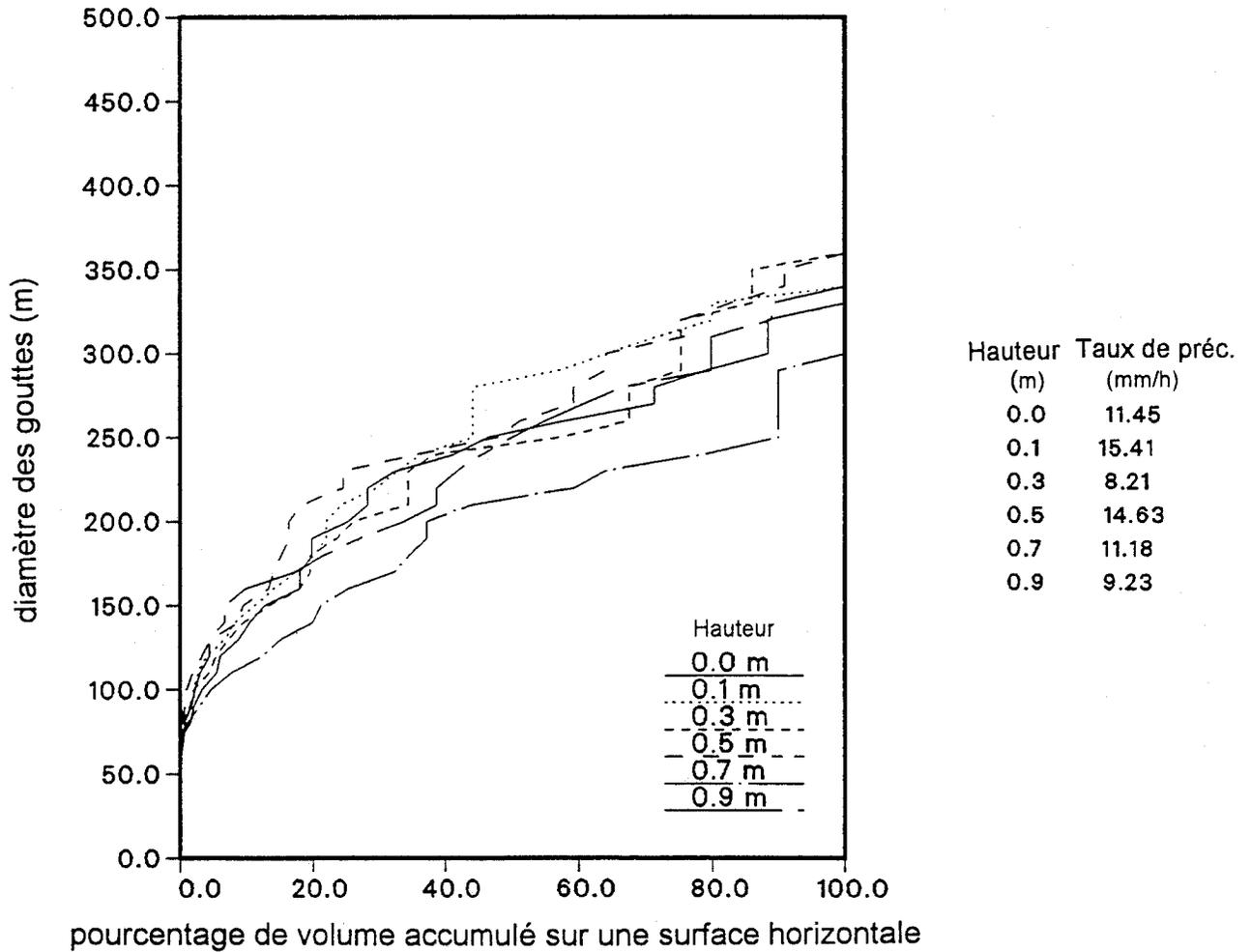


Figure 5. Répartition des tailles de goutte à l'échelle du modèle depuis les buses, vitesse du vent dans le tunnel au sommet du bâtiment=1,5 m/sec

Batterie de buses, profil vertical à b=0 m
 vitesse=12 m/sec au sommet du bâtiment
 (valeurs grandeur nature)

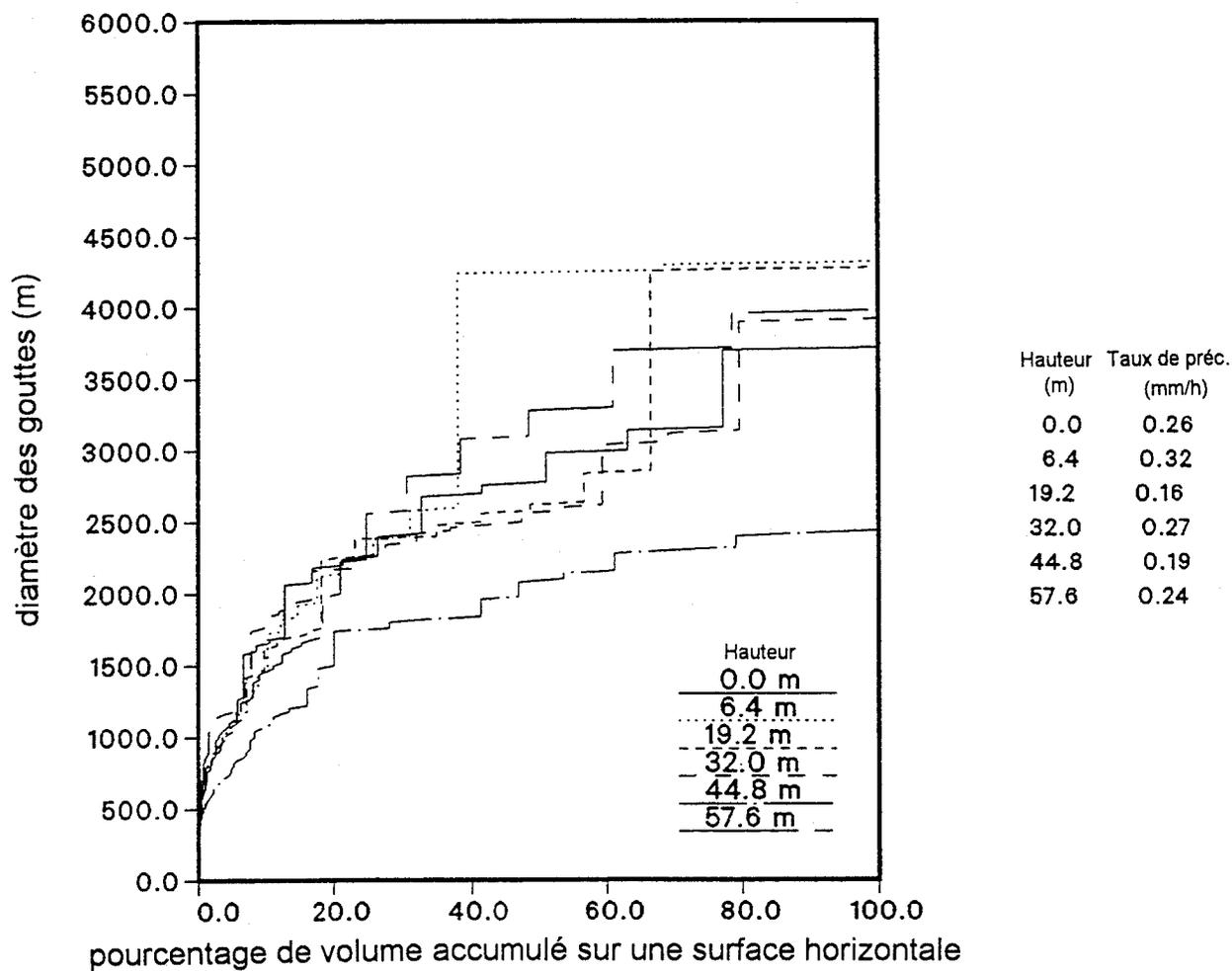


Figure 6. Répartition des tailles de goutte grandeur nature depuis les buses, vitesse du vent dans le tunnel au sommet du bâtiment=12 m/sec

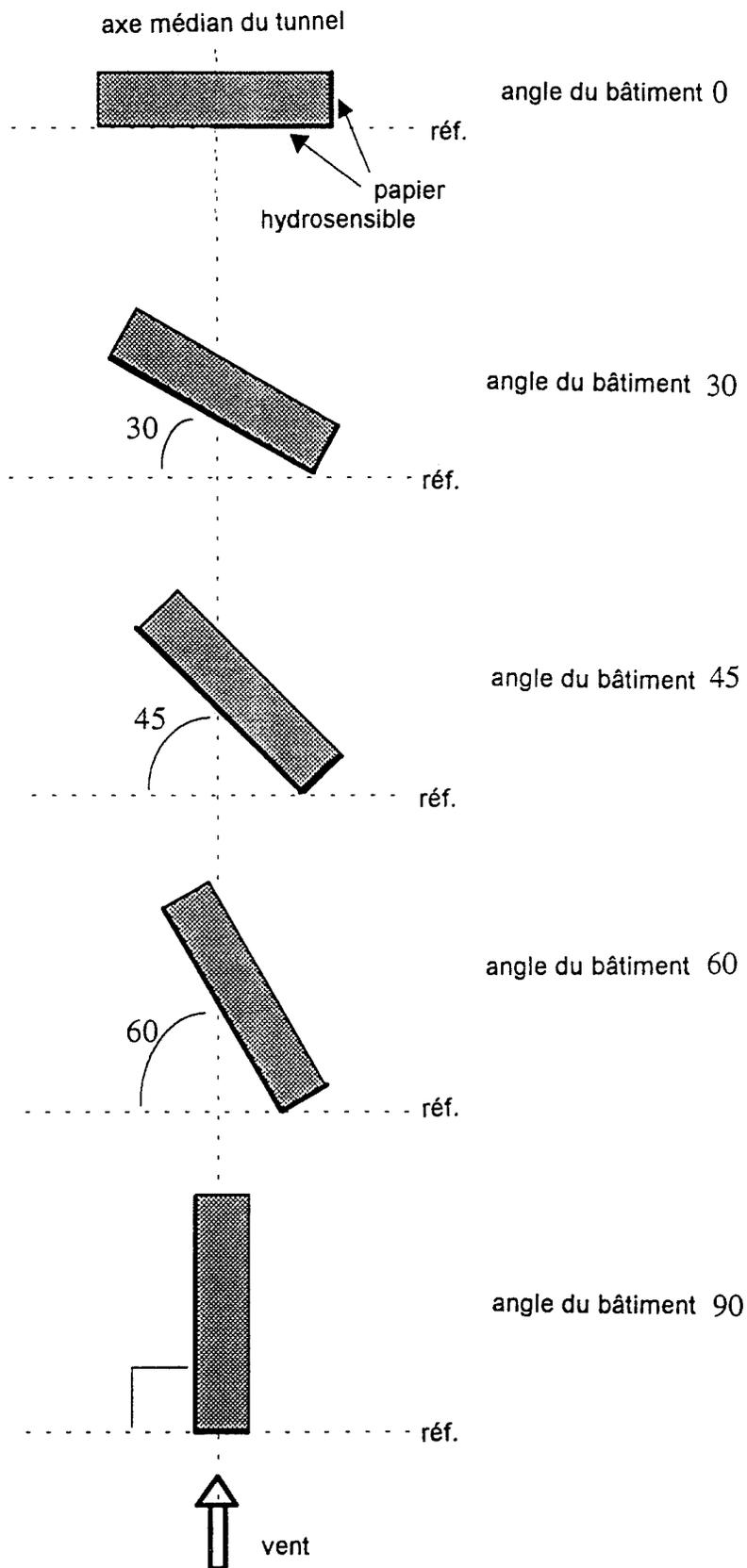
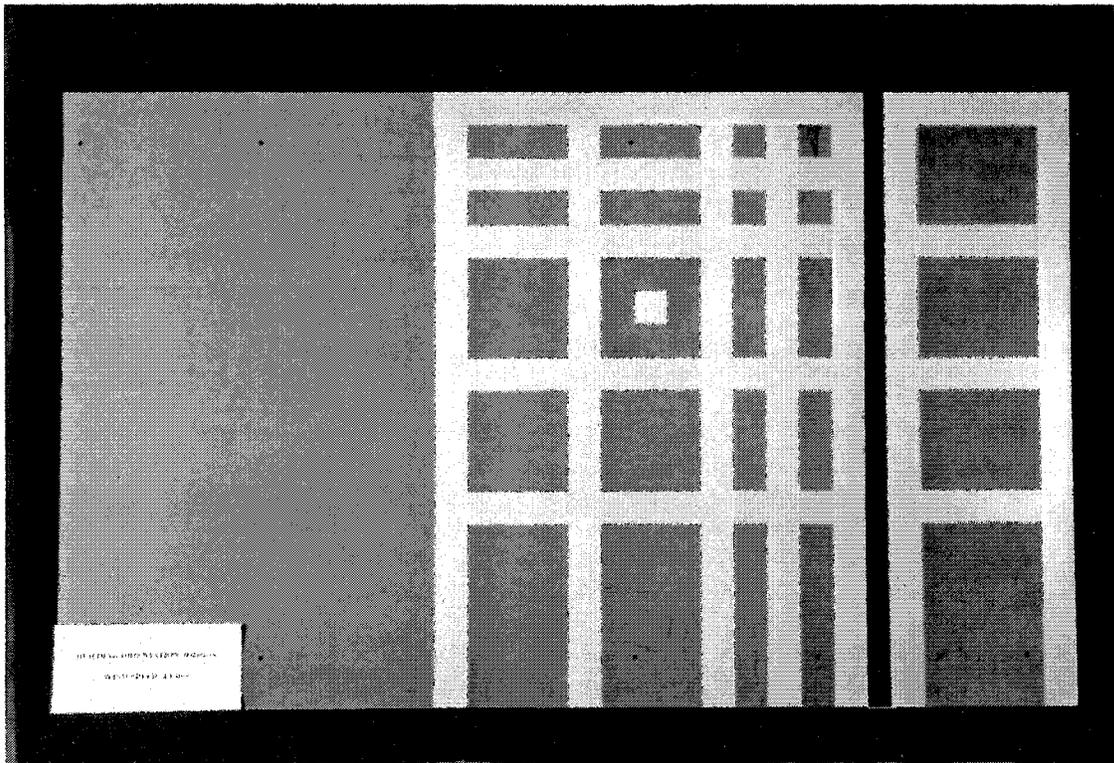
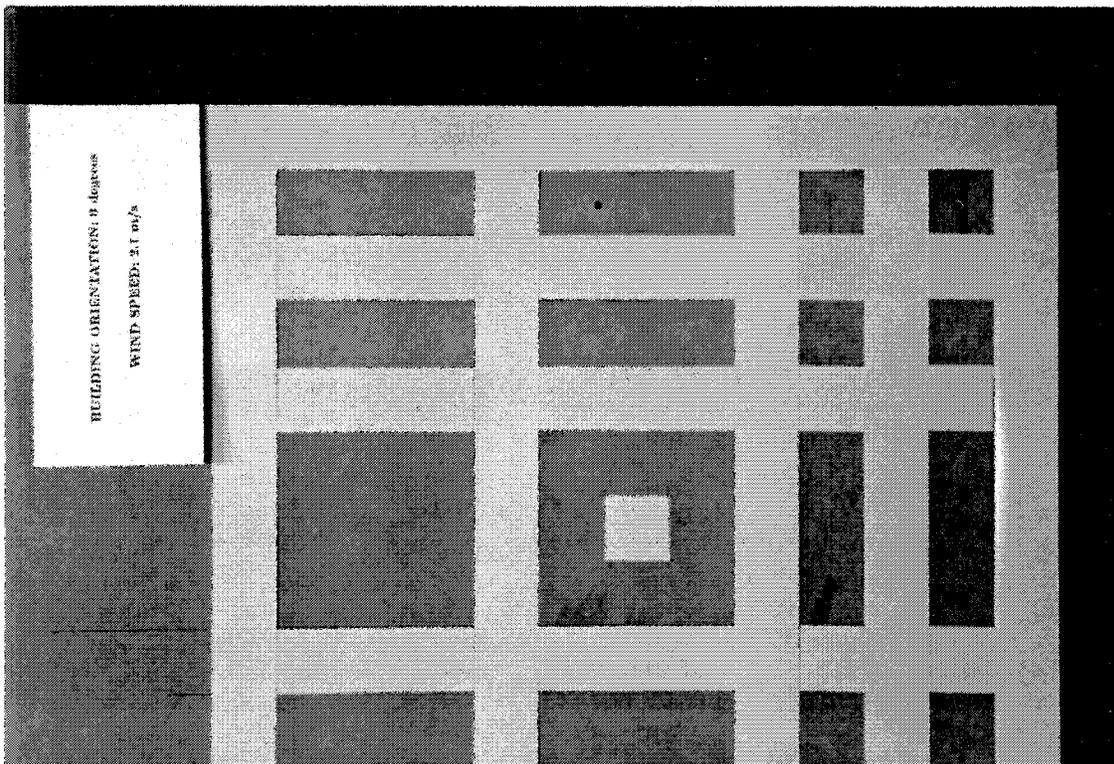


Figure 7. Schéma des angles de bâtiment essayés, phase I

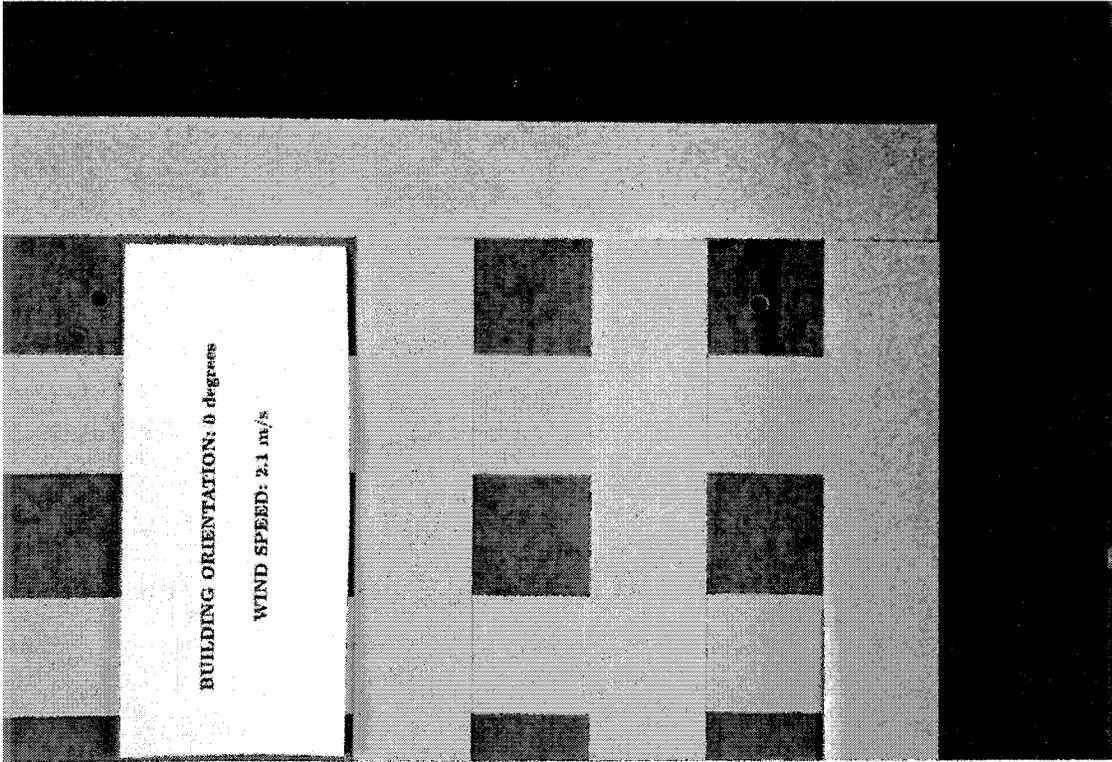


a) vue complète

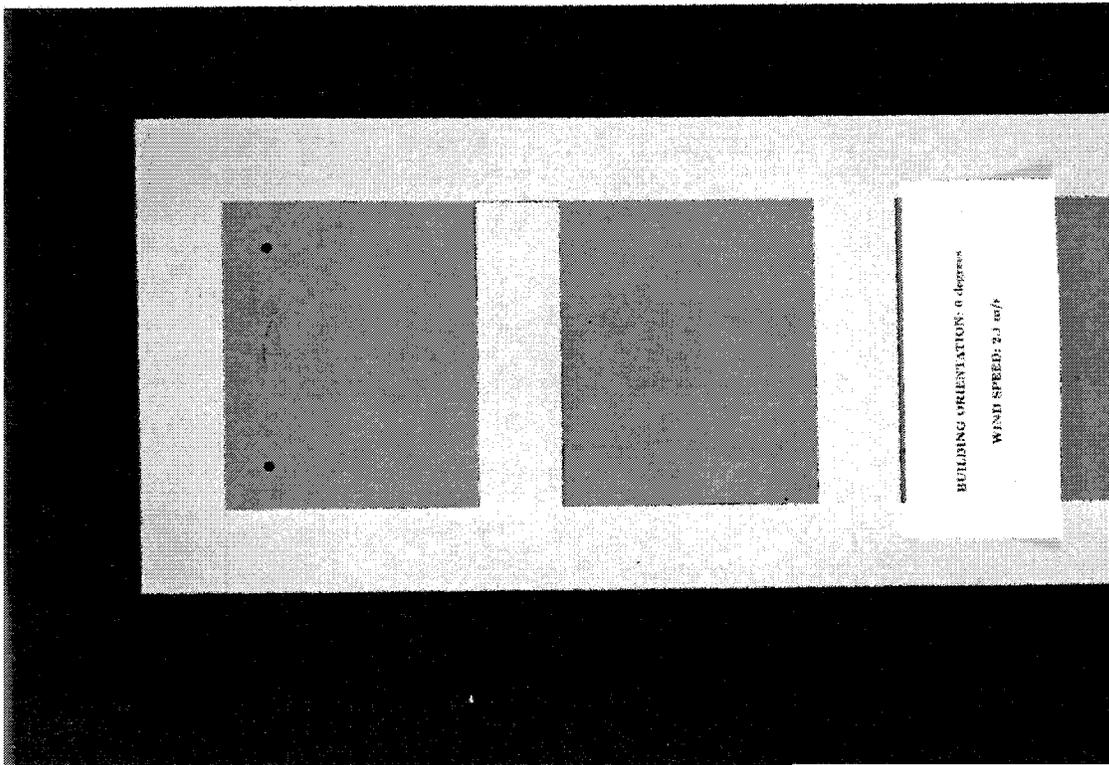


b) côté large, coin supérieur

Figure 8. Distribution du mouillage à la phase I, angle du bâtiment=0 degré, vitesse du vent dans le tunnel=1,5 m/sec au sommet du bâtiment



c) côté large, coin supérieur



d) côté étroit, moitié supérieure

Figure 8. Suite

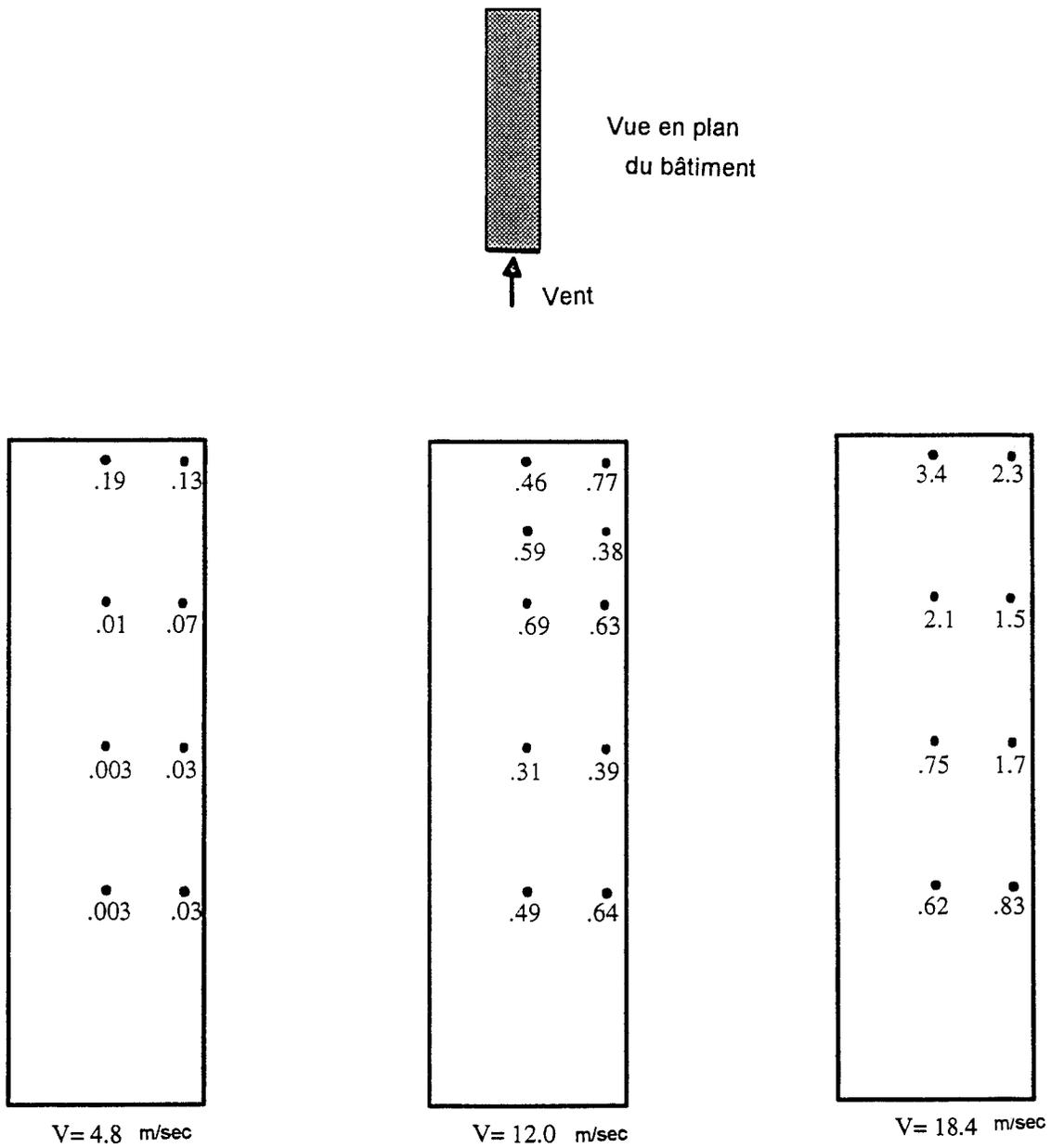
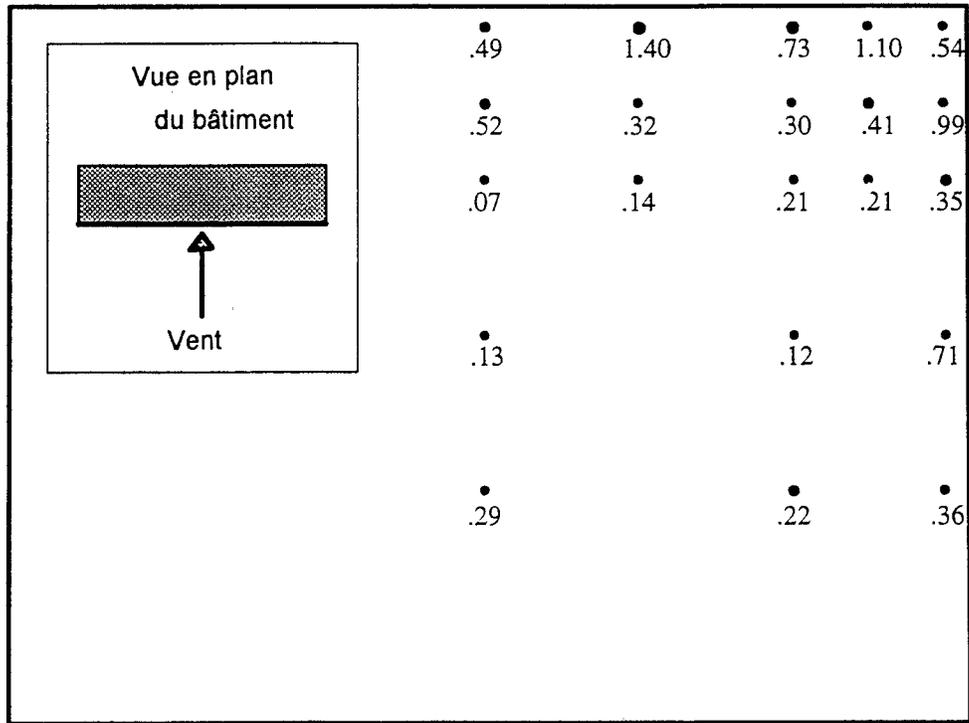
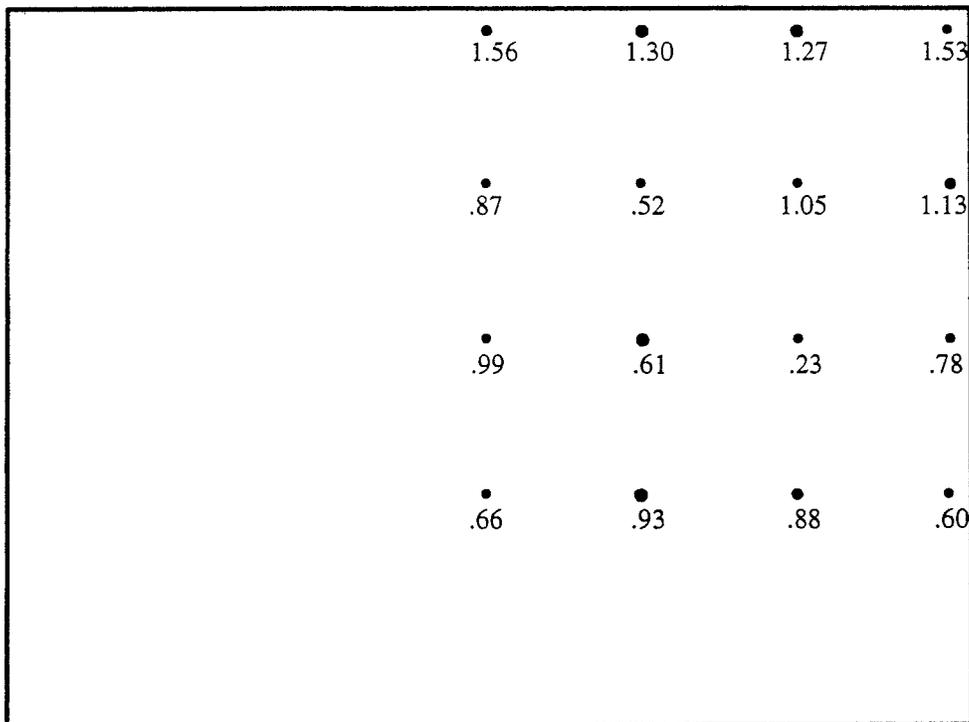


Figure 9. Facteurs d'intensité locale grandeur nature sur le côté étroit, angle du bâtiment=90 degrés

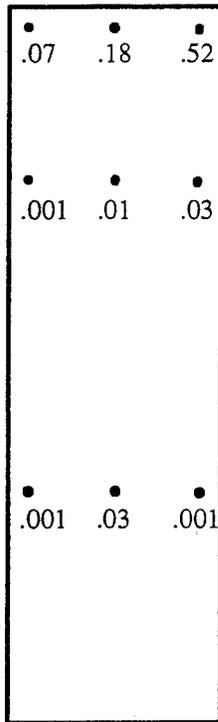
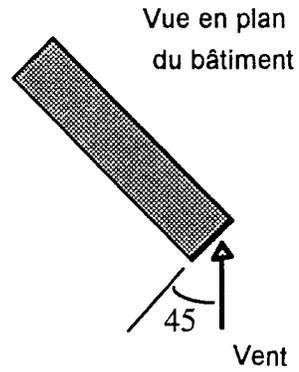
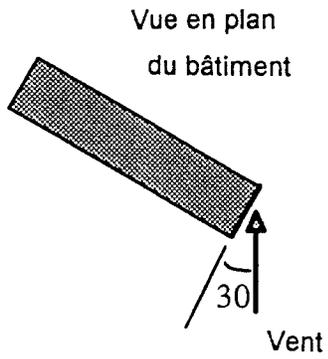


V= 12.0 m/sec

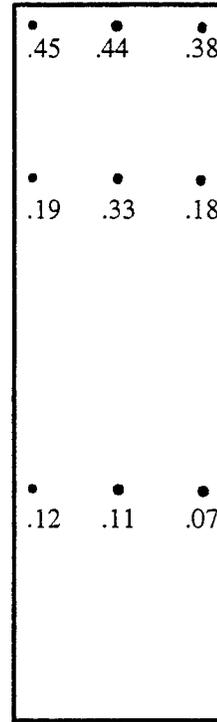


V= 18.4 m/sec

Figure 10. Facteurs d'intensité locale grandeur nature sur le côté large, angle du bâtiment=0 degrés



V= 12.0 m/sec
Angle= 30



V= 12.0 m/sec
Angle 45

Figure 11. Facteurs d'intensité locale grandeur nature sur le côté étroit, angle du bâtiment=30 et 45 degrés

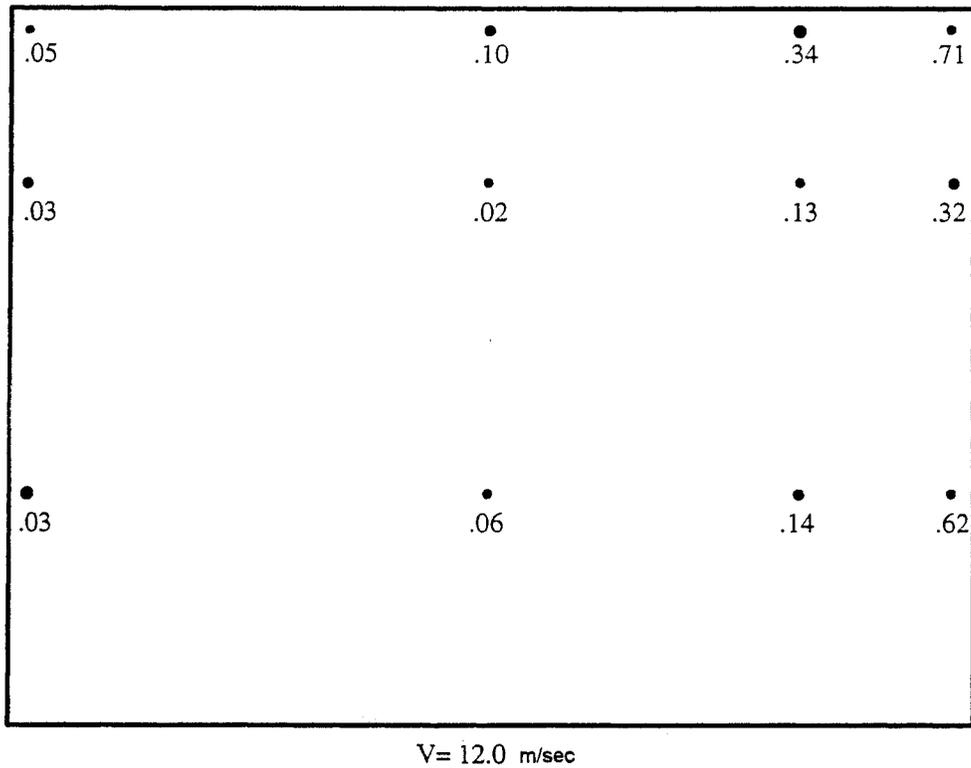
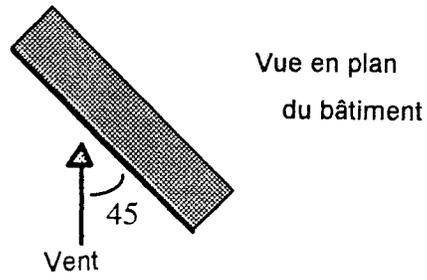
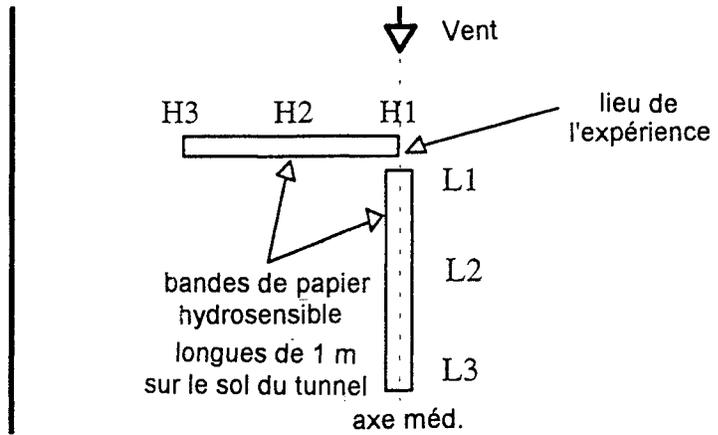


Figure 12. Facteurs d'intensité locale grandeur nature sur le côté large, angle du bâtiment=45 degrés



Endroit	Échelle du modèle		Grandeur nature	
	Vitesse de vent (m/sec)	Taux de préc. (mm/h)	Vitesse de vent (m/sec)	Taux de préc. (mm/h)
H1	0.6	20.1	4.8	0.37
H2		8.2		0.37
H3		14.2		0.23
L1		21.2		0.19
L2		17.1		0.48
L3		4.7		0.05
H1	1.5	6.6	12.0	0.11
H2		6.2		0.16
H3		6.8		0.14
L1		8.1		0.25
L2		7.2		0.15
L3		6.4		0.12
H1	2.3	2.2	18.4	0.04
H2		1.4		0.04
H3		2.5		0.03
L1		2.0		0.03
L2		1.7		0.03
L3		2.4		0.06

Tableau 1. Taux de précipitation d'un côté et le long de l'axe médian du sol du tunnel

ANNEXE A

TECHNIQUES DE MESURE DE LA TAILLE DES GOUTTES

Granulomètre MALVERN 2600 [9]

Le granulomètre Malvern 2600 est un instrument à rayon laser qui analyse la répartition des tailles dans un intervalle de 5 à 560 μ m grâce à un objectif de 300 mm. Dans notre étude, nous l'avons utilisé pour mesurer la répartition des tailles par le poids des gouttelettes d'eau dans l'air.

Le fonctionnement de l'instrument repose sur le principe de la diffraction de Fraunhofer. La lumière incidente diffractée par les particules éclairées par un rayon laser de faible puissance donne une figure de diffraction stationnaire, indépendante du mouvement des particules. Lorsque les particules traversent la zone éclairée, la figure de diffraction « évolue », reflétant toujours la répartition instantanée des tailles. Grâce à une intégration sur une période convenable et sur un flux continu de particules, un échantillon représentatif de particules contribue à la figure de diffraction ultimement mesurée. Un objectif à transformée de Fourier projette la figure de diffraction sur un détecteur photo-électrique à éléments multiples qui produit un signal analogique proportionnel à l'intensité lumineuse reçue. Un ordinateur utilise la méthode d'analyse non linéaire des moindres carrés pour trouver la répartition de tailles qui donnera la figure de diffraction concordant le mieux. L'introduction de la longueur de l'échantillon (longueur du nuage éclairé par le laser) permet de mesurer la concentration du nuage.

Posé sur le sol du tunnel aérodynamique, à l'endroit de l'expérience, afin d'analyser la répartition de la taille des gouttelettes issues d'une seule buse pour diverses vitesses de vent et distances de recul, le MALVERN a indiqué que les concentrations de l'échantillon étaient trop faibles pour une analyse précise. Malgré cela, les résultats ont semblé normaux dans la plupart des cas. Il faut remarquer que le MALVERN est un instrument assez embarrassant en ce qui concerne la circulation du vent — il fait 2,5 m de long et 0,35 m de haut. Étant donné son encombrement, il faudrait idéalement qu'il soit encastré dans le sol du tunnel, ce qui n'était pas le cas pour notre étude.

Papier hydrosensible [6]

La société Ciba-Geigy a mis au point un « papier hydrosensible ». Il s'agit d'un papier rigide, jaune d'aspect, revêtu d'une couche spéciale qui vire au bleu dès qu'elle est touchée par des gouttelettes d'eau. Ce papier a été inventé pour des applications de pulvérisation agricole.

On peut estimer rapidement la densité et la taille des gouttelettes en comparant visuellement les papiers exposés à des cartes étalon. Toutefois, un analyseur d'image automatique donne une estimation plus précise à condition que la densité des

gouttelettes soit assez faible pour qu'il n'y ait pas de chevauchement. En appliquant un facteur d'« étalement » au diamètre des taches, on obtient le diamètre réel des gouttelettes. Le facteur d'étalement du laboratoire est compris entre 1/1,7 et 1/2,1 environ pour des diamètres de 100 à 600 μ m respectivement. Il est relativement insensible à l'humidité relative.

Voici quelques possibilités d'erreur découlant de l'emploi et de l'analyse du papier hydrosensible dans notre étude :

- Vu la quantité d'eau pulvérisée dans le tunnel, les essais étaient nécessairement courts pour que les taches restent distinctes. Les reprises d'essai montrent par conséquent une certaine variance.
- Dans les zones les plus fortement mouillées, il est pratiquement impossible d'éviter le chevauchement des taches sur le papier. Il s'ensuit que, en moyenne, les tailles sont grossies à l'analyse. Si les chevauchements sont éliminés de l'analyse au moyen de l'analyseur d'image automatique, les résultats sont faussés.
- L'utilisation de l'analyseur d'image automatique exige du jugement pour la comparaison de la taille de l'image affichée à l'image réelle.
- Le facteur d'étalement est publié pour des gouttelettes d'eau atteignant le papier à la vitesse terminale. Dans le tunnel, la vitesse à l'impact est plus élevée par suite de la composante horizontale de la vitesse due au vent.
- Aux grandes vitesses de vent, la forme des taches devient ovale. Le diamètre équivalent utilisé alors pour calculer le facteur d'étalement risque de ne pas apporter la correction exacte.

Analyse de la répartition de la taille des gouttes et des taux de précipitation et de mouillage

Malgré le nombre des erreurs signalées ci-dessus, nous avons utilisé le papier hydrosensible et l'analyseur d'image automatique pour estimer la répartition et le volume de l'eau qui atteint *un centimètre carré* de papier hydrosensible. L'analyse a été faite à l'aide d'un micro-ordinateur équipé pour l'acquisition d'image. Le procédé a comporté deux stades parce que des taches se chevauchaient sur de nombreux échantillons de papier hydrosensible.

- Au premier stade, nous n'avons considéré que les gouttelettes *isolées*. Pour ce faire, nous avons réglé la fourchette de certains paramètres dans le programme IPPLUS, entre autres le « facteur de rondeur », et apporté des modifications à la main. Pour chaque gouttelette isolée, le programme a donné la superficie de la tache et le diamètre moyen. En appliquant les facteurs d'étalement pertinents aux diamètres moyens, on a pu déterminer les volumes d'eau représentés. Ensuite, un facteur représentant le rapport du volume total d'eau à la superficie totale de

la tache a pu être calculé en vue du deuxième stade. Les gouttelettes isolées étudiées à ce premier stade ont servi à l'estimation de la répartition de la taille des gouttes.

- Au deuxième stade, *toutes* les taches de gouttelette ont été admises dans IPPLUS. Un autre programme a « trié » les gouttelettes isolées selon leur rondeur et leur superficie. Le volume de chaque gouttelette isolée ainsi obtenu a été déterminé de même que le volume total. Bien que ce volume doive idéalement correspondre à celui du premier stade, il peut être différent parce qu'il n'y a pas d'intervention manuelle au deuxième stade pour choisir les gouttelettes isolées. La superficie totale de toutes les taches non « isolées » a été ensuite calculée, et l'application du facteur obtenu au premier stade a donné le volume d'eau représenté. Enfin l'addition des volumes des taches isolées et des taches qui se chevauchent a donné le volume d'eau total.

Les taux de précipitation ou de mouillage ont été calculés à l'aide du volume d'eau total et de la durée de l'essai.

ANNEXE B

RÉPARTITION DE LA TAILLE DES GOUTTES ISSUES DES BUSES À L'ÉCHELLE DU MODÈLE ET GRANDEUR NATURE

Batterie de buses, profil vertical à b=0 m
 vitesse=0,6 m/sec au sommet du bâtiment
 (valeurs à l'échelle du modèle)

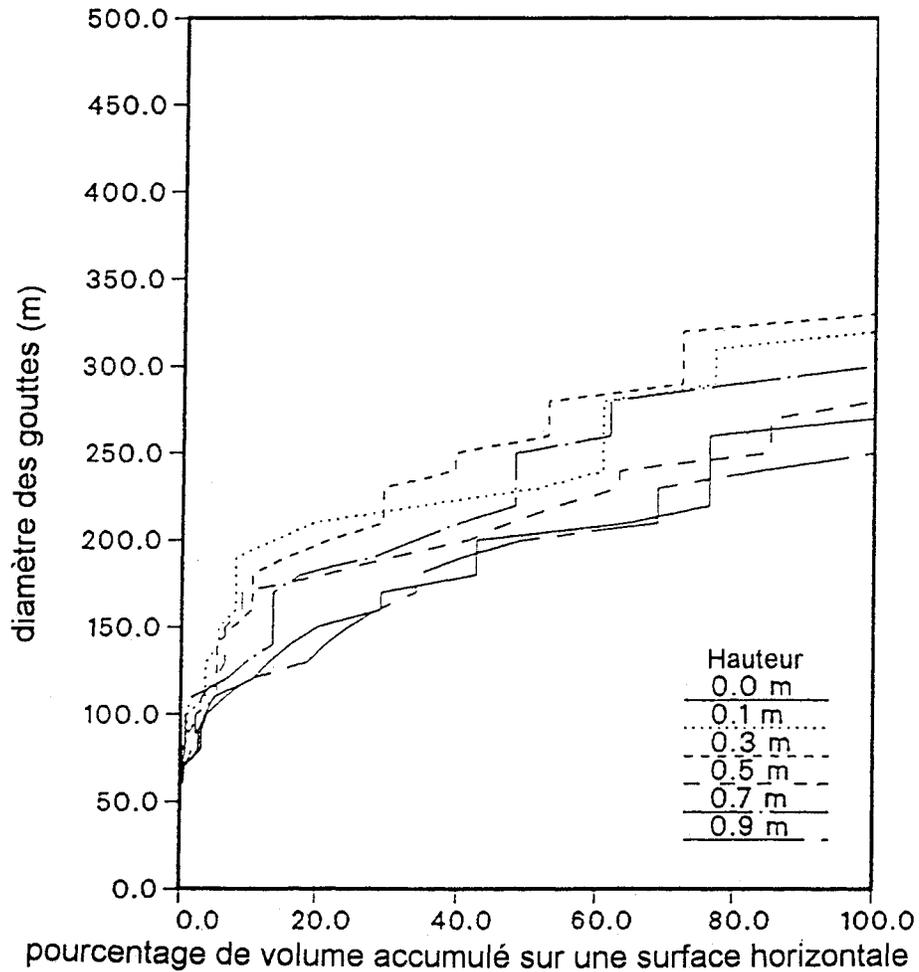


Figure B.1a. Répartition des tailles de goutte à l'échelle du modèle depuis les buses, vitesse du vent dans le tunnel au sommet du bâtiment=0,6 m/sec

Batterie de buses, profil vertical à b=0 m
 vitesse=1,5 m/sec au sommet du bâtiment
 (valeurs à l'échelle du modèle)

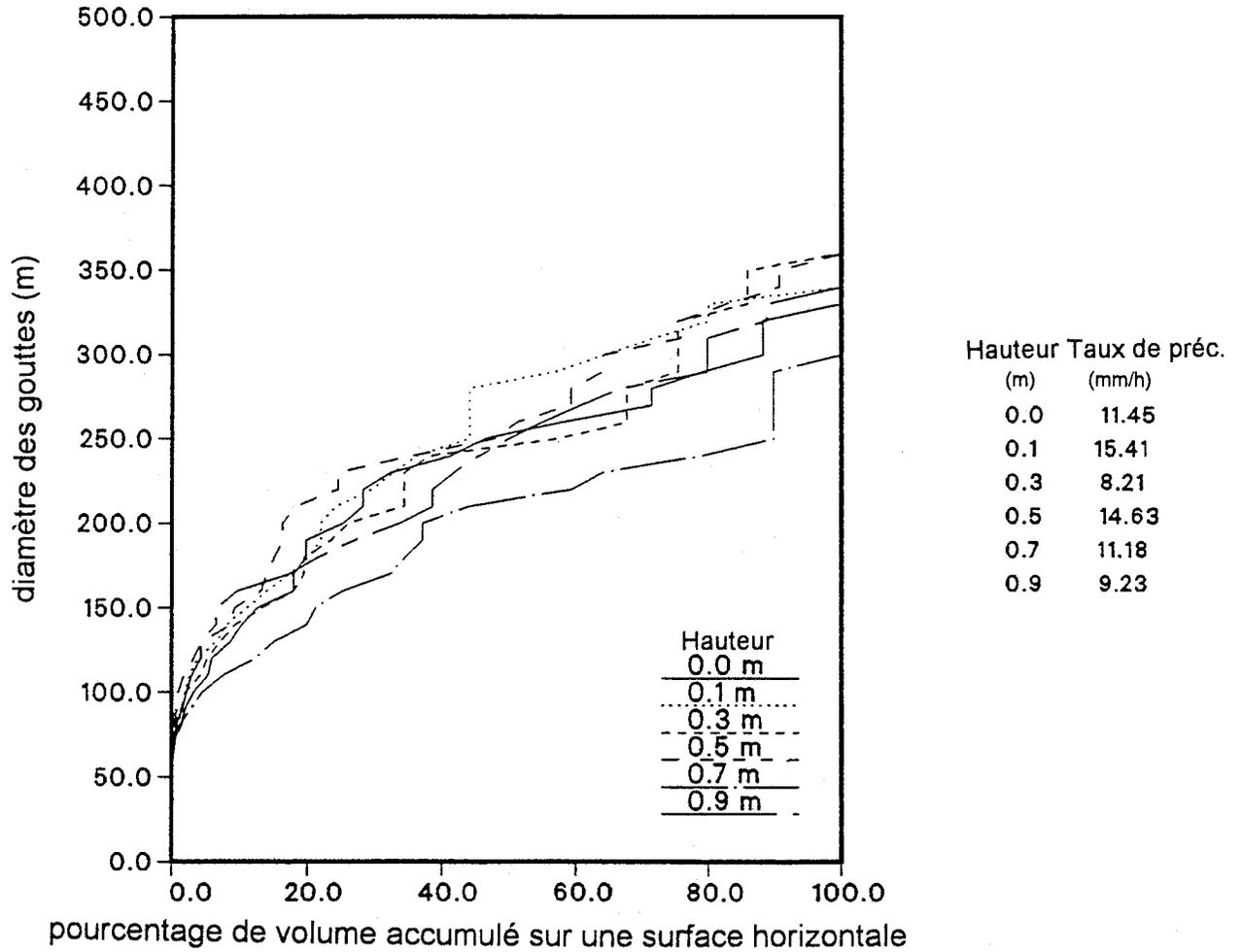


Figure B.1b. Répartition des tailles de goutte à l'échelle du modèle depuis les buses, vitesse du vent dans le tunnel au sommet du bâtiment=1,5 m/sec

Batterie de buses, profil vertical à b=0 m
 vitesse=2,3 m/sec au sommet du bâtiment
 (valeurs à l'échelle du modèle)

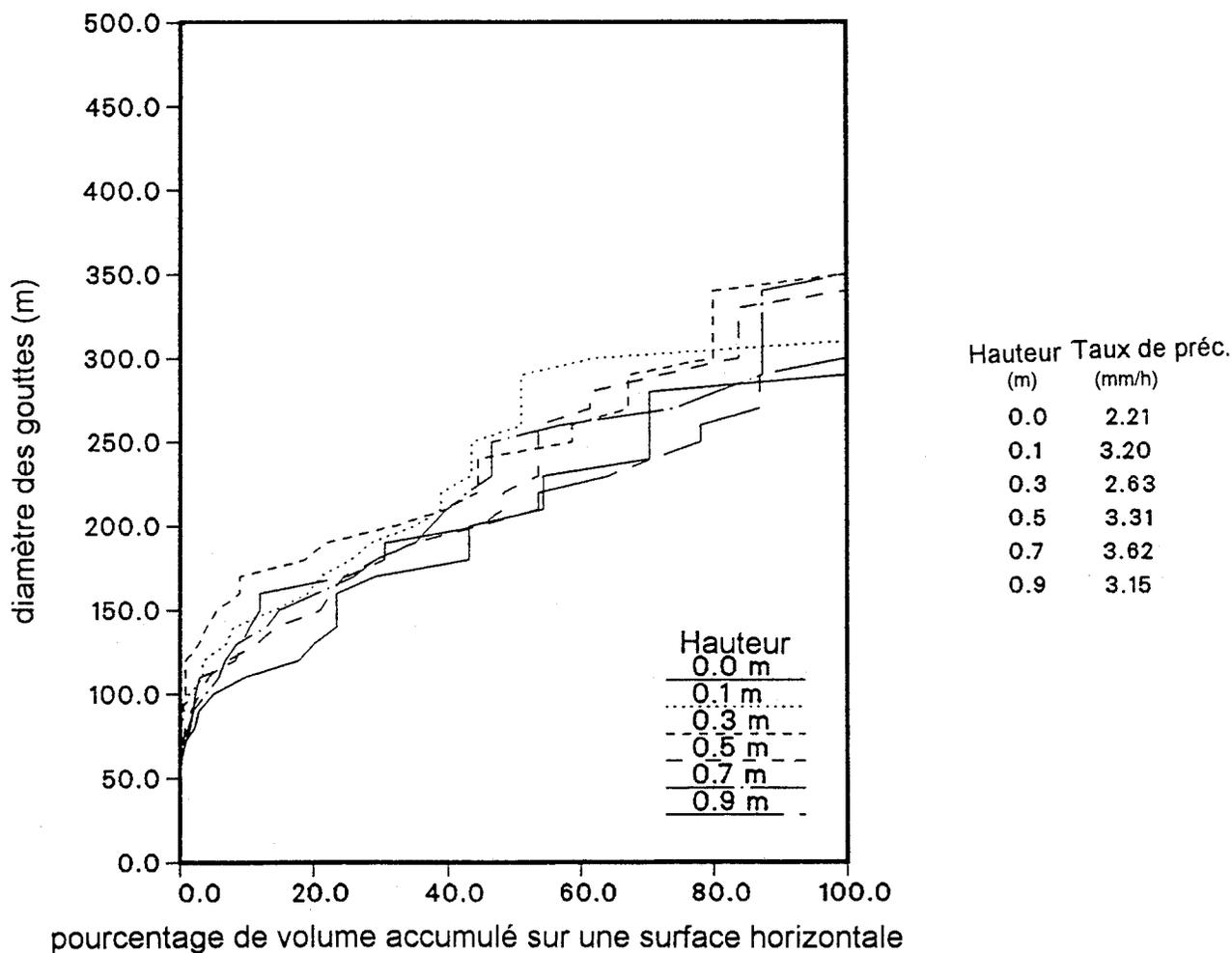


Figure B.1c. Répartition des tailles de goutte à l'échelle du modèle depuis les buses, vitesse du vent dans le tunnel au sommet du bâtiment=2,3 m/sec

Batterie de buses, profil vertical à b=0 m
 vitesse=4,8 m/sec au sommet du bâtiment
 (valeurs grandeur nature)

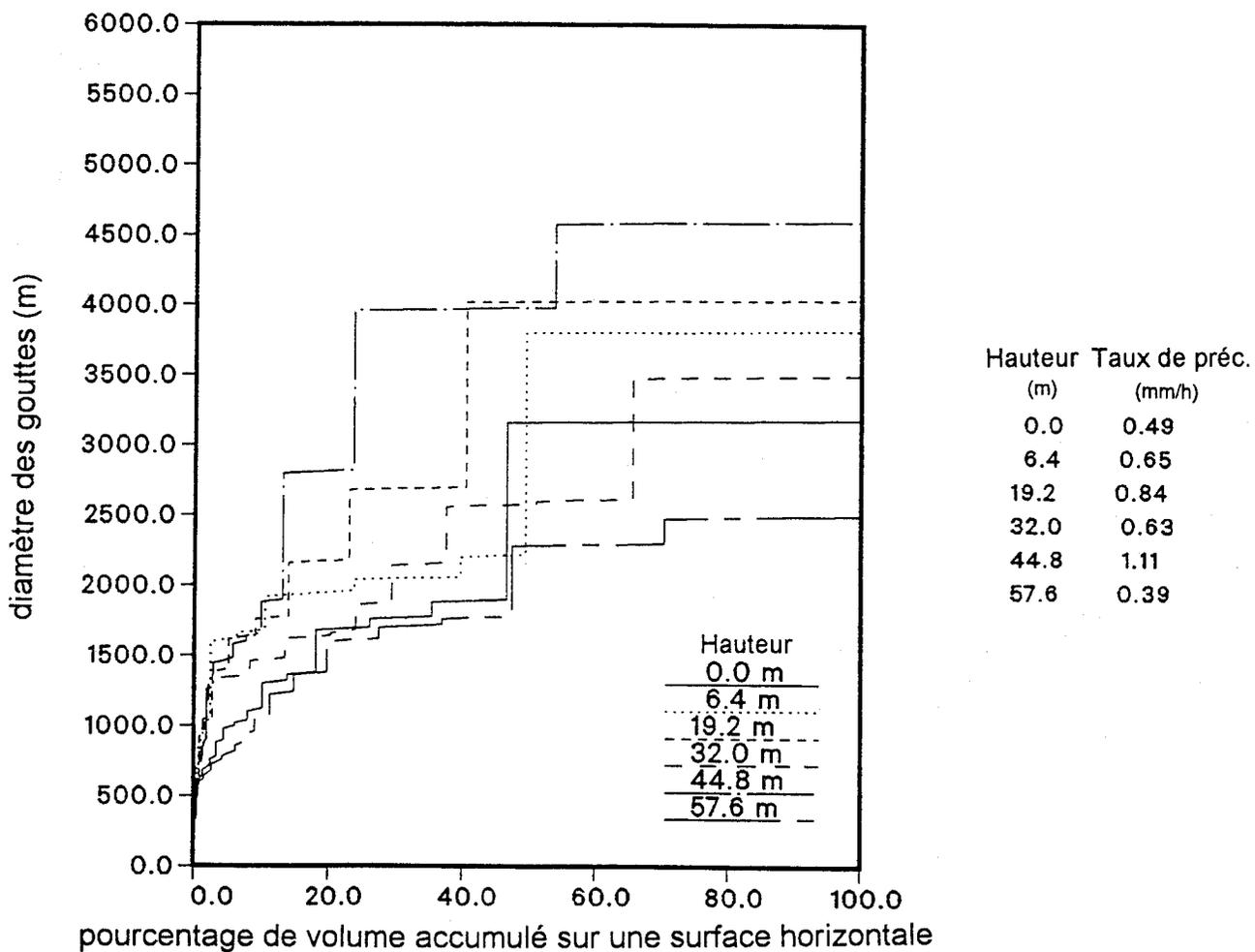


Figure B.2a. Répartition des tailles de goutte grandeur nature depuis les buses, vitesse du vent dans le tunnel au sommet du bâtiment=4,8 m/sec

Batterie de buses, profil vertical à b=0 m
 vitesse=12 m/sec au sommet du bâtiment
 (valeurs grandeur nature)

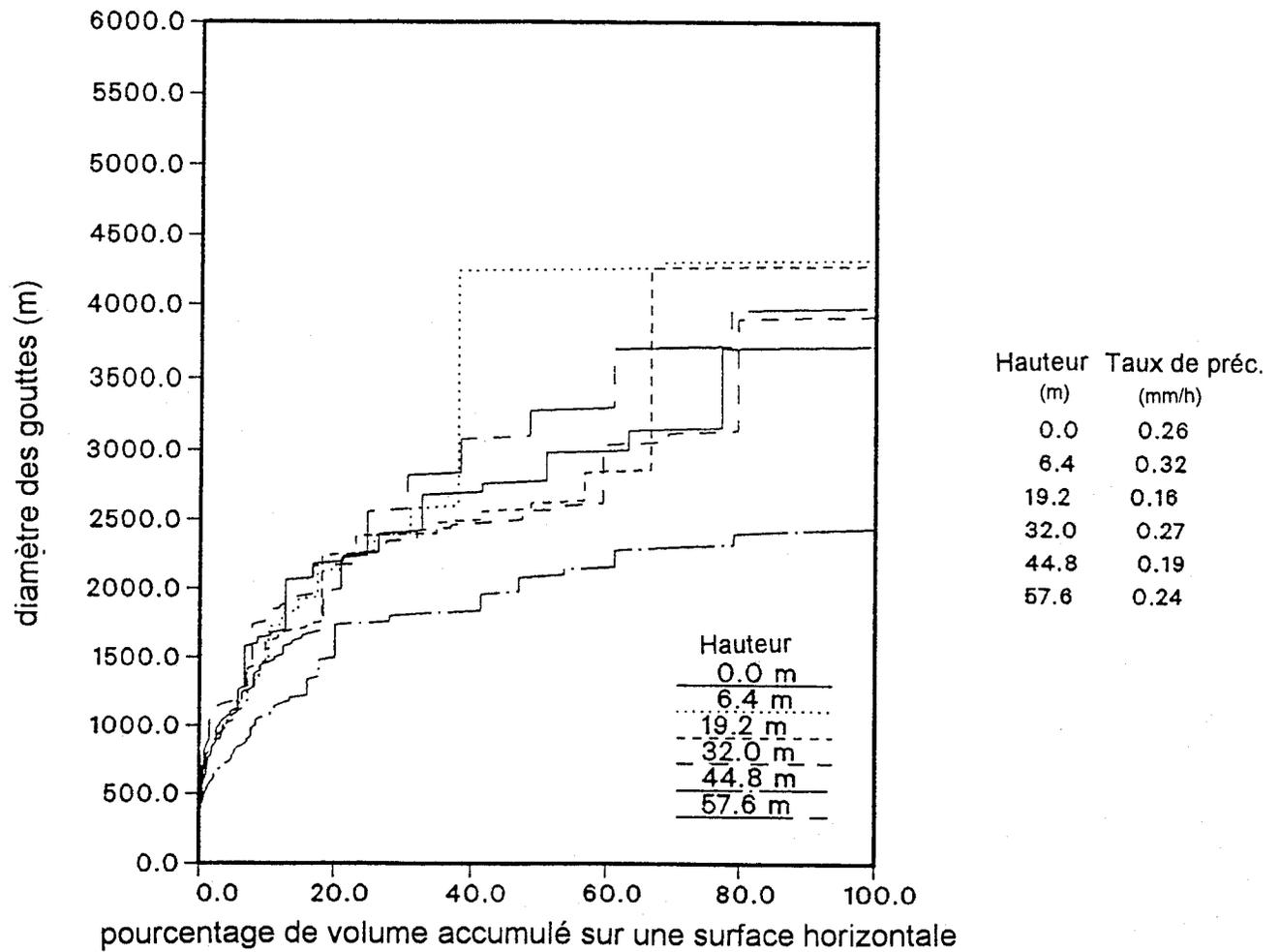


Figure B.2b. Répartition des tailles de goutte grandeur nature depuis les buses, vitesse du vent dans le tunnel au sommet du bâtiment=12 m/sec

Batterie de buses, profil vertical à b=0 m
 vitesse=18,4 m/sec au sommet du bâtiment
 (valeurs grandeur nature)

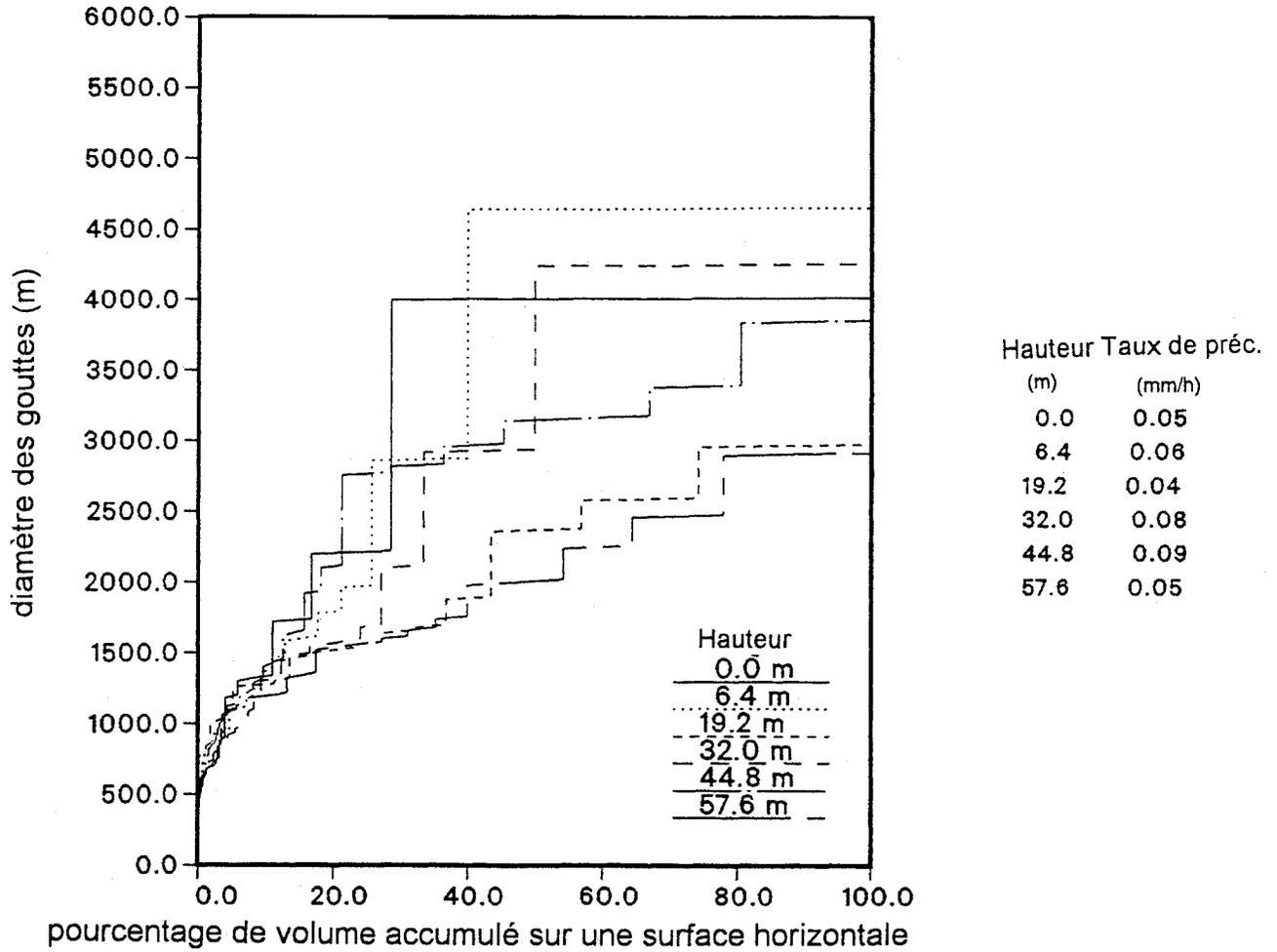


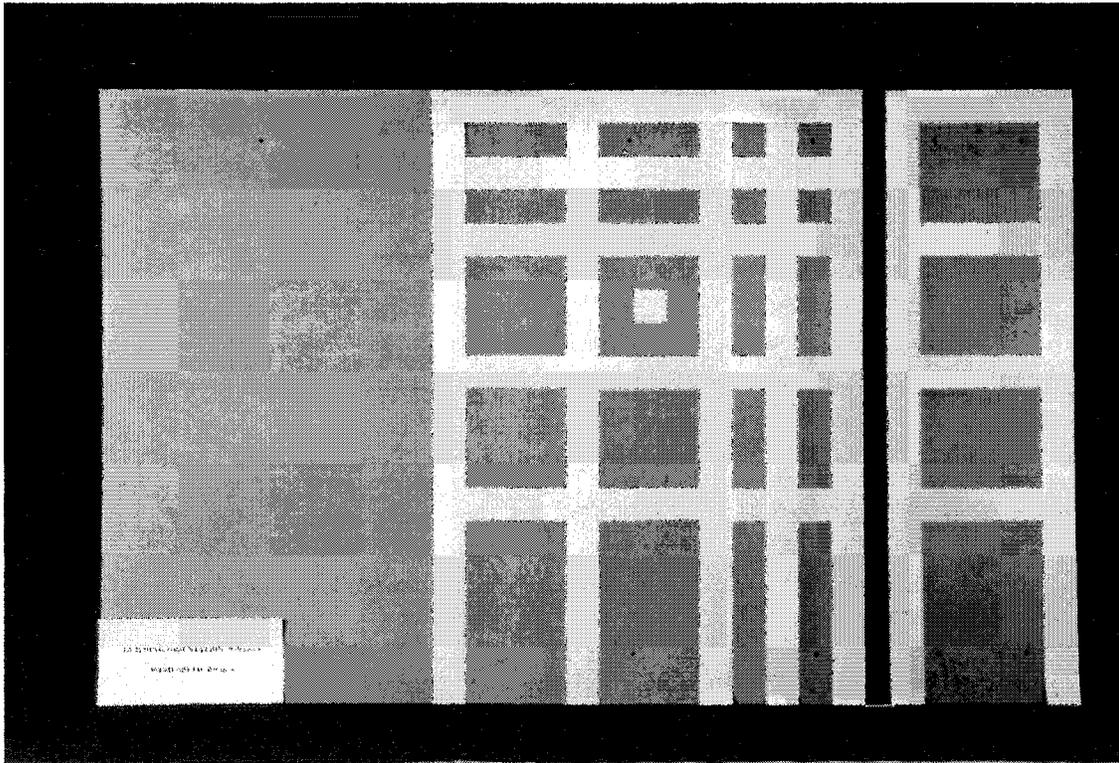
Figure B.2c. Répartition des tailles de goutte grandeur nature depuis les buses, vitesse du vent dans le tunnel au sommet du bâtiment=18,4 m/sec

ANNEXE C

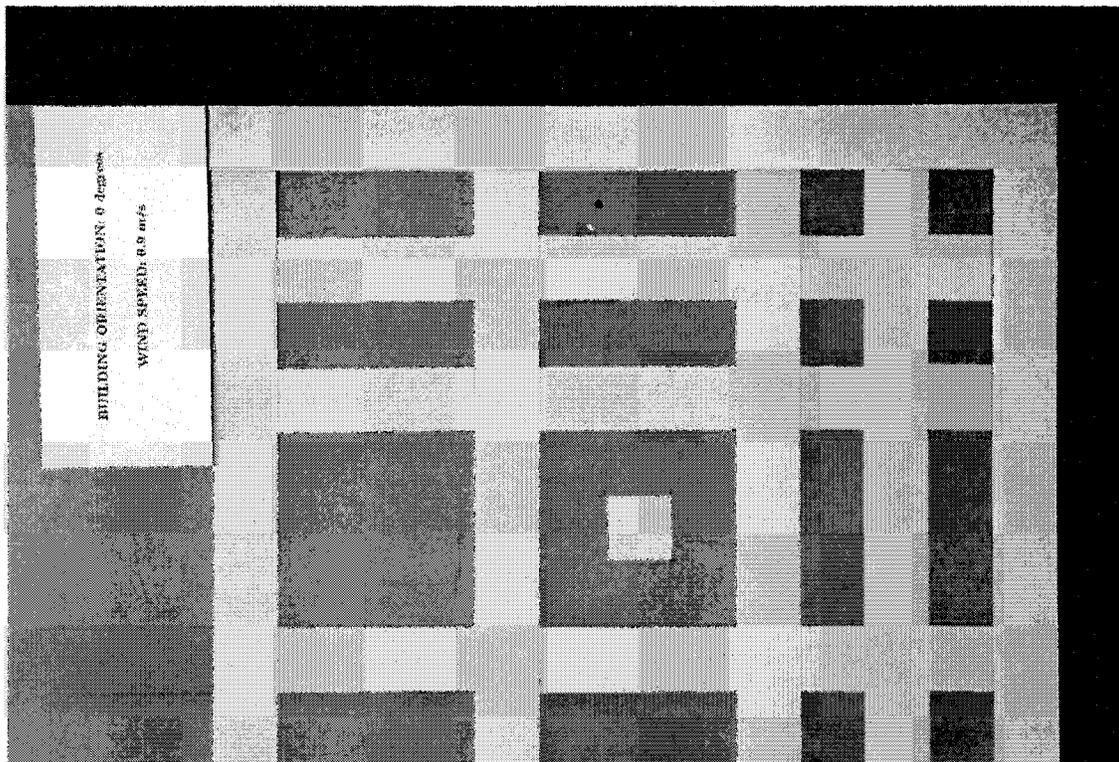
PHOTOGRAPHIES DES DISTRIBUTIONS DE MOUILLAGE DE LA PHASE I

Vitesse à H (m/sec) échelle du modèle	Angle du bâtiment (degrés)	Durée (sec) échelle du modèle	Configuration du bâtiment
0.6	0	10	référence
0.6	45	10	référence
0.6	90	10	référence
1.5	0	5	référence
1.5	30	5	référence
1.5	45	5	référence
1.5	60	5	référence
1.5	90	5	référence
2.3	0	6	référence
2.3	45	6	référence
2.3	90	6	référence
1.5	0	5	référence avec balcons
1.5	45	5	référence avec balcons
1.5	90	5	référence avec balcons
1.5	0	5	référence avec corniche

Tableau C.1. Sommaire des essais de distribution du mouillage, phase I

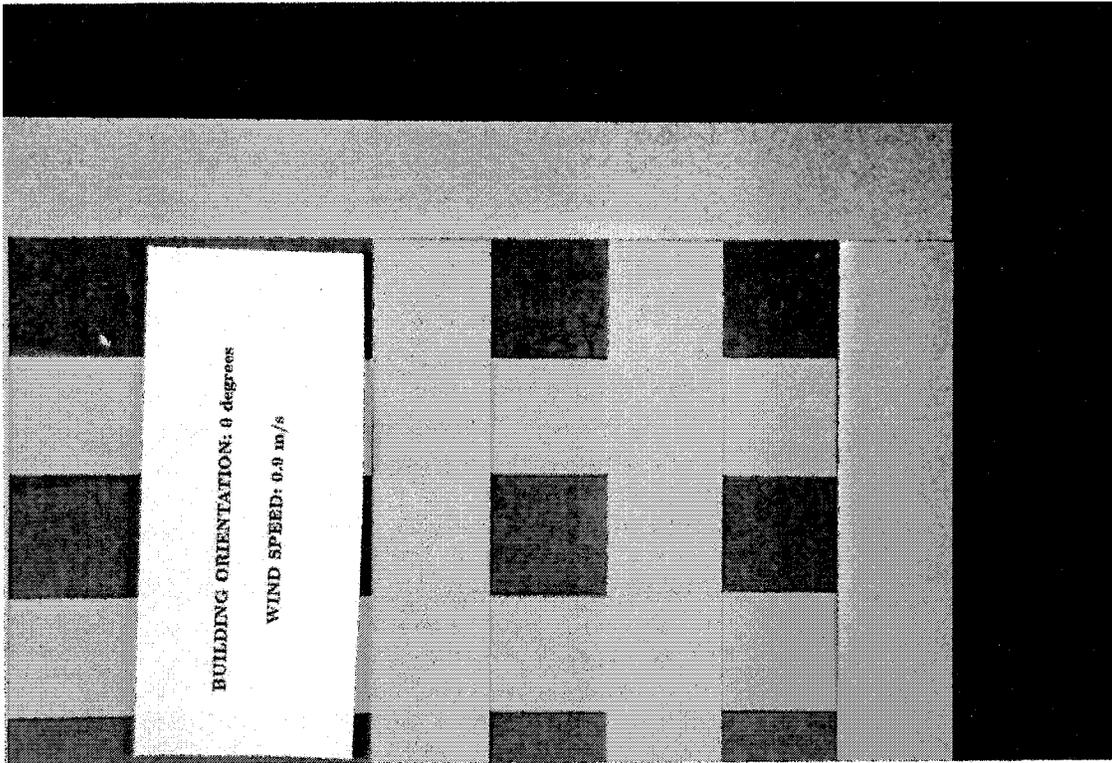


a) vue complète

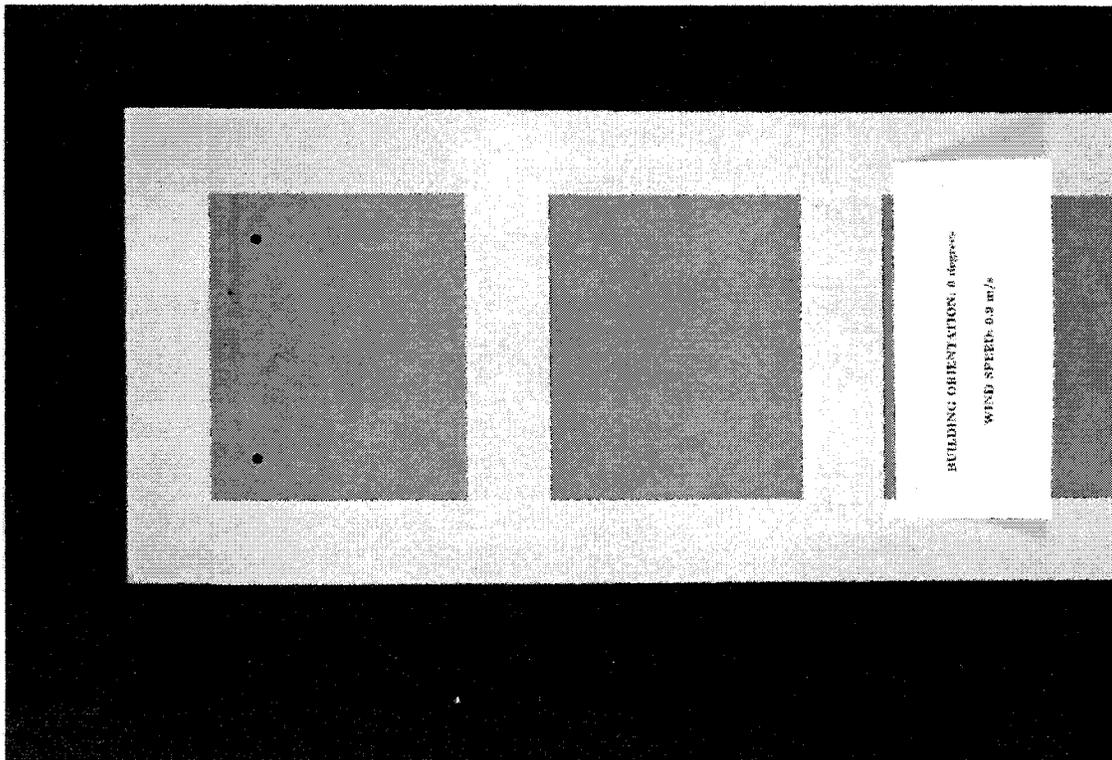


b) côté large, coin supérieur

Figure C.1 Distribution du mouillage à la phase I, angle du bâtiment=0 degrés, vitesse du vent dans le tunnel=0,6 m/sec au sommet du bâtiment

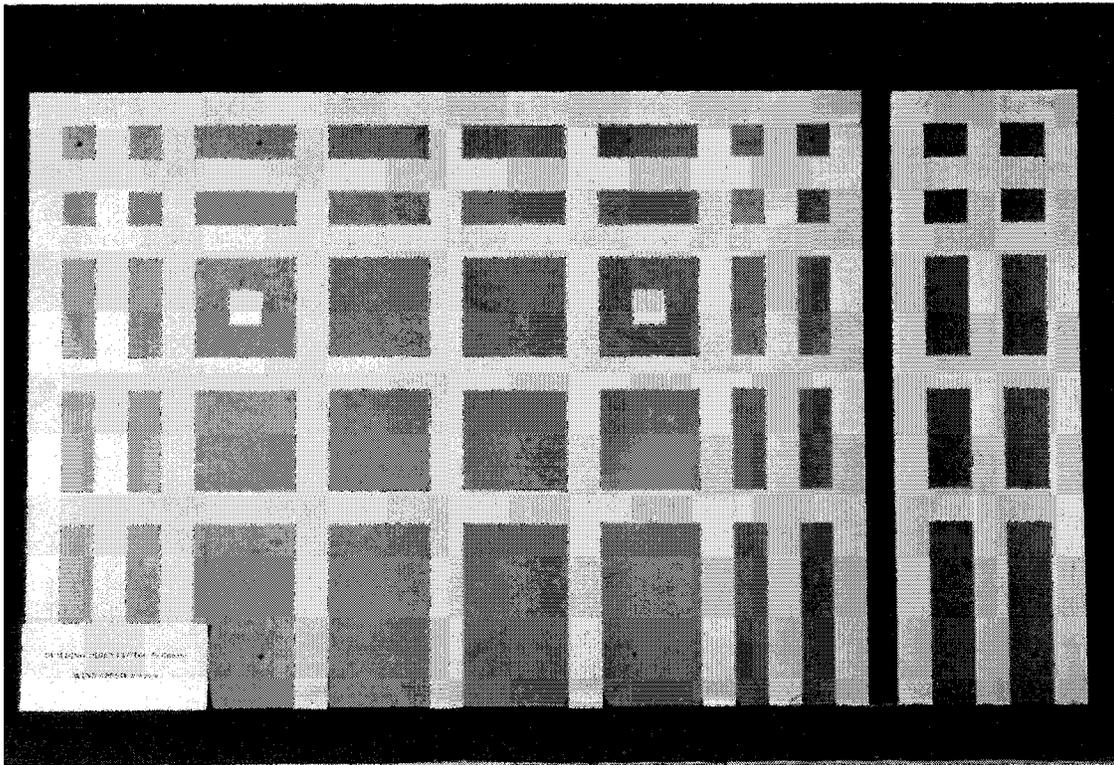


c) côté large, coin supérieur

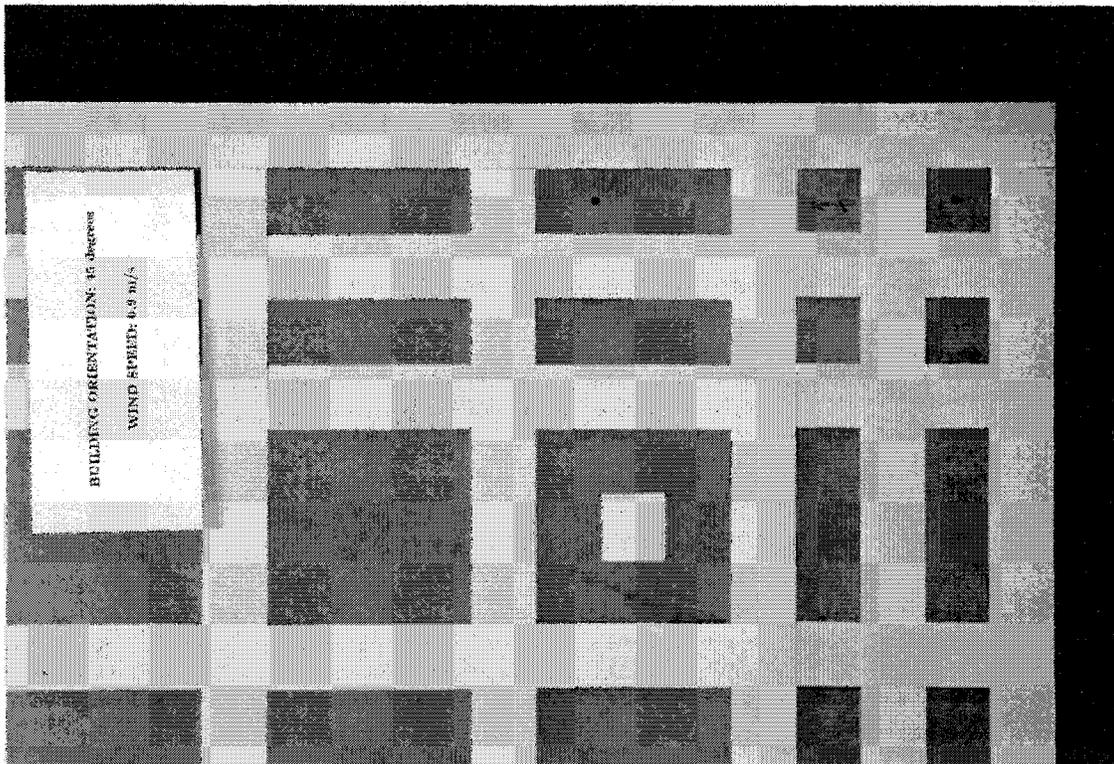


d) côté étroit, moitié supérieure

Figure C.1 Suite

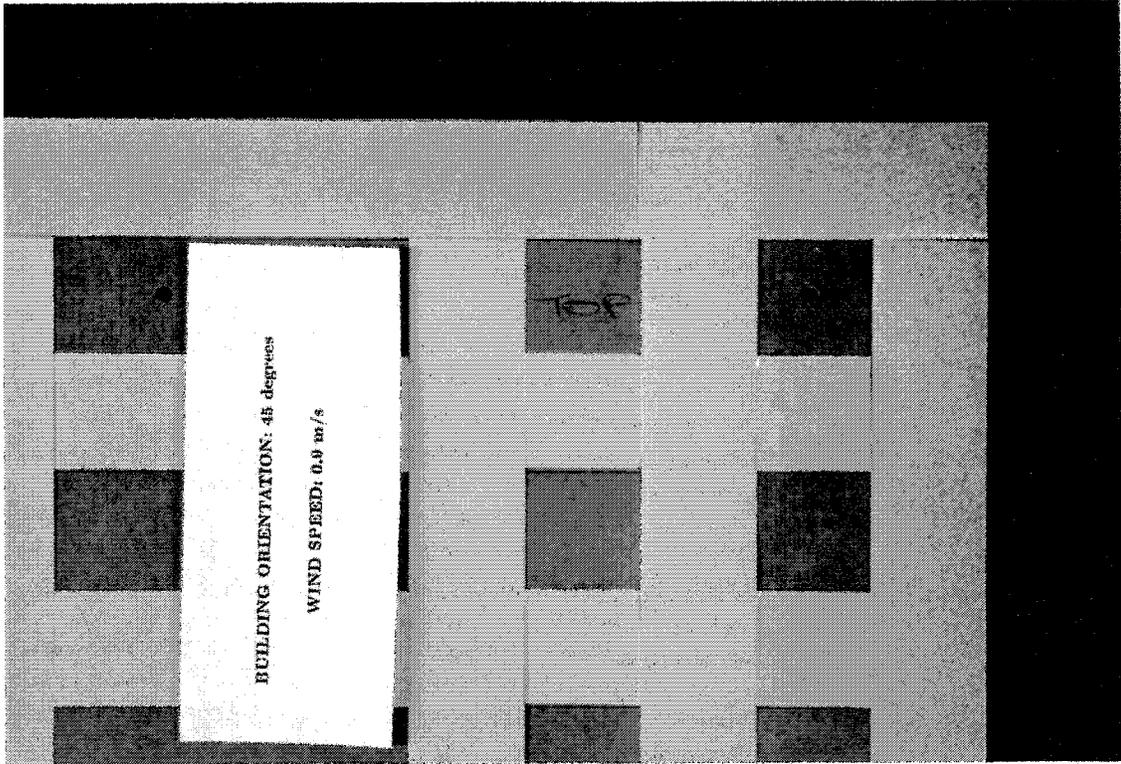


a) vue complète

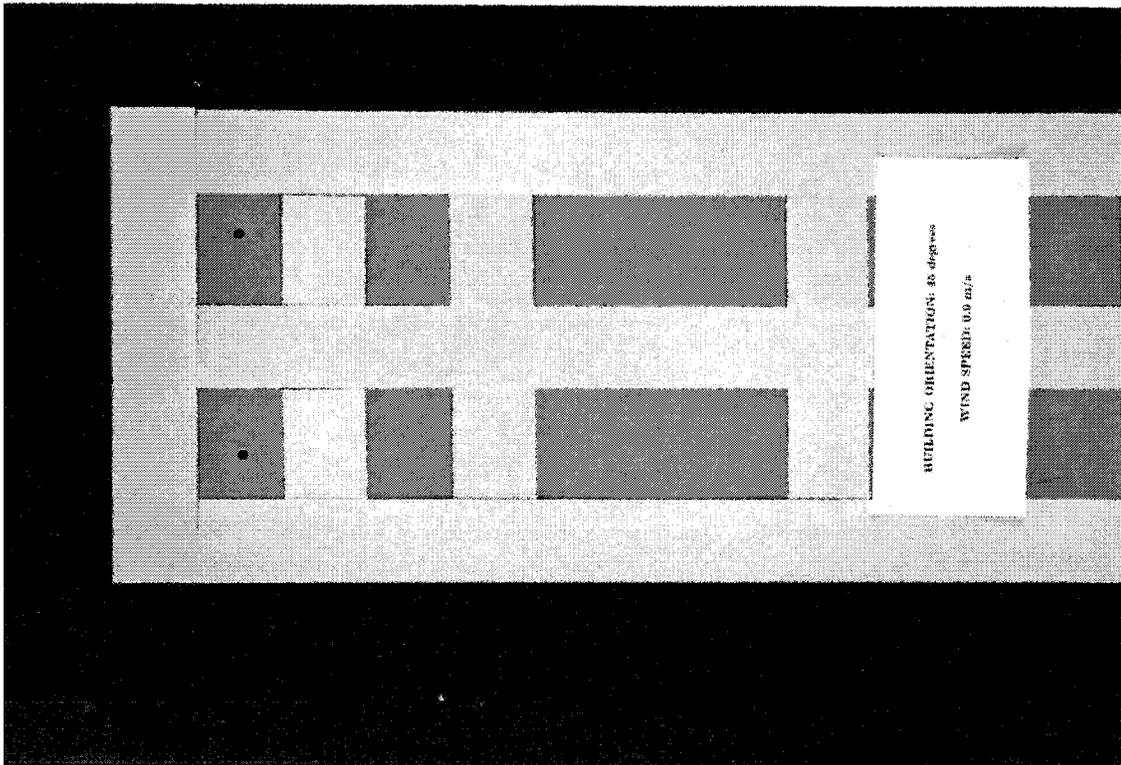


b) côté large, coin supérieur

Figure C.2 Distribution du mouillage à la phase I, angle du bâtiment=45 degrés, vitesse du vent dans le tunnel=0,6 m/sec au sommet du bâtiment

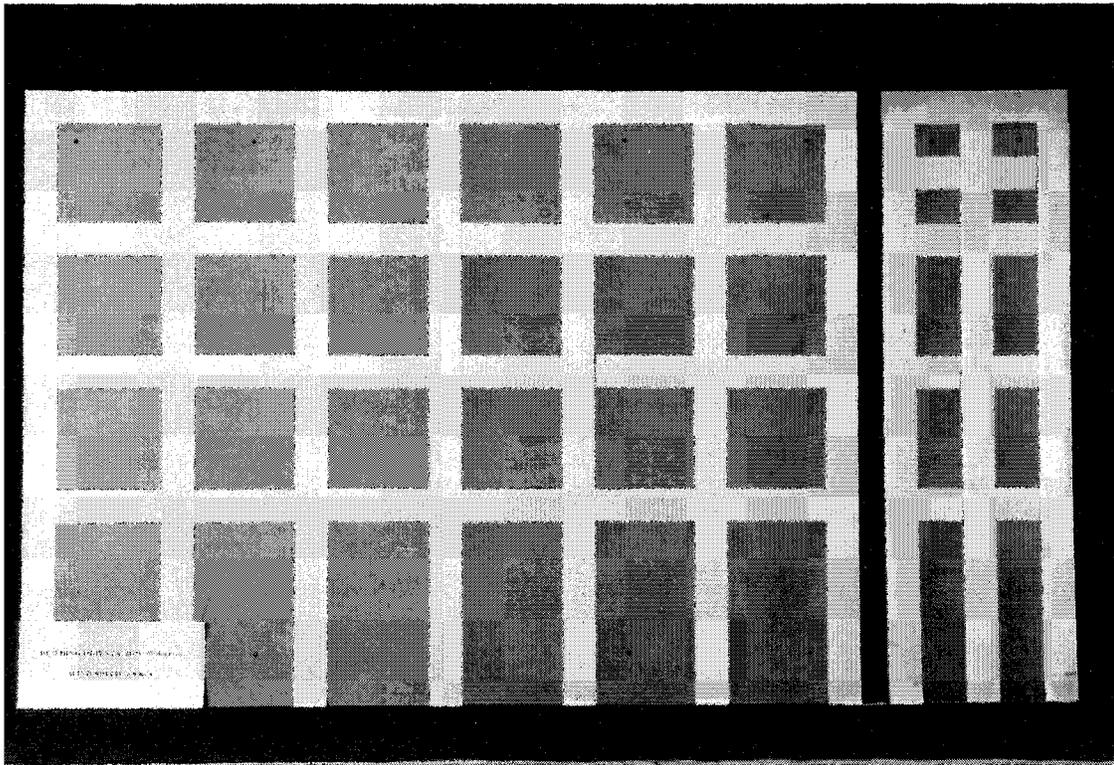


c) côté large, coin supérieur

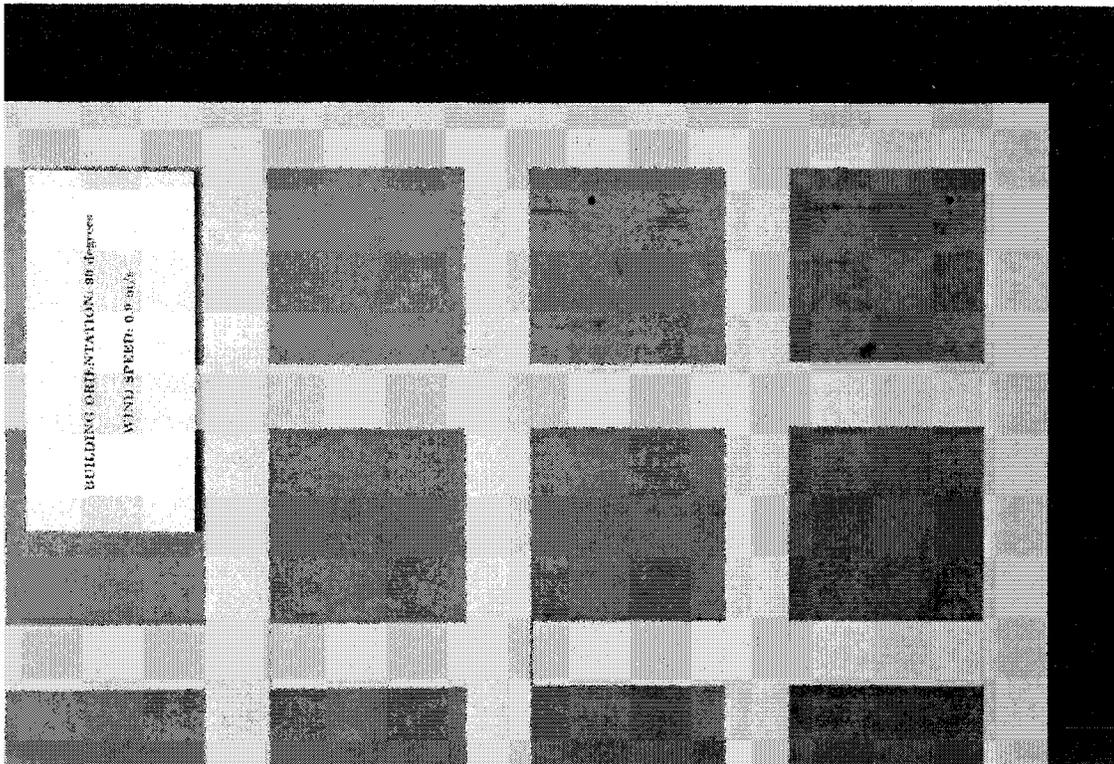


d) côté étroit, moitié supérieure

Figure C.2 Suite

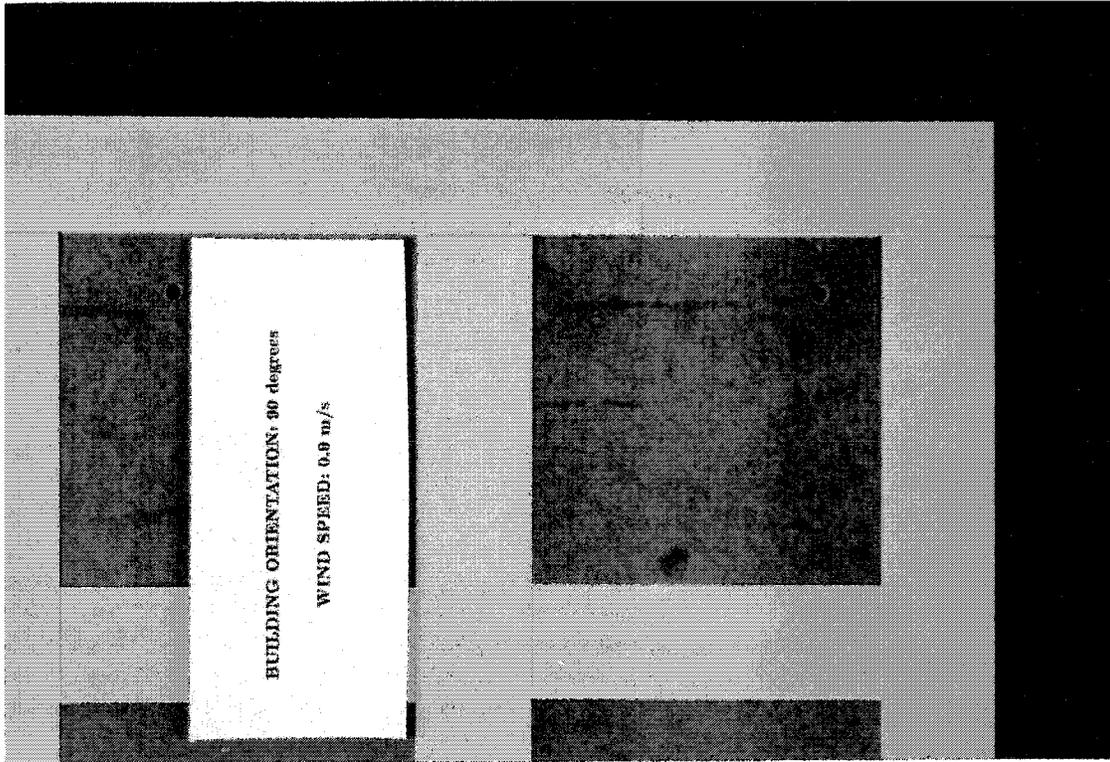


a) vue complète

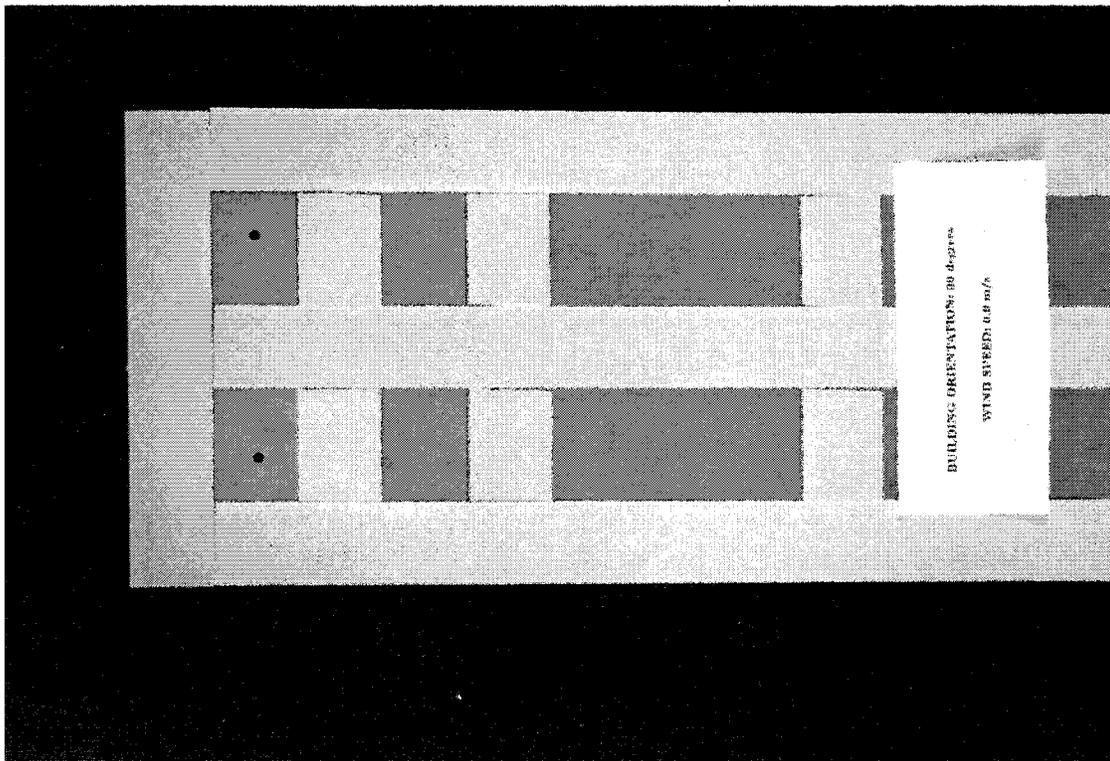


b) côté large, coin supérieur

Figure C.3 Distribution du mouillage à la phase I, angle du bâtiment=90 degrés, vitesse du vent dans le tunnel=0,6 m/sec au sommet du bâtiment

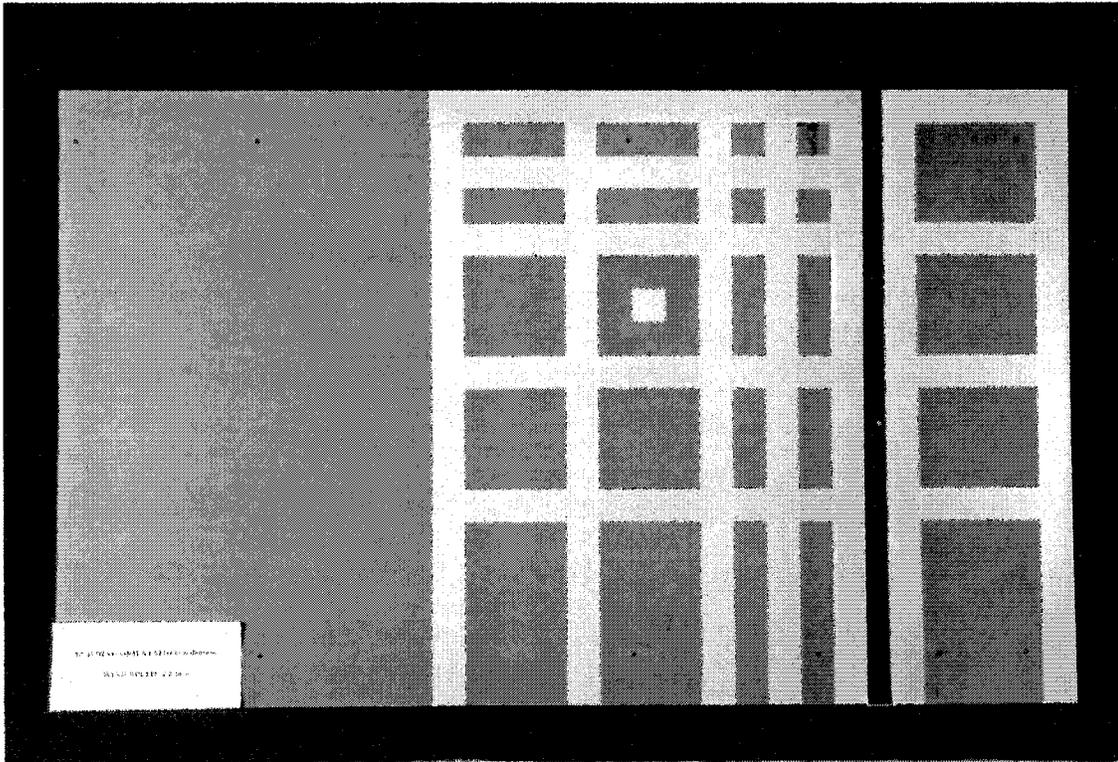


c) côté large, coin supérieur

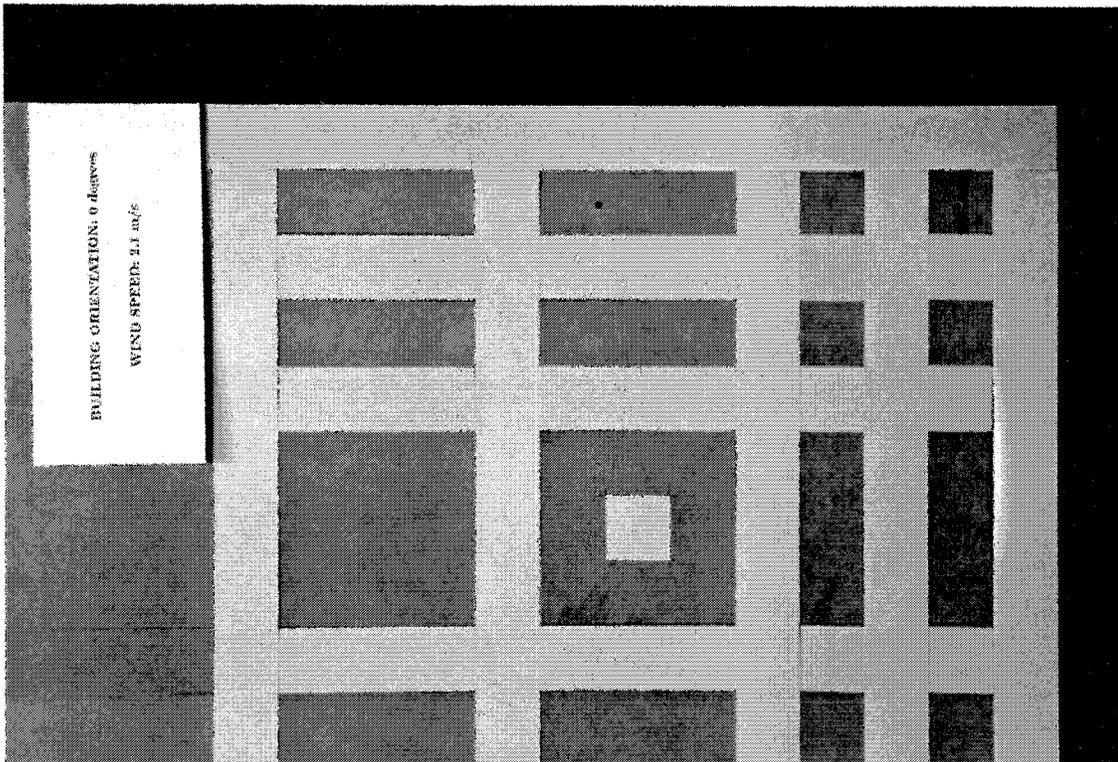


d) côté étroit, moitié supérieure

Figure C.3 Suite

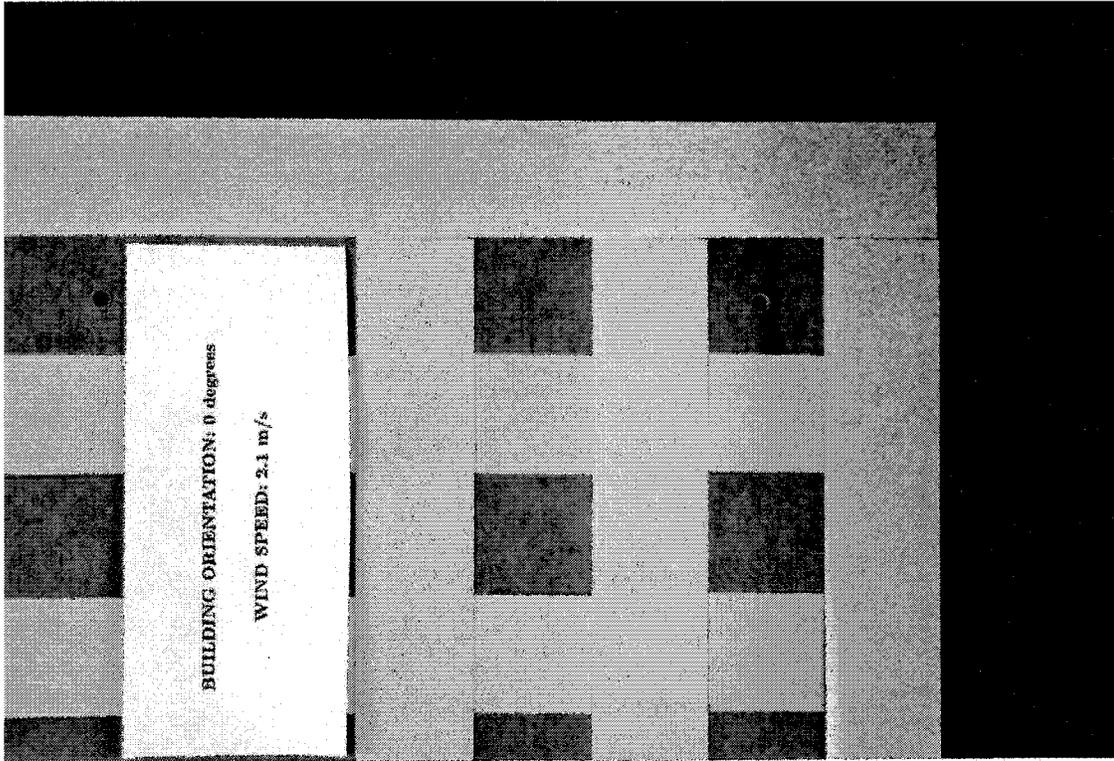


a) vue complète

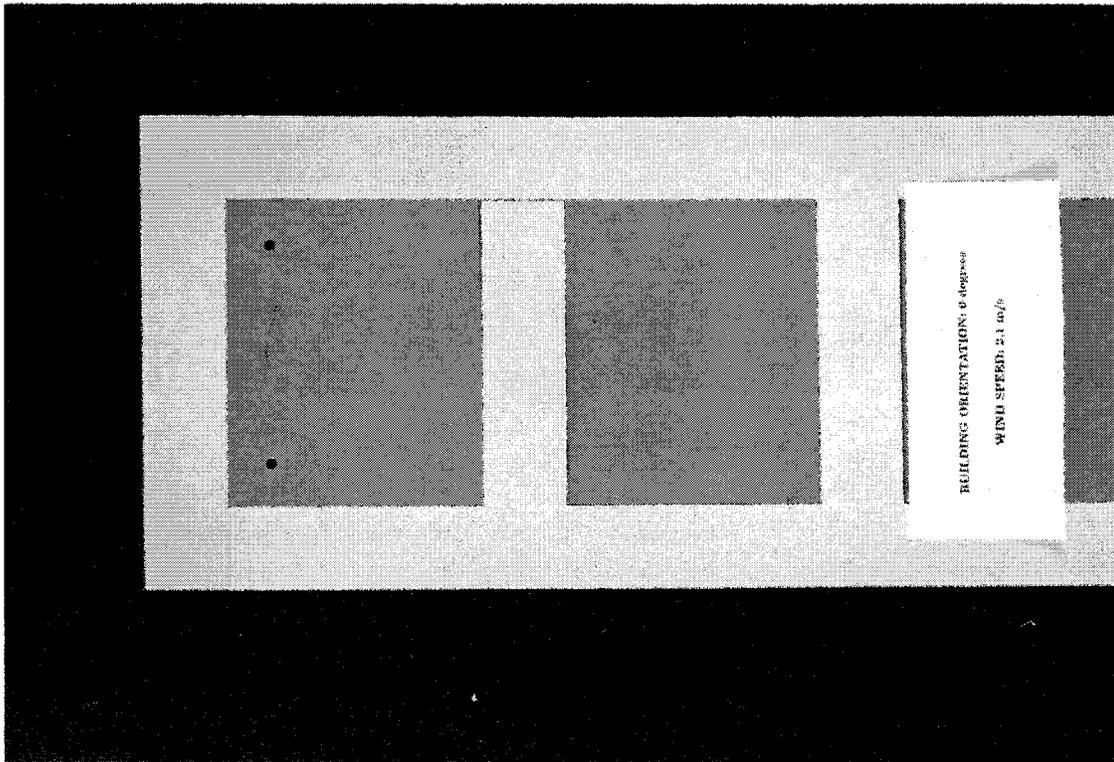


b) côté large, coin supérieur

Figure C.4 Distribution du mouillage à la phase I, angle du bâtiment=0 degrés, vitesse du vent dans le tunnel=1,5 m/sec au sommet du bâtiment

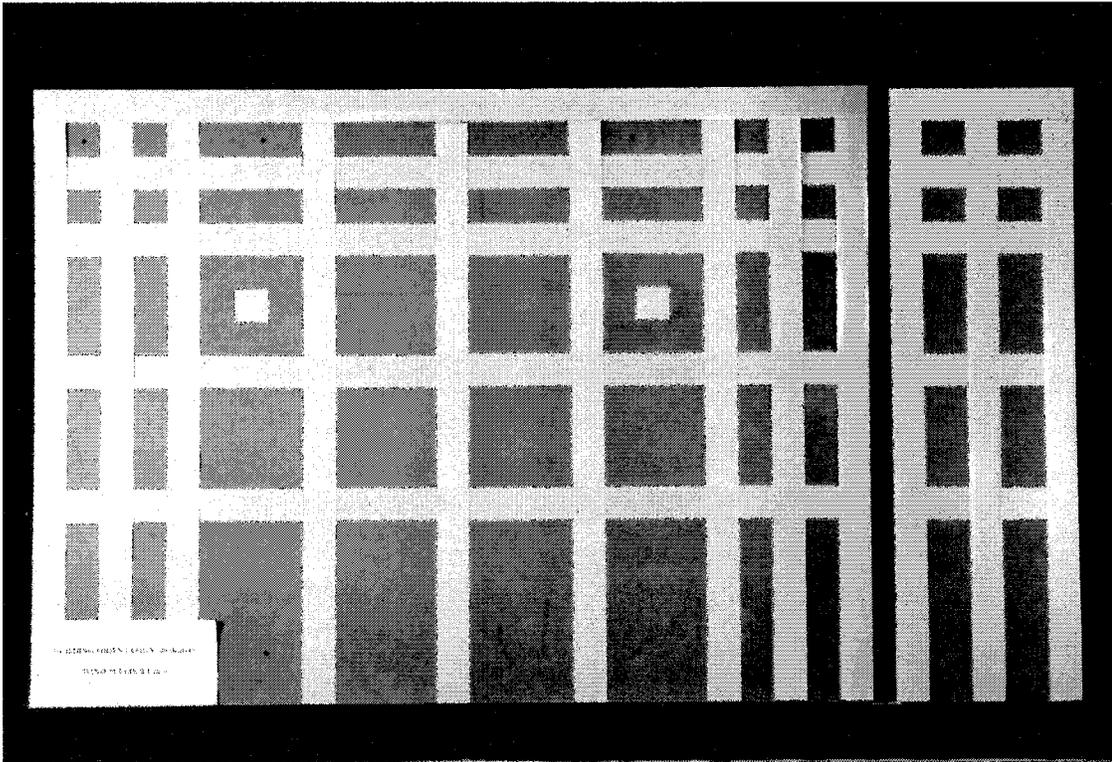


c) côté large, coin supérieur

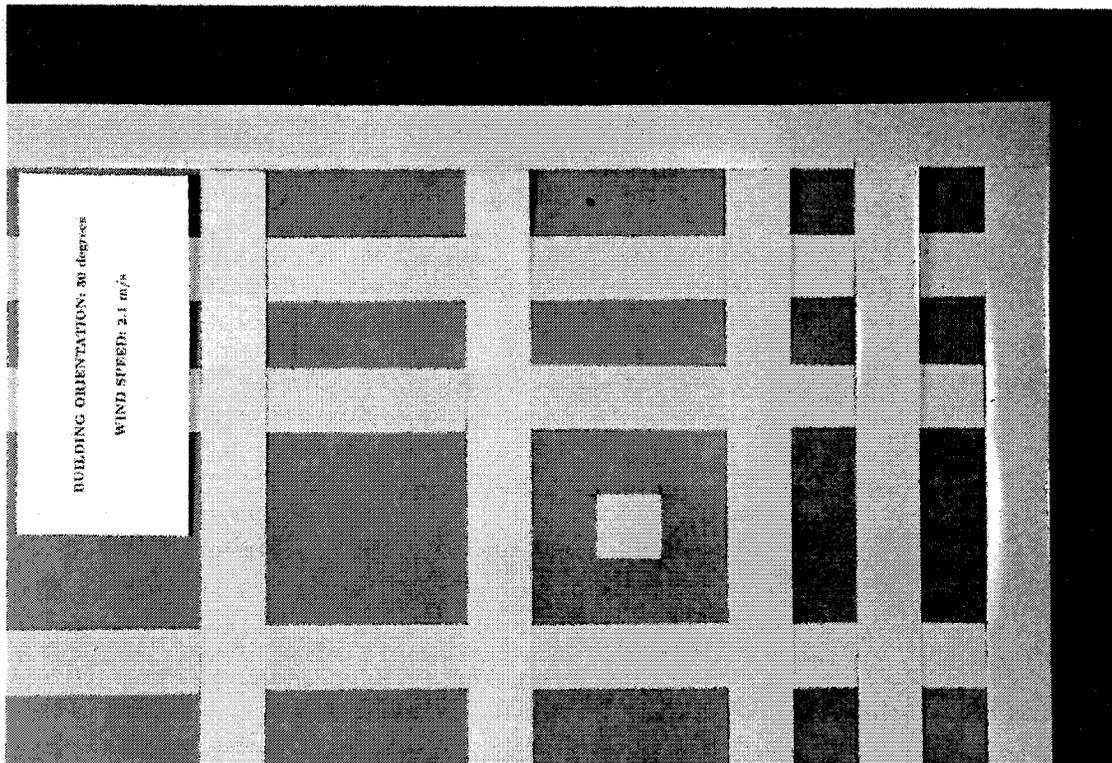


d) côté étroit, moitié supérieure

Figure C.4 Suite

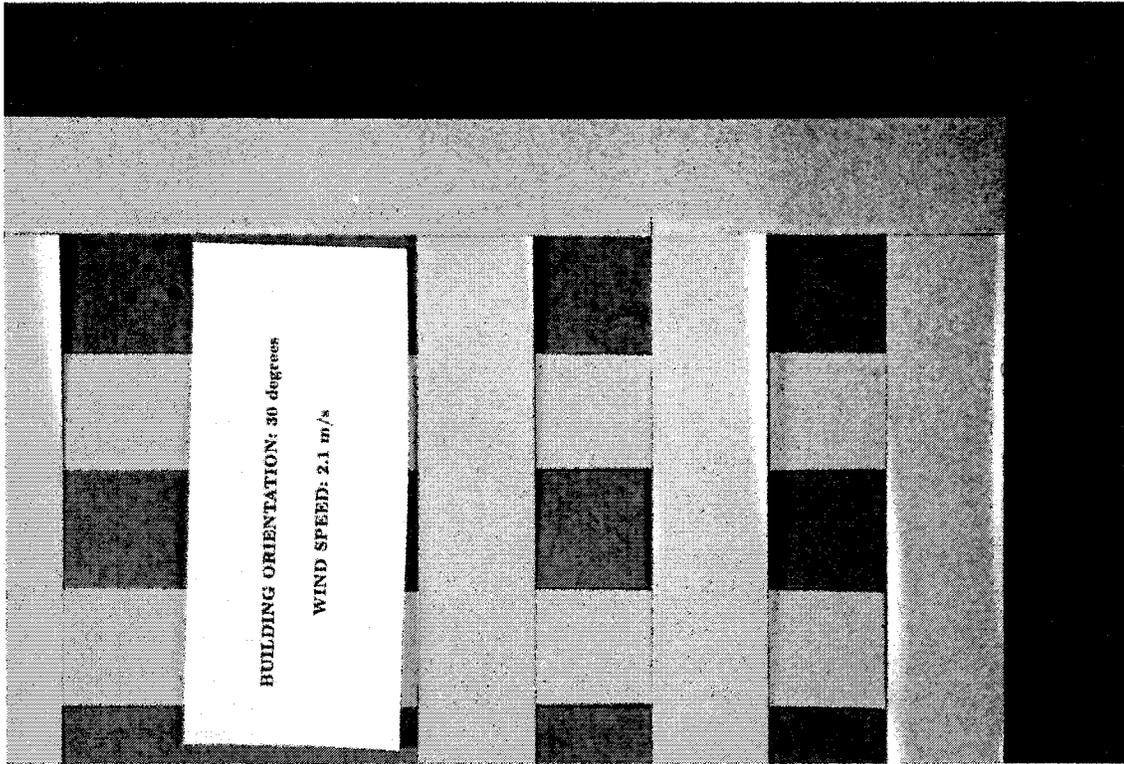


a) vue complète

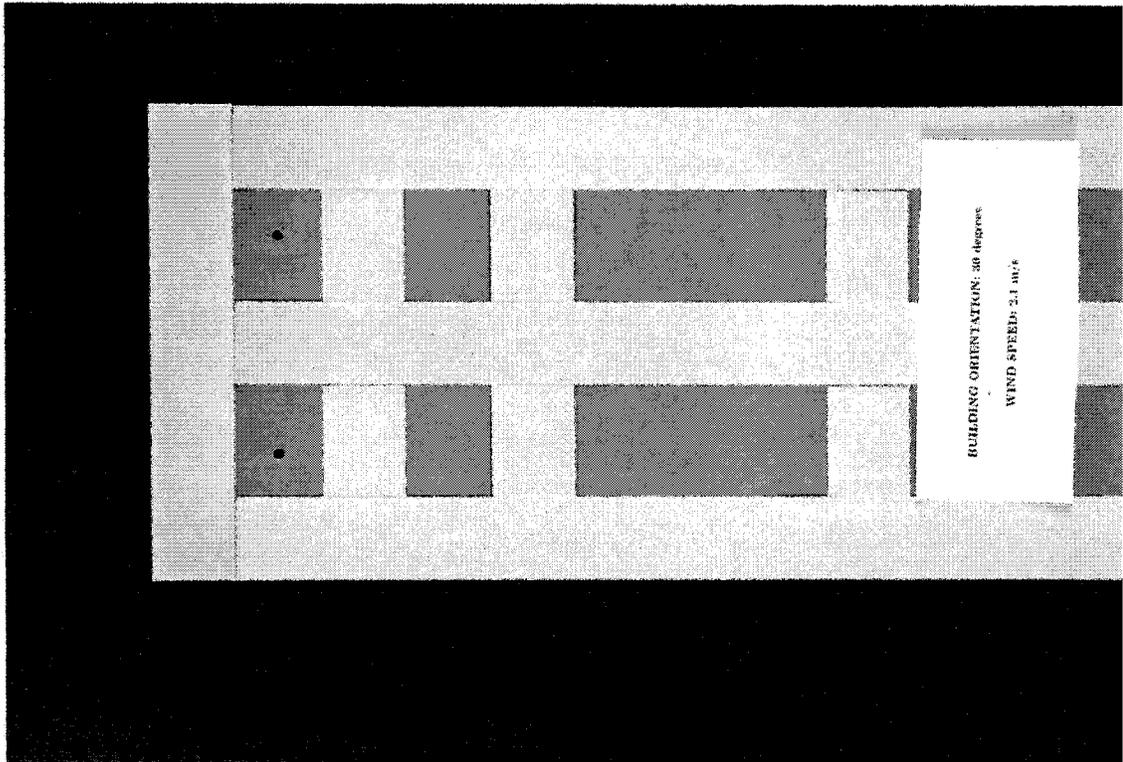


b) côté large, coin supérieur

Figure C.5 Distribution du mouillage à la phase I, angle du bâtiment=30 degrés, vitesse du vent dans le tunnel=1,5 m/sec au sommet du bâtiment

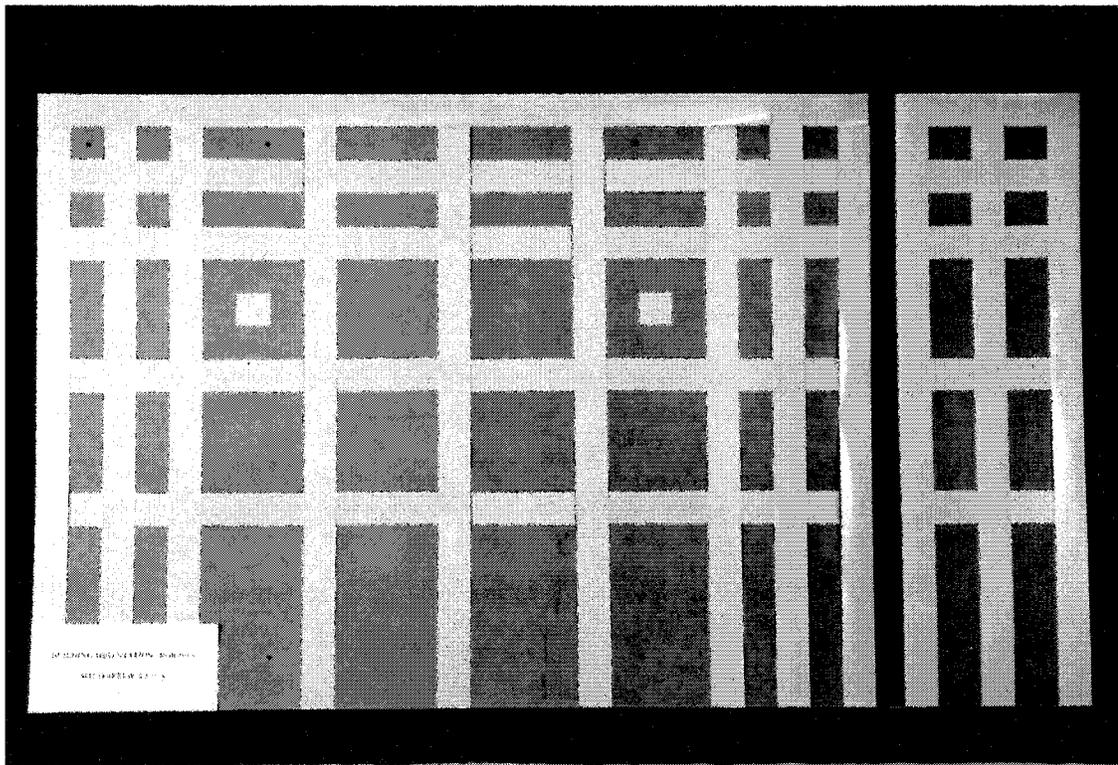


c) côté large, coin supérieur

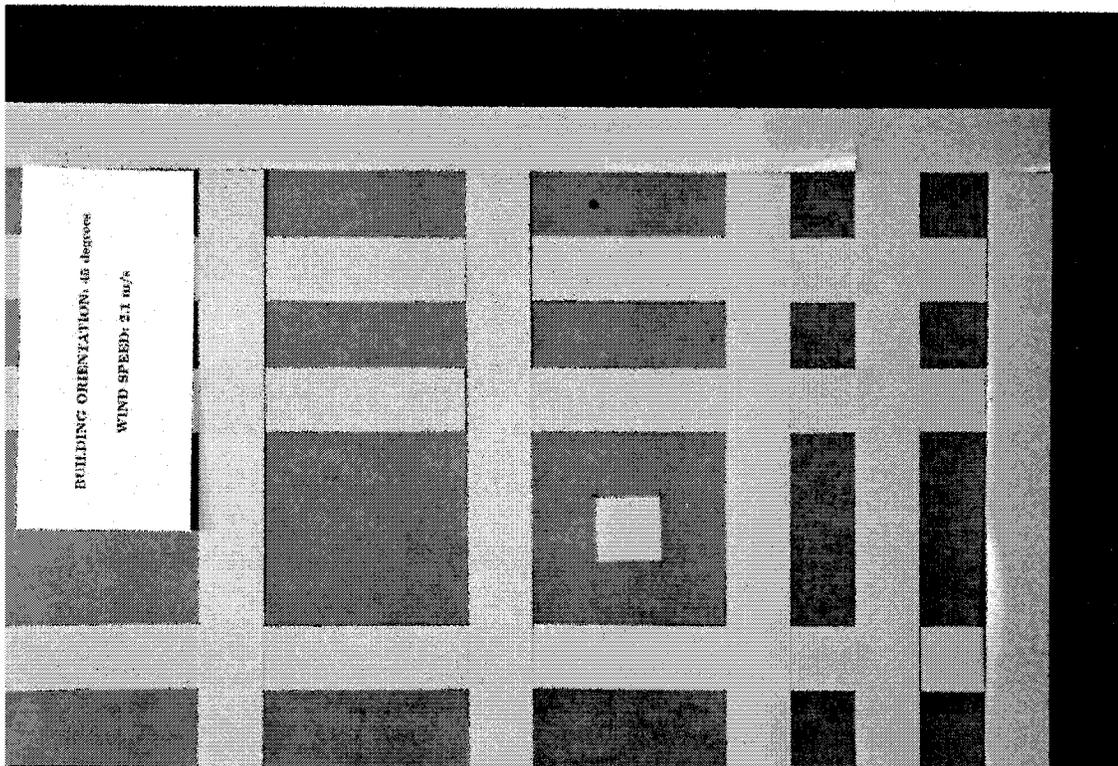


d) côté étroit, moitié supérieure

Figure C.5 Suite

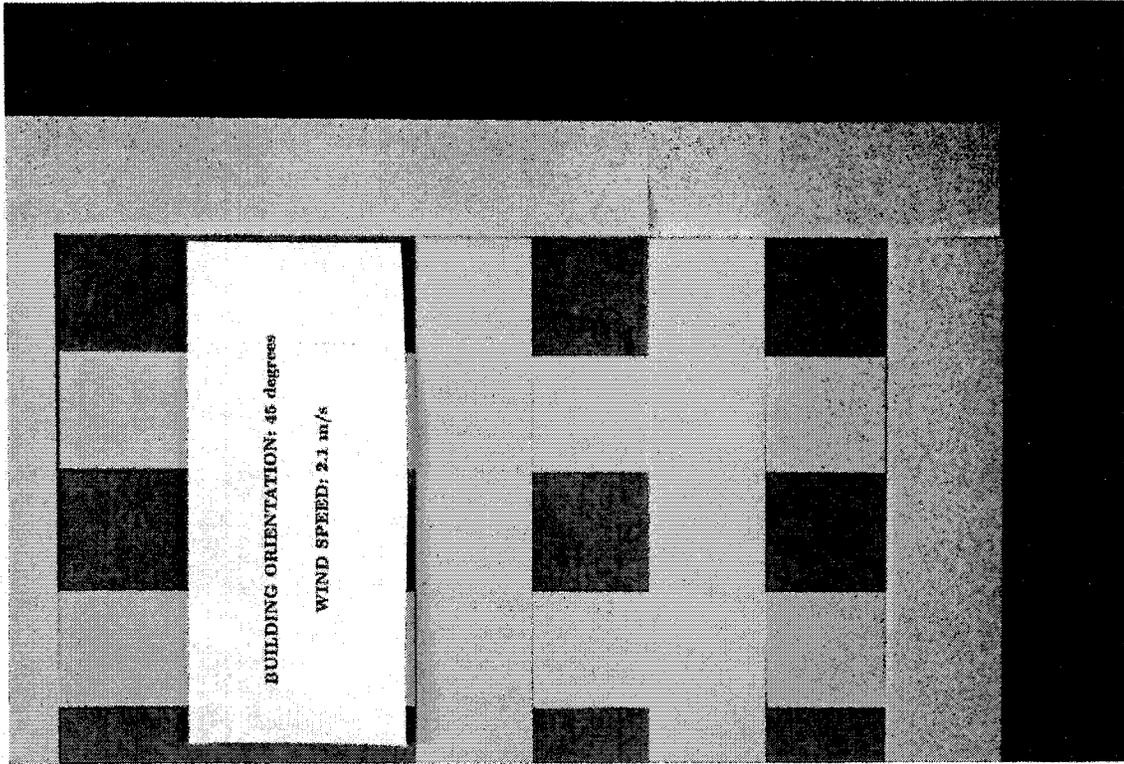


a) vue complète

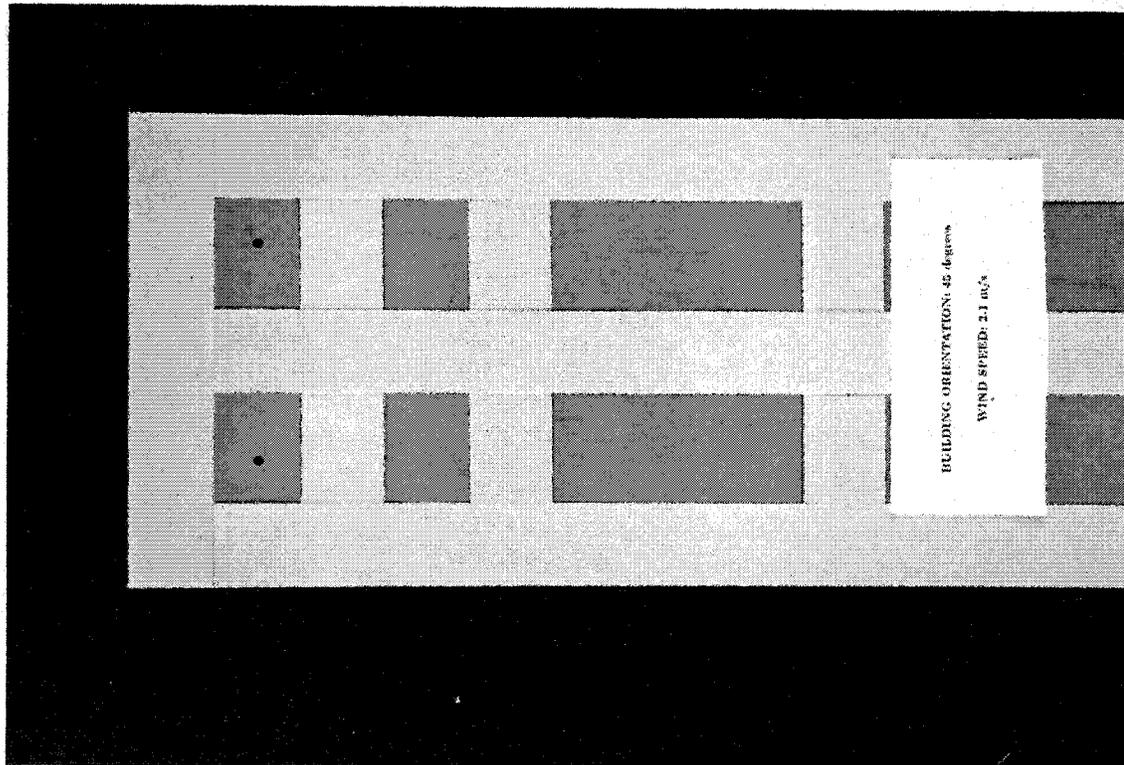


b) côté large, coin supérieur

Figure C.6 Distribution du mouillage à la phase I, angle du bâtiment=45 degrés, vitesse du vent dans le tunnel=11,5 m/sec au sommet du bâtiment

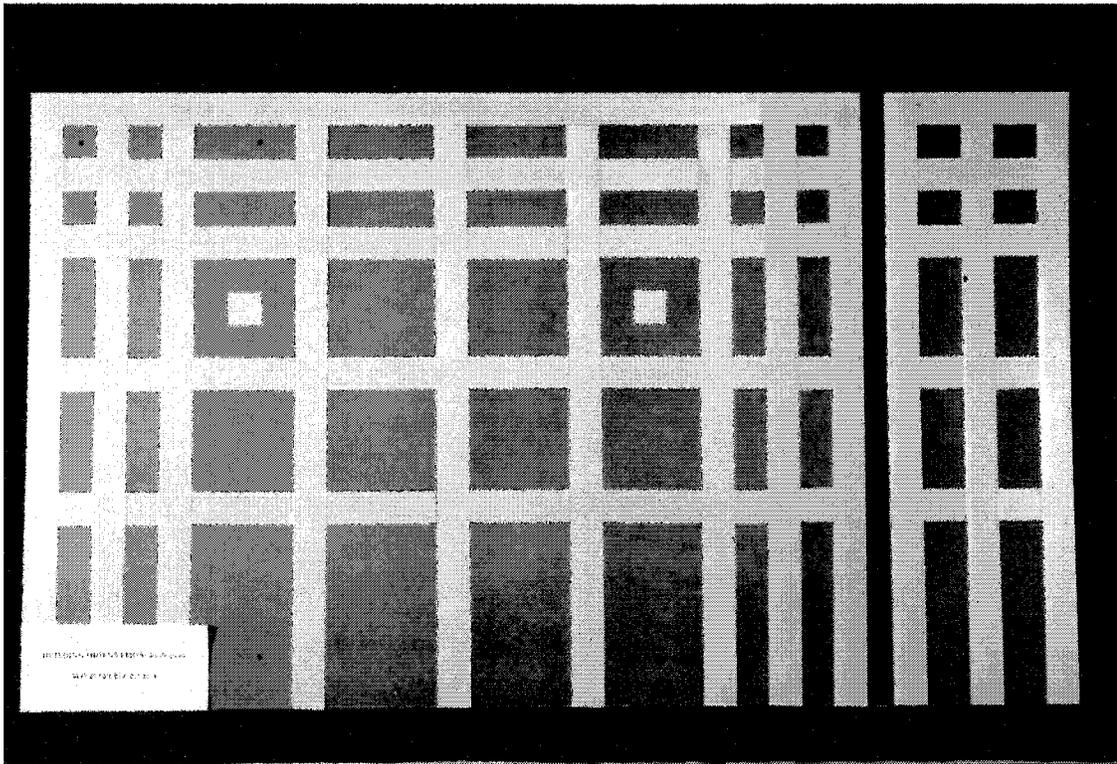


c) côté large, coin supérieur

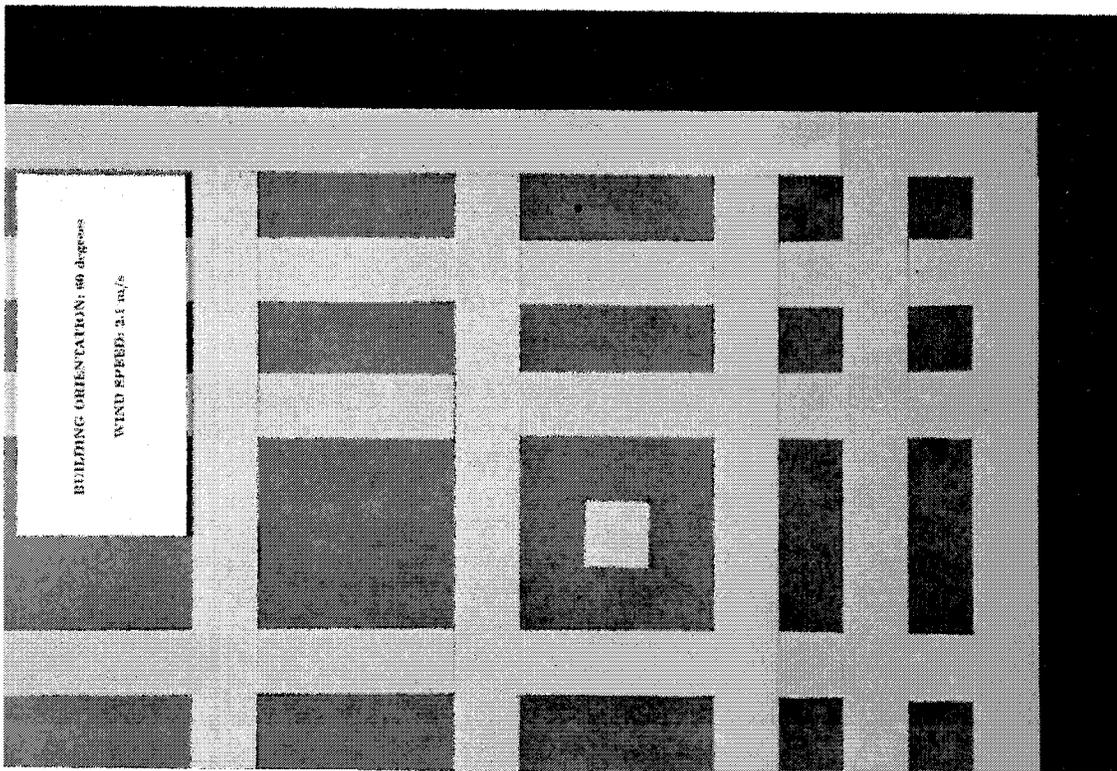


d) côté étroit, moitié supérieure

Figure C.6 Suite

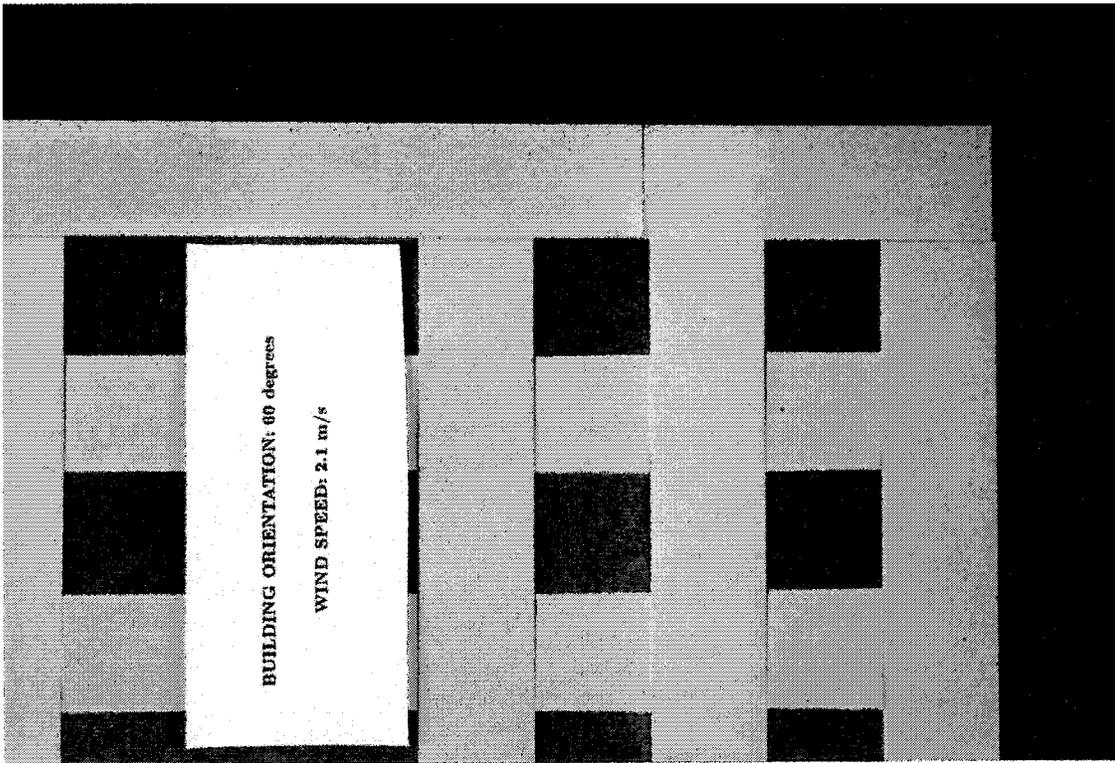


a) vue complète

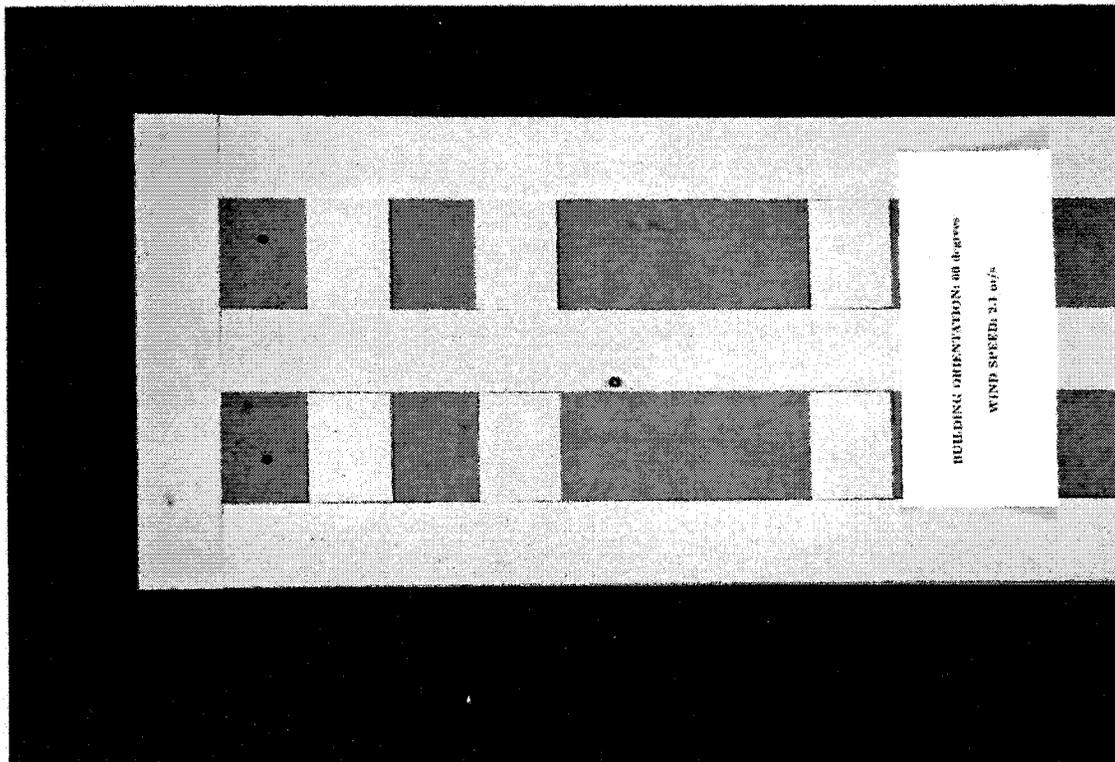


b) côté large, coin supérieur

**Figure C.7 Distribution du mouillage à la phase I, angle du bâtiment=60 degrés
vitesse du vent dans le tunnel=1,5 m/sec au sommet du bâtiment**

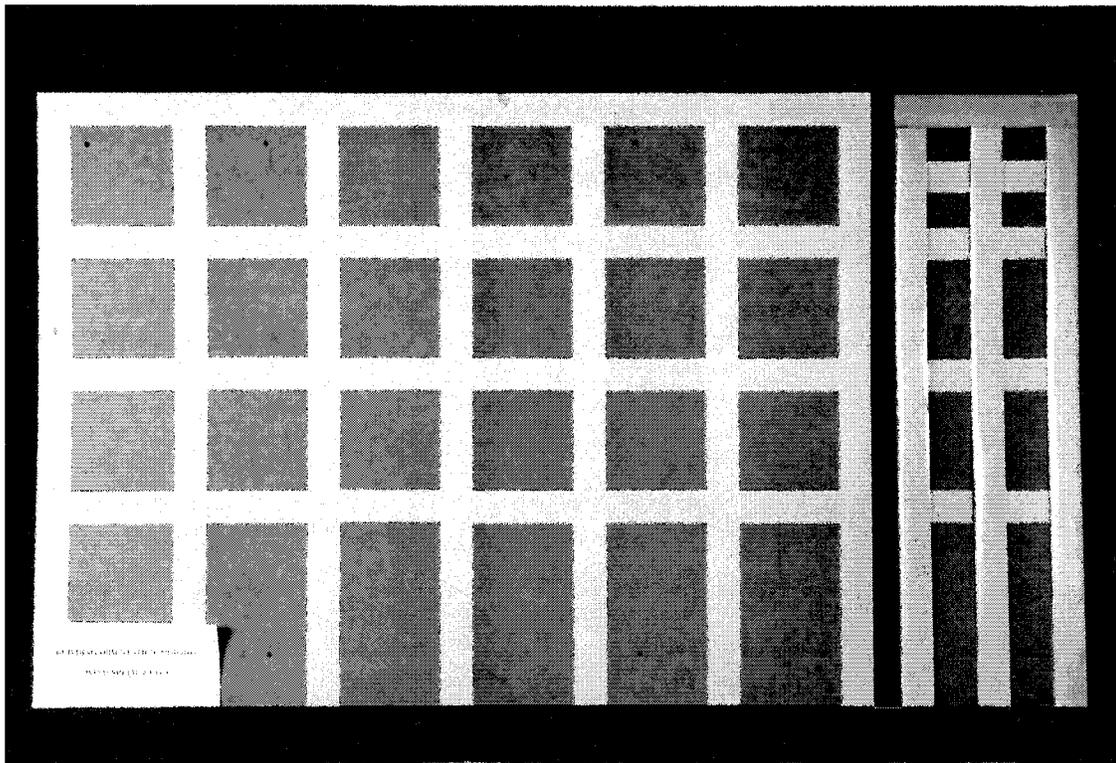


c) côté large, coin supérieur

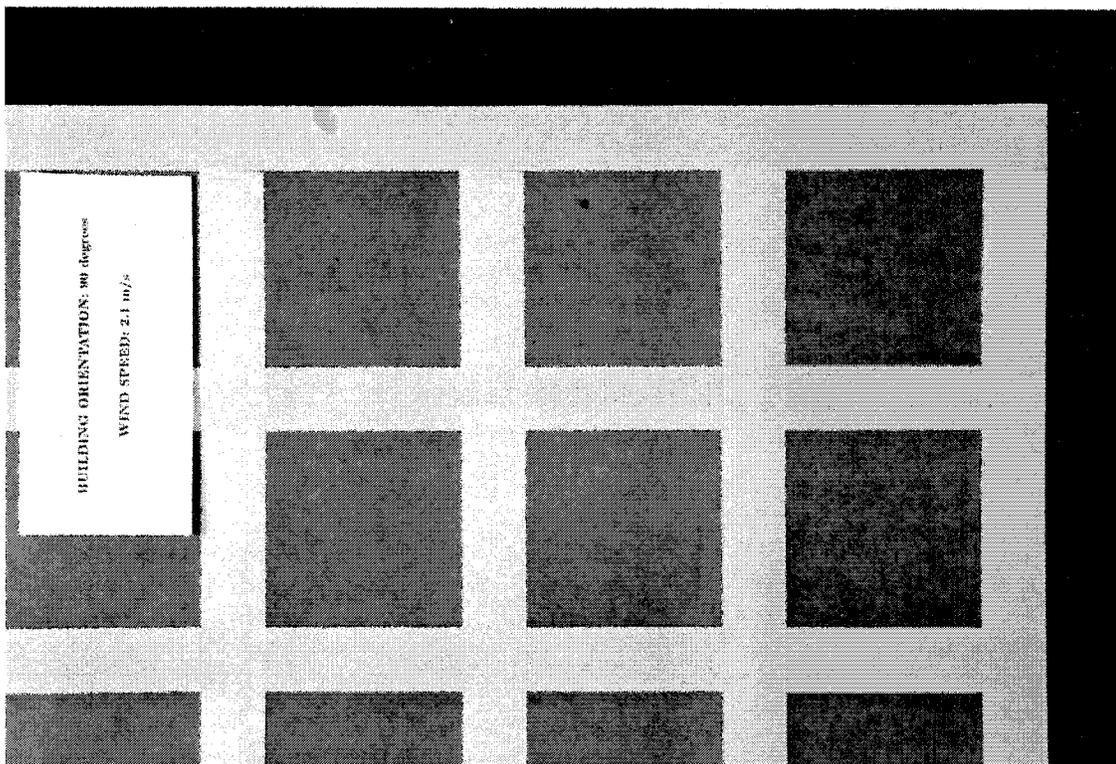


d) côté étroit, moitié supérieure

Figure C.7 Suite

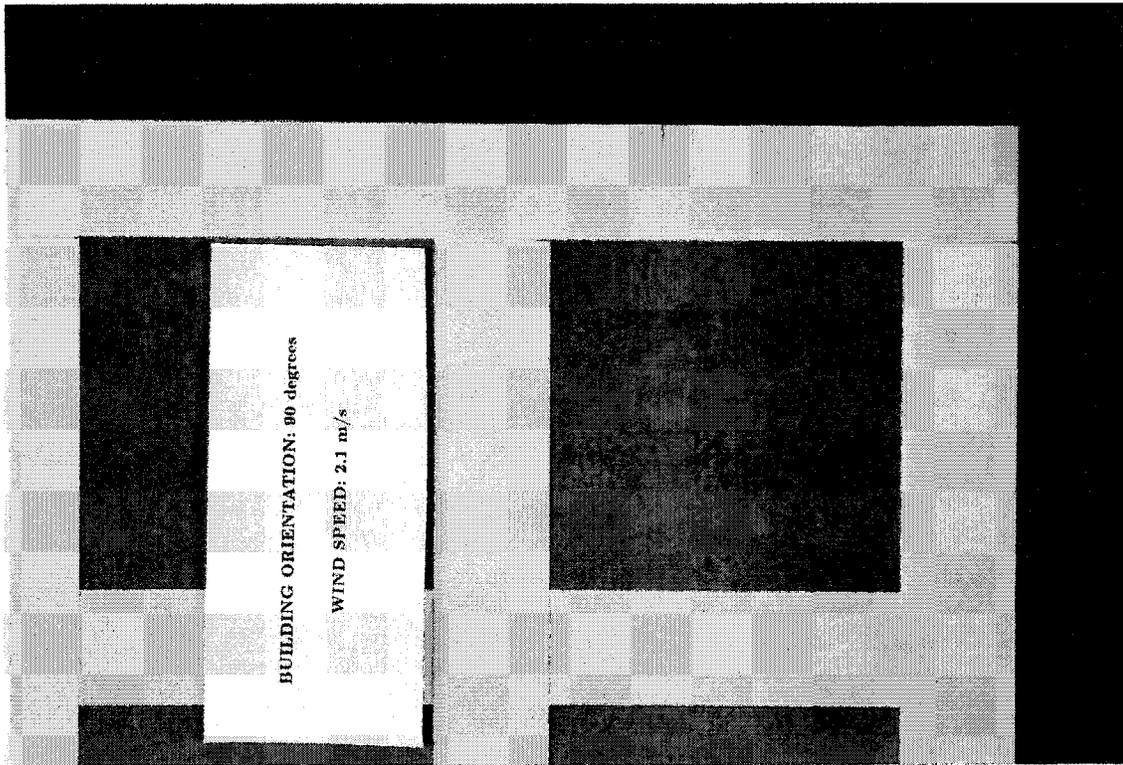


a) vue complète

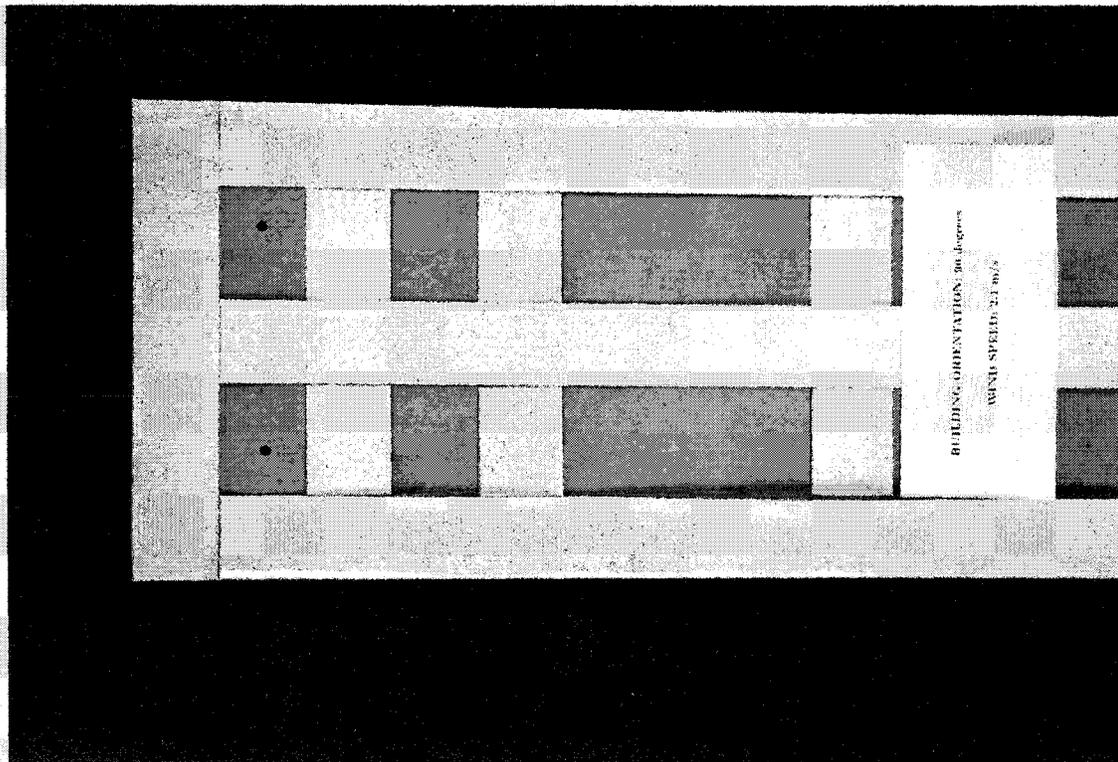


b) côté large, coin supérieur

Figure C.8 Distribution du mouillage à la phase I, angle du bâtiment=90 degrés, vitesse du vent dans le tunnel=1,5 m/sec au sommet du bâtiment

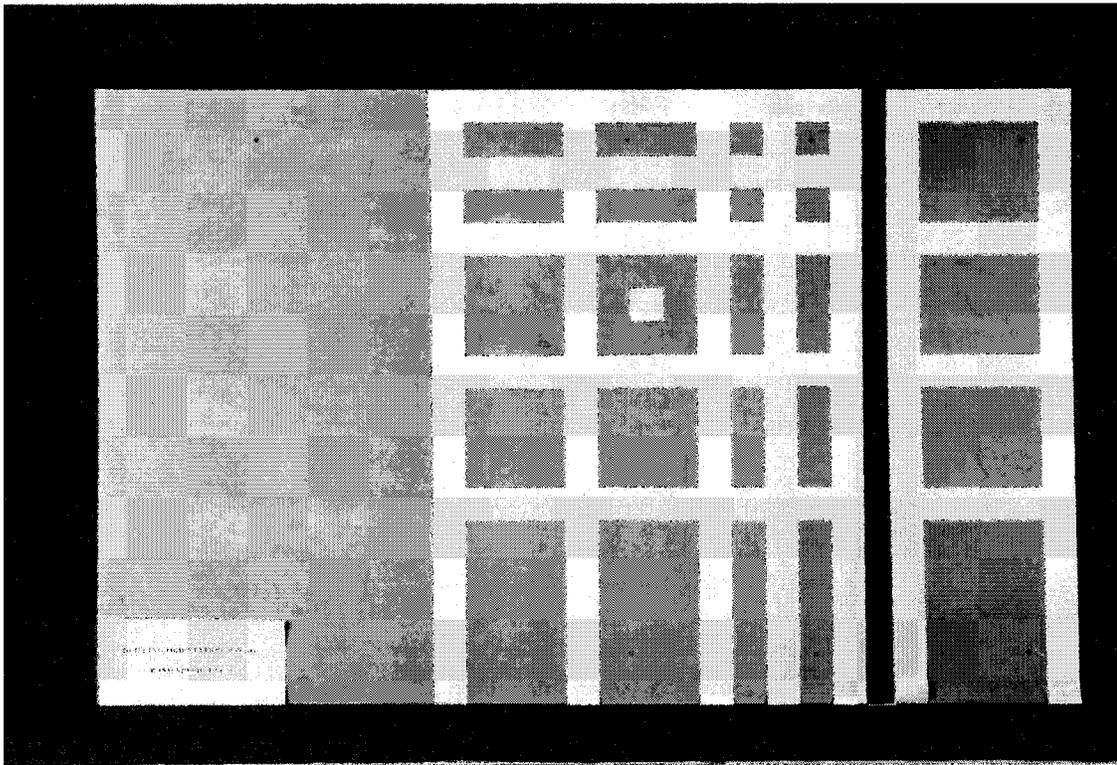


c) côté large, coin supérieur

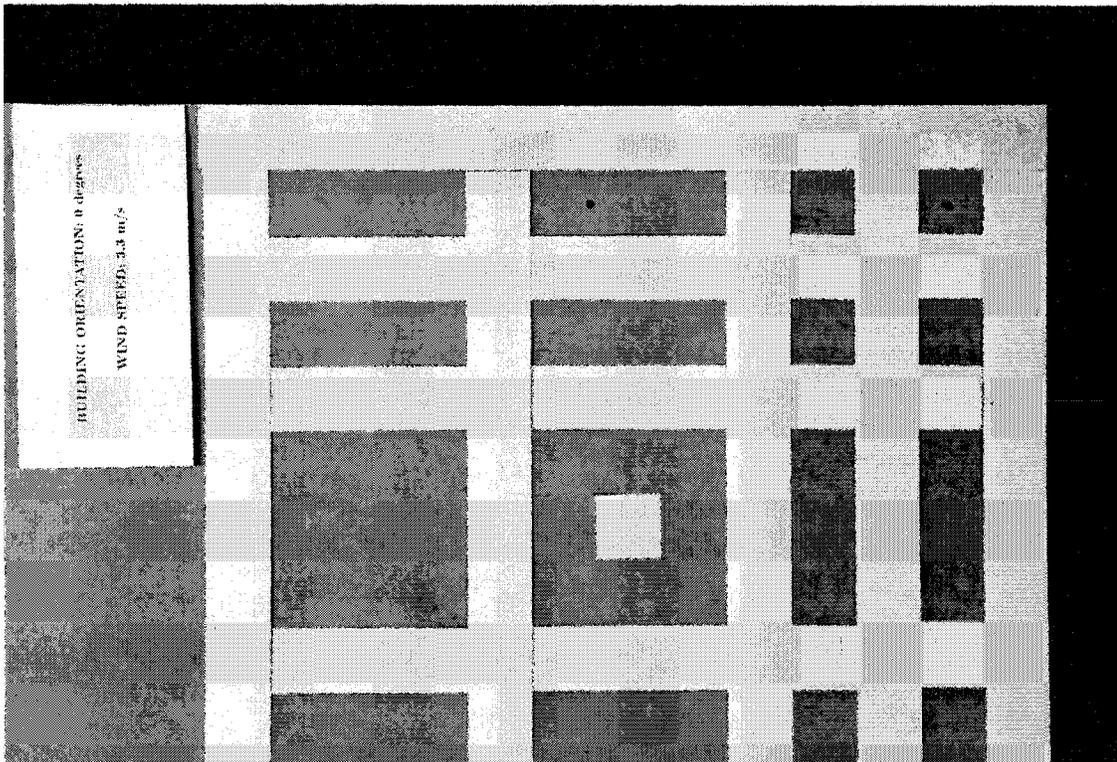


d) côté étroit, moitié supérieure

Figure C.8 Suite

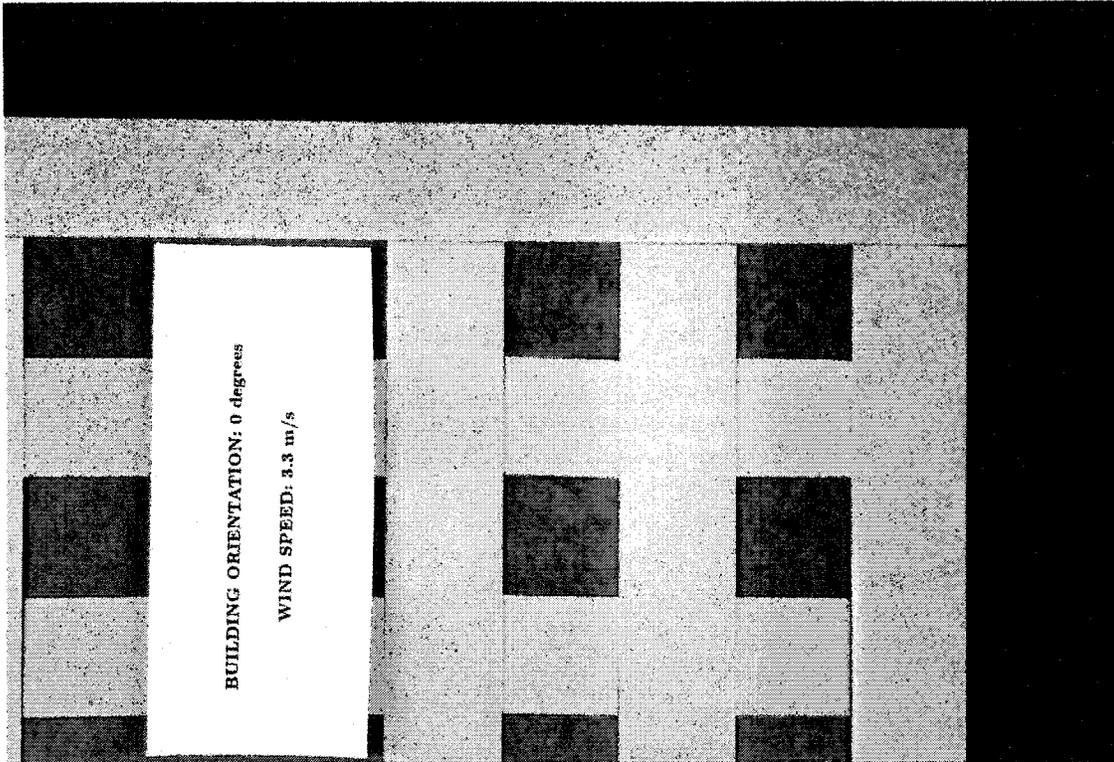


a) vue complète

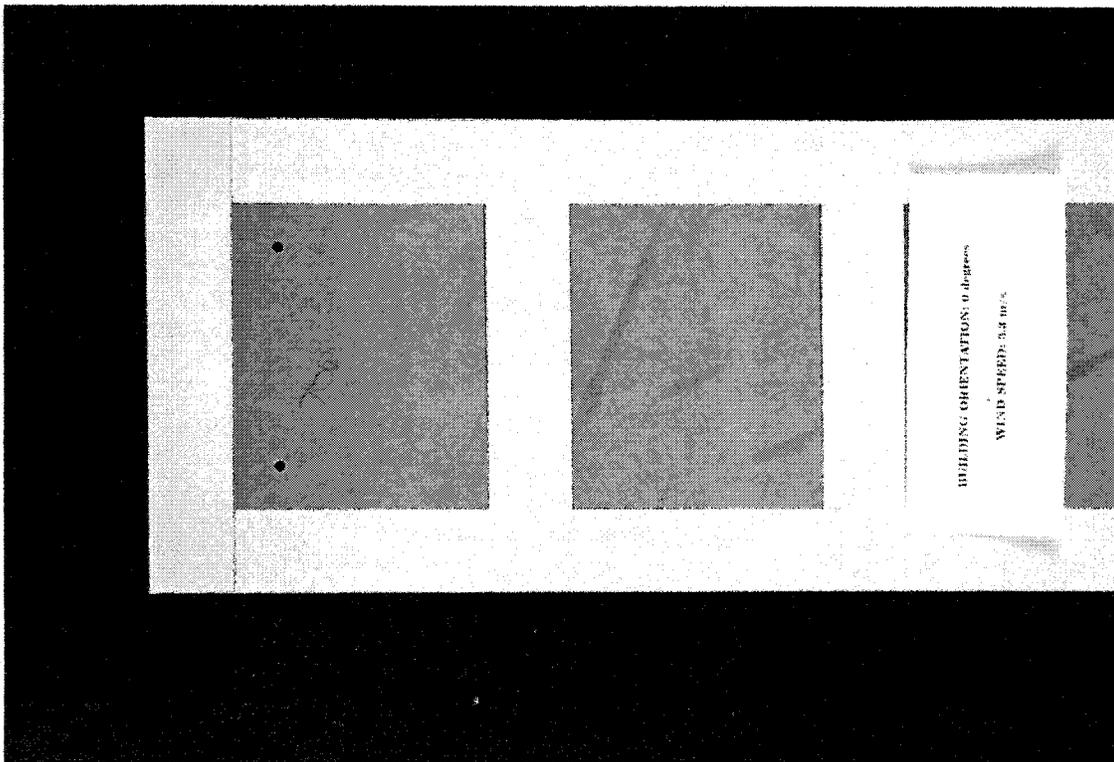


b) côté large, coin supérieur

Figure C.9 Distribution du mouillage à la phase I, angle du bâtiment=0 degré, vitesse du vent dans le tunnel=2.3 m/sec au sommet du bâtiment

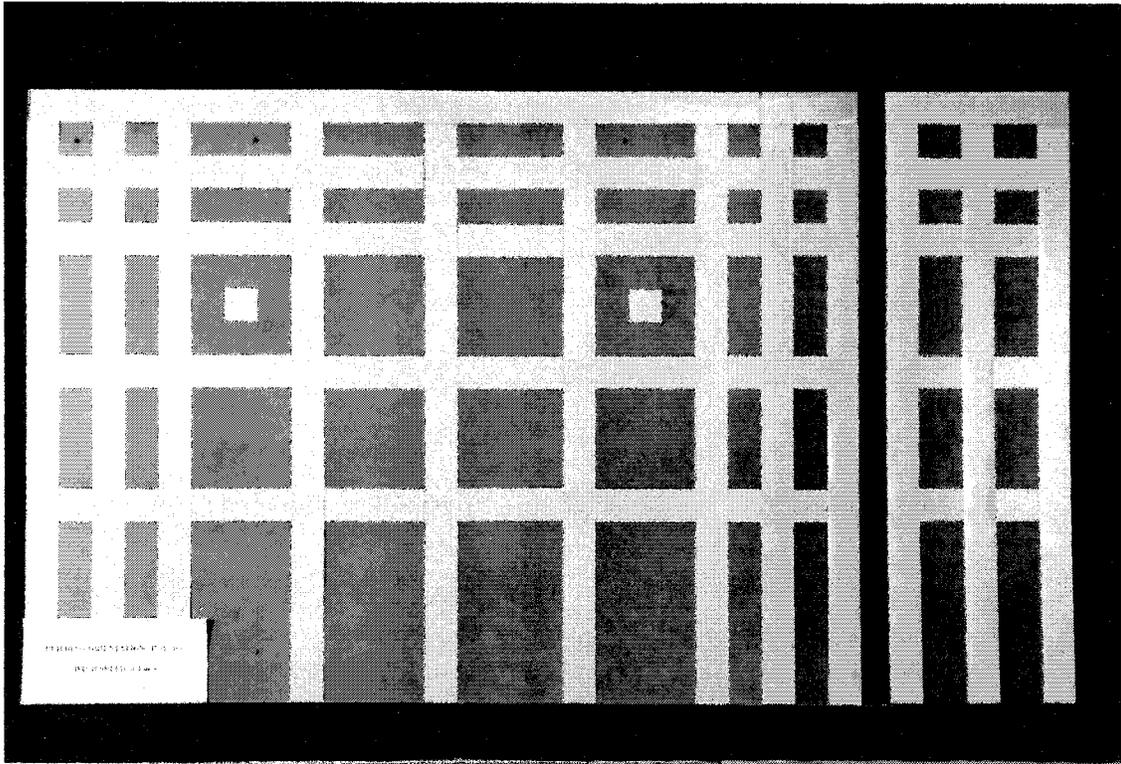


c) côté large, coin supérieur

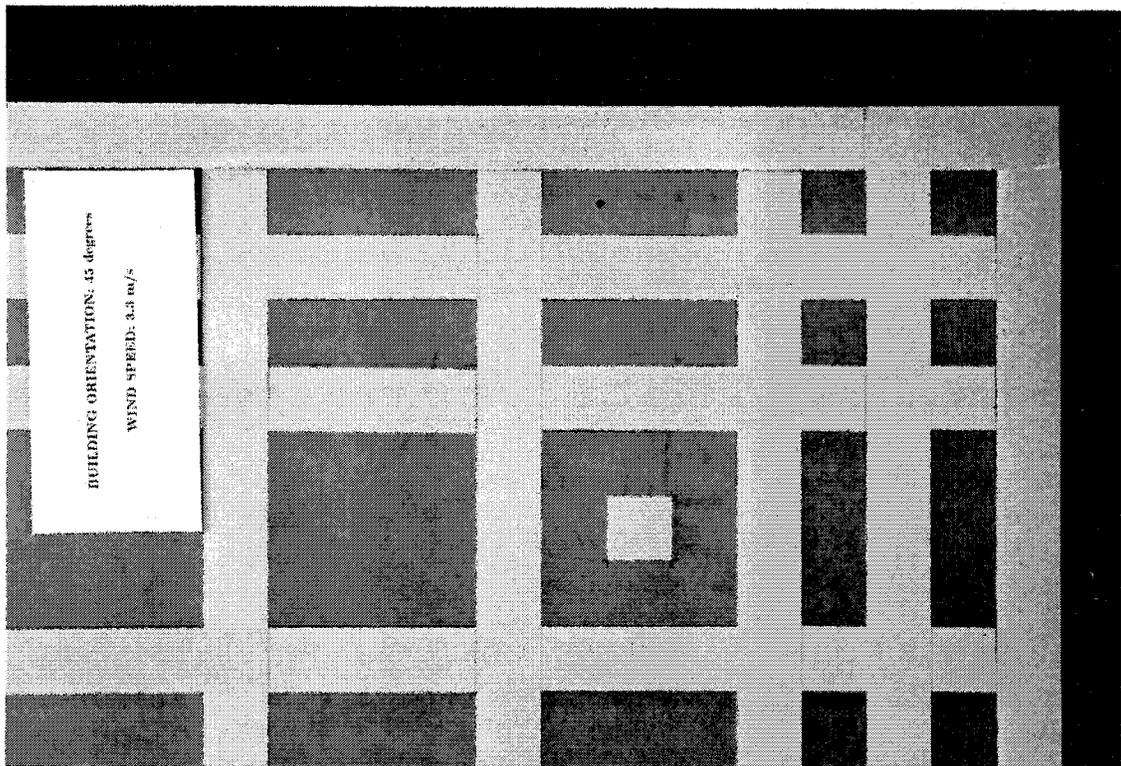


d) côté étroit, moitié supérieure

Figure C.9 Suite

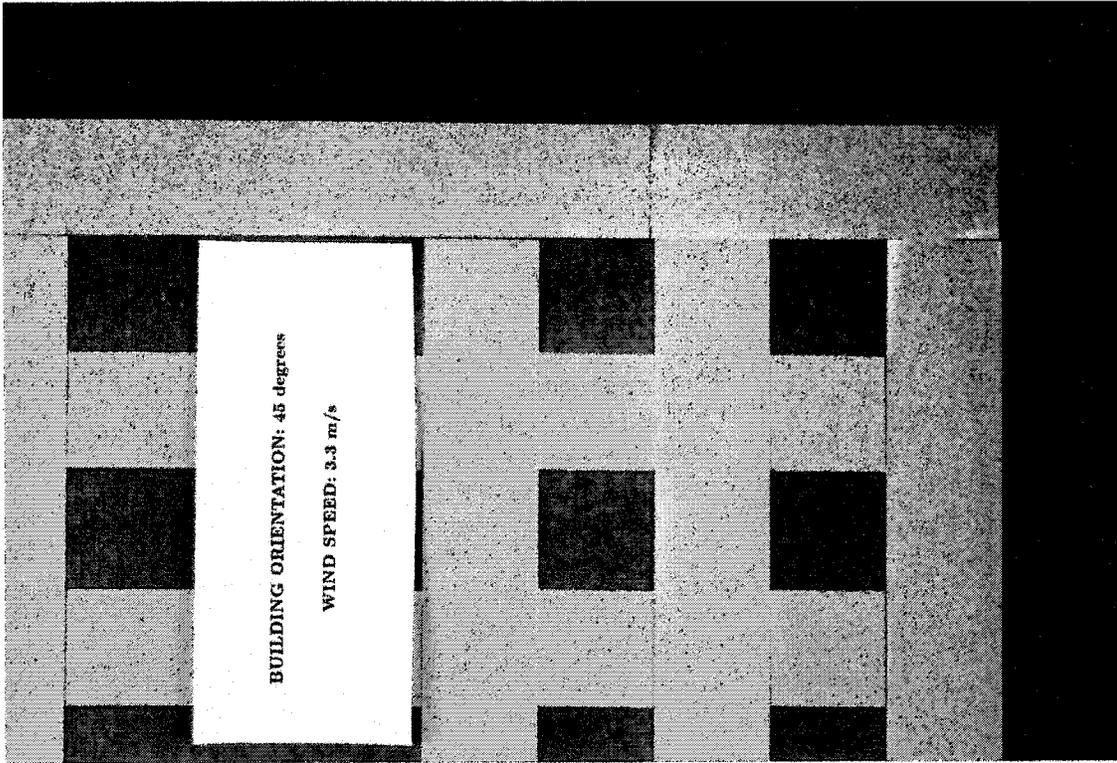


a) vue complète

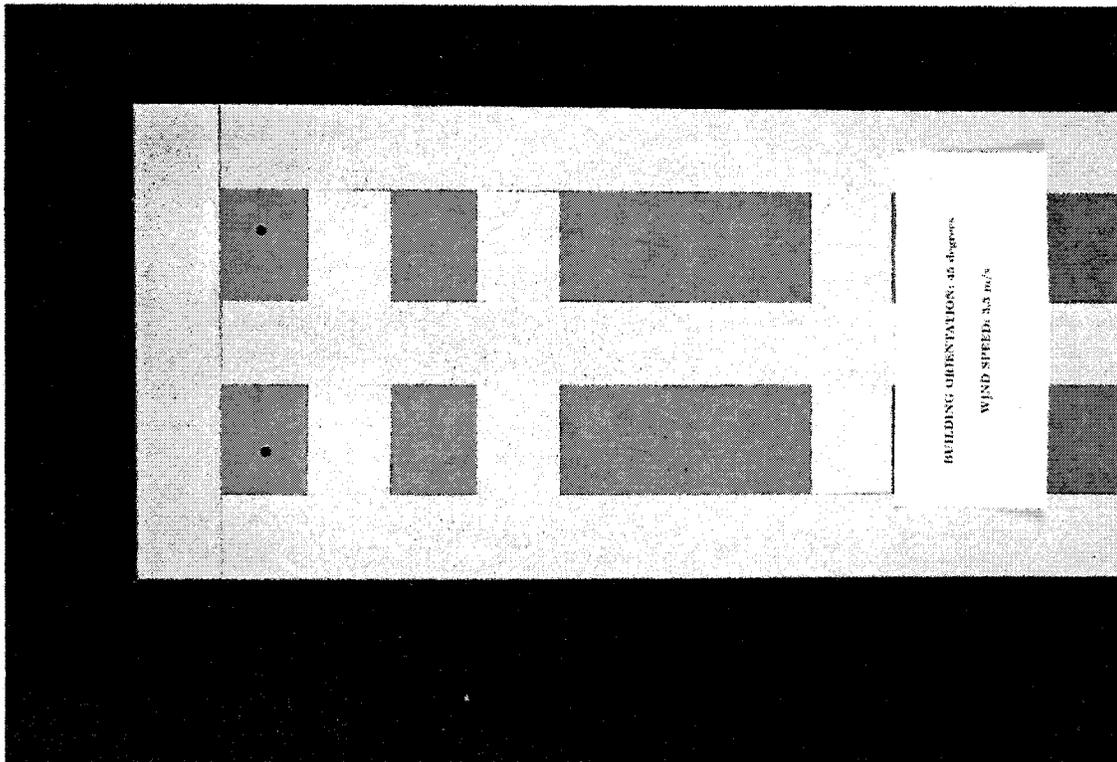


b) côté large, coin supérieur

Figure C.10 Distribution du mouillage à la phase I, angle du bâtiment=45 degrés, vitesse du vent dans le tunnel=2,3 m/sec au sommet du bâtiment

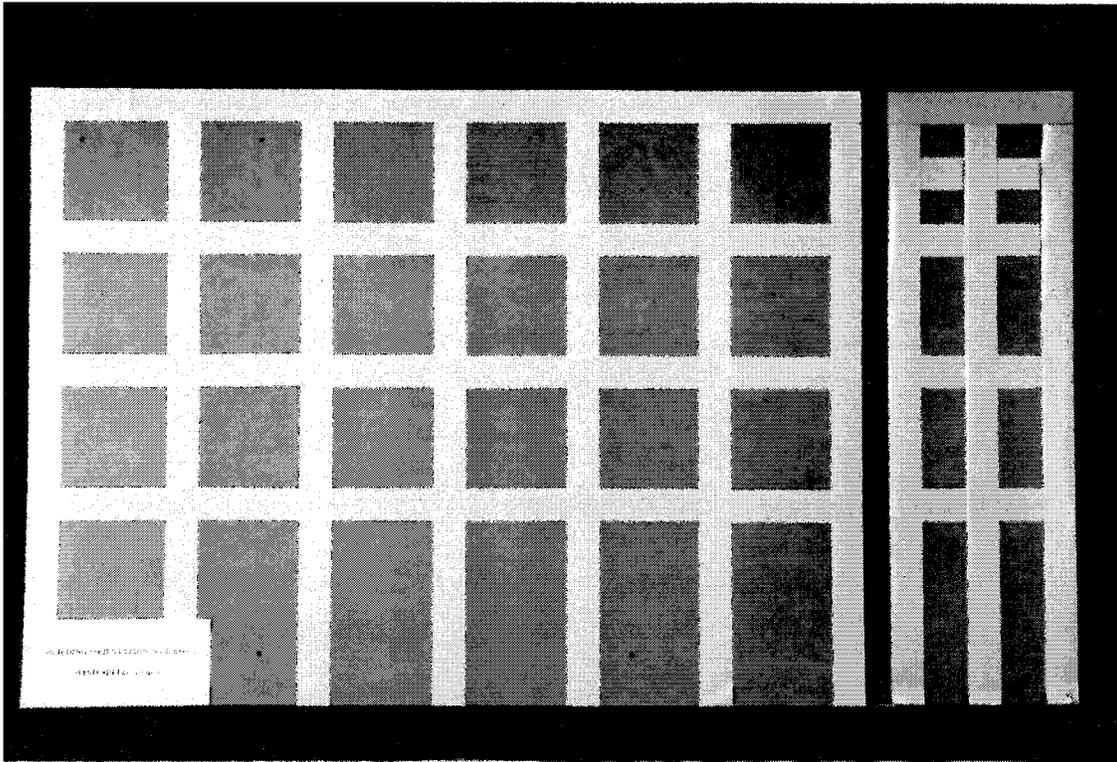


c) côté large, coin supérieur

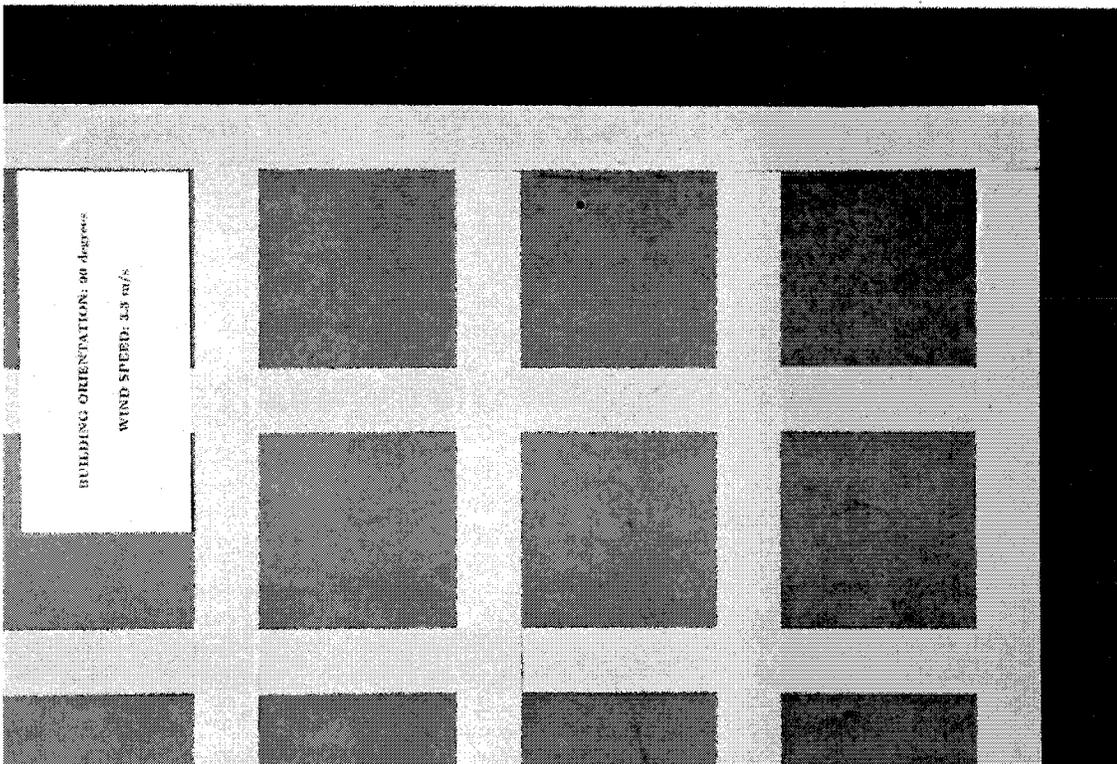


d) côté étroit, moitié supérieure

Figure C.10 Suite

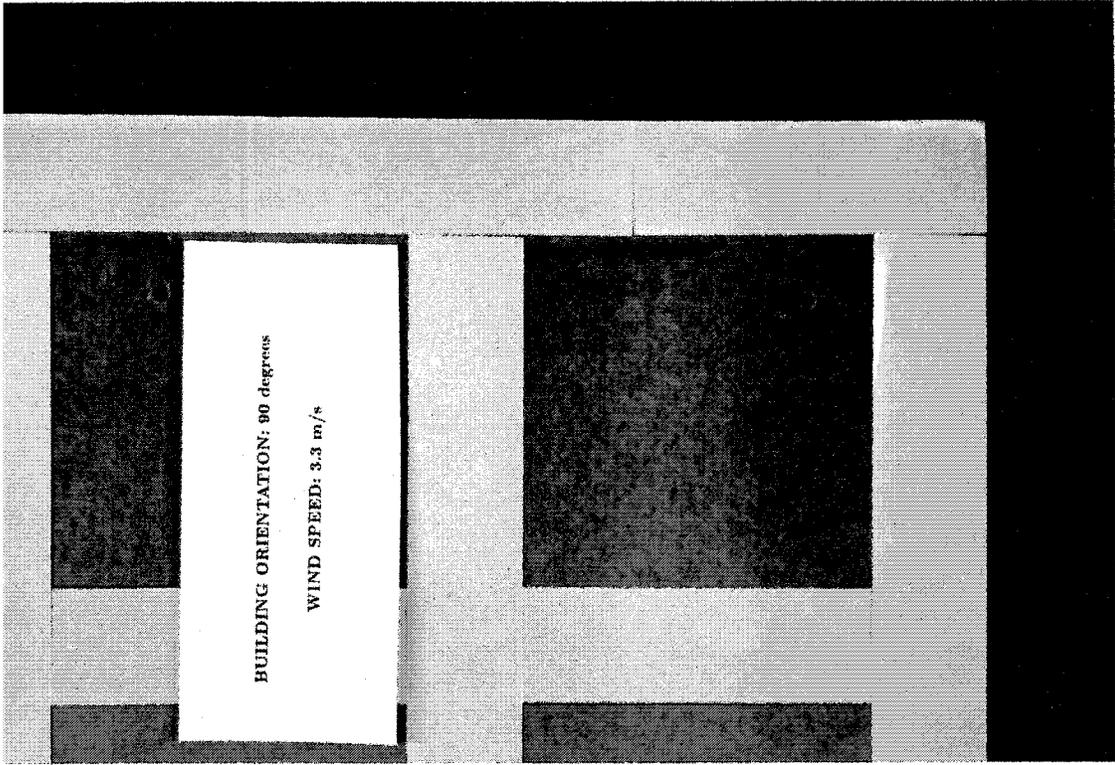


a) vue complète

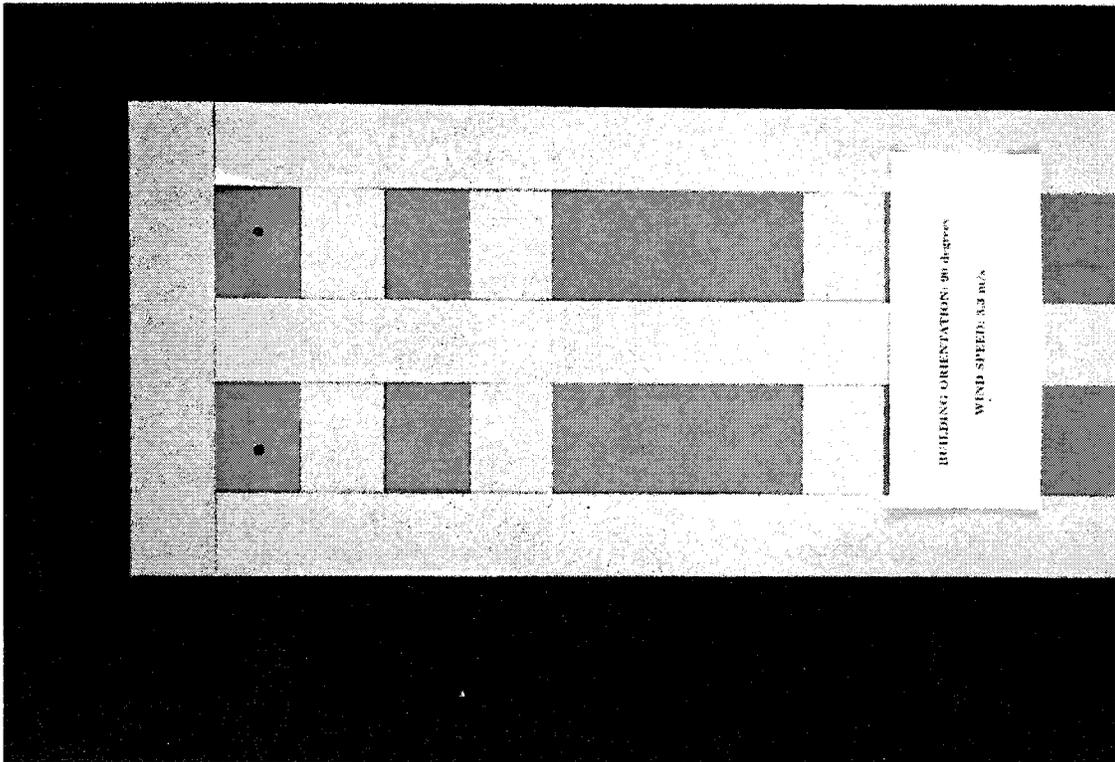


b) côté large, coin supérieur

Figure C.11 Distribution du mouillage à la phase I, angle du bâtiment=90 degrés, vitesse du vent dans le tunnel=2,3 m/sec au sommet du bâtiment

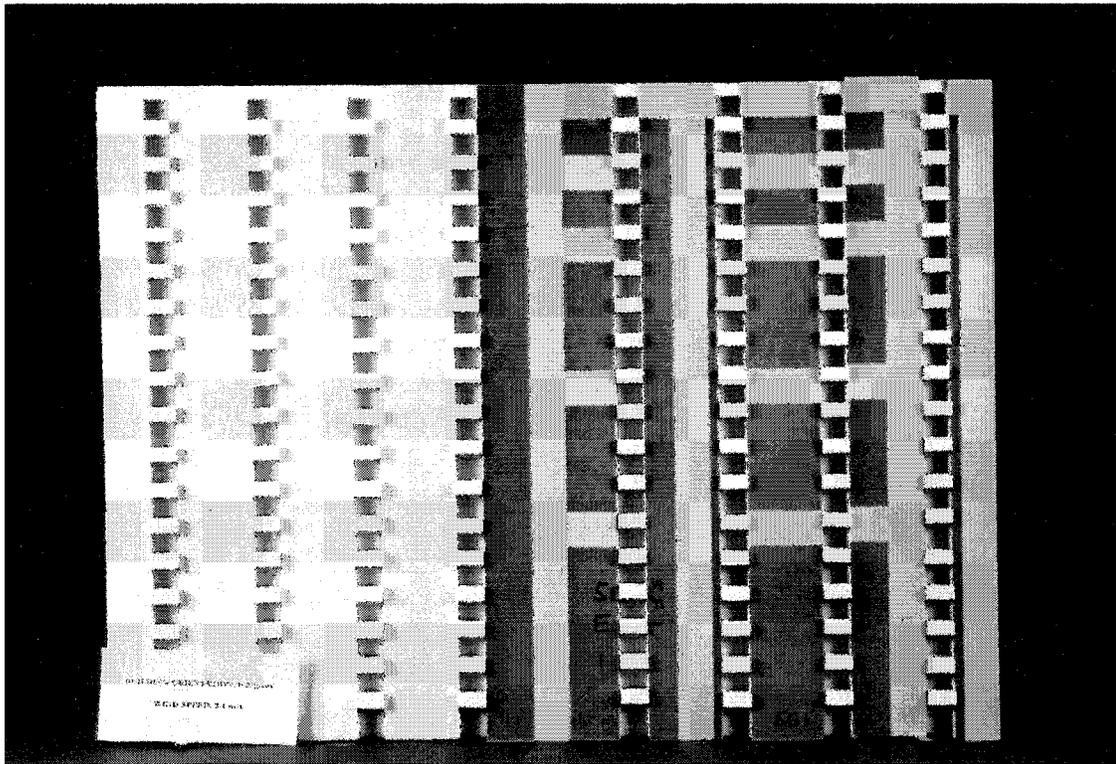


c) côté large, coin supérieur

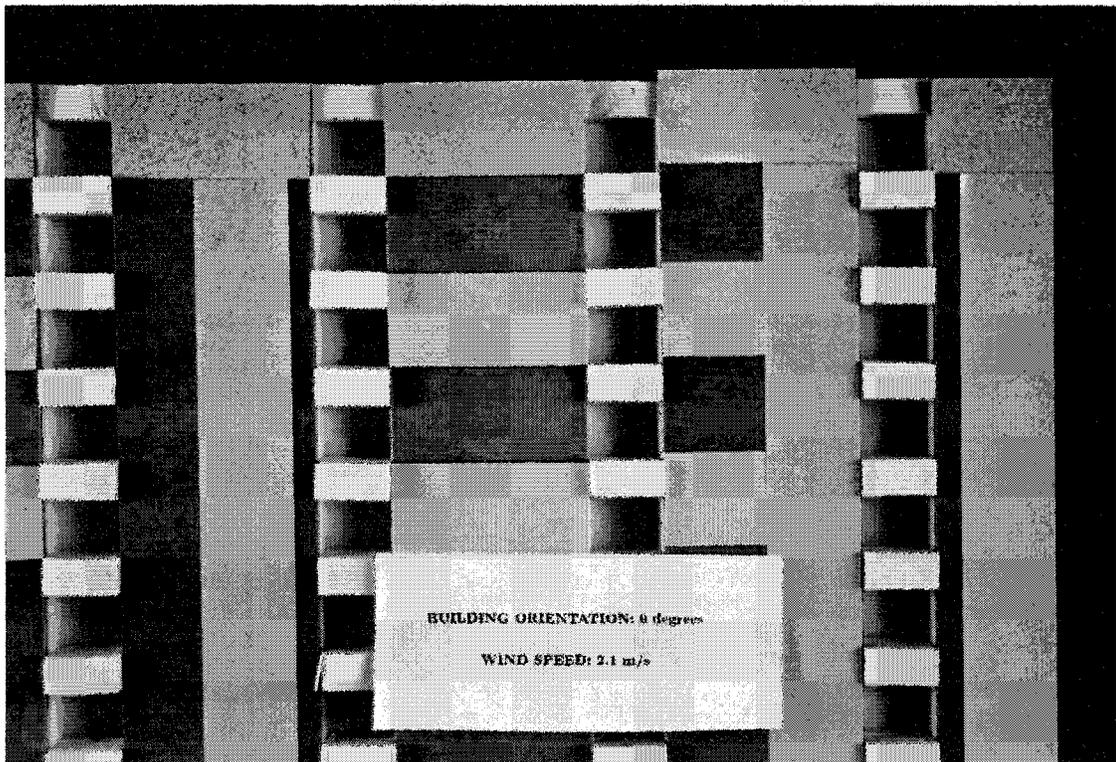


d) côté étroit, moitié supérieure

Figure C.11 Suite

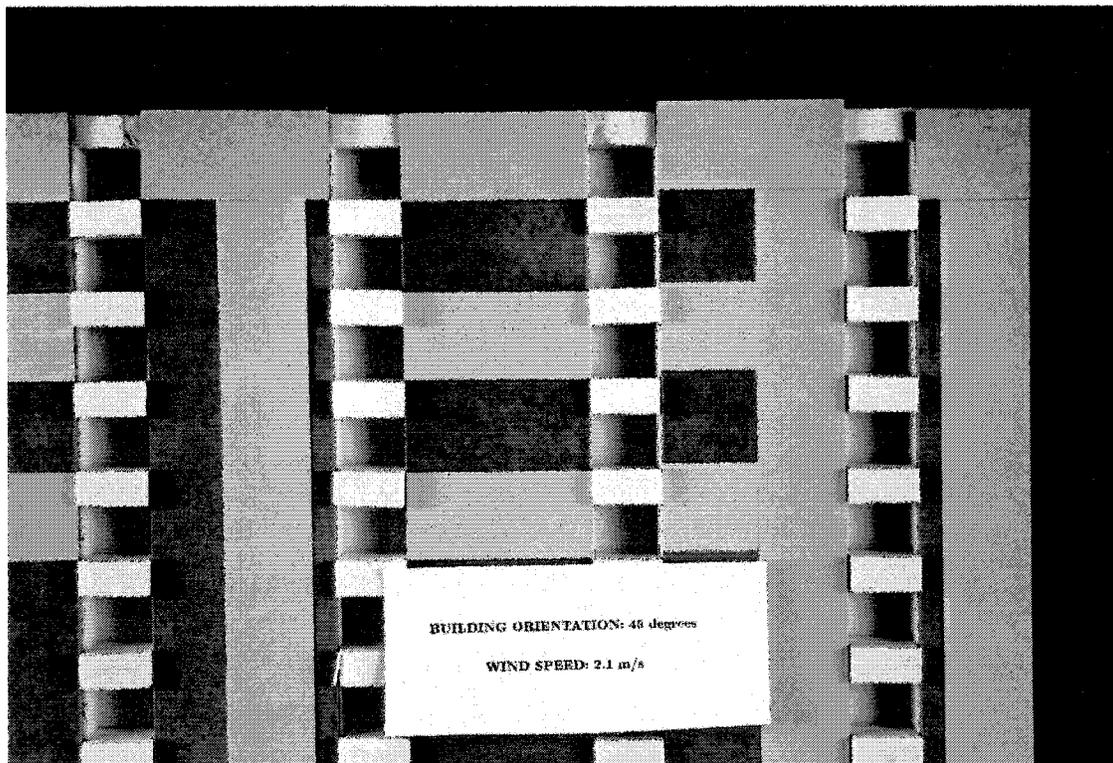


a) vue complète, angle du bâtiment=0

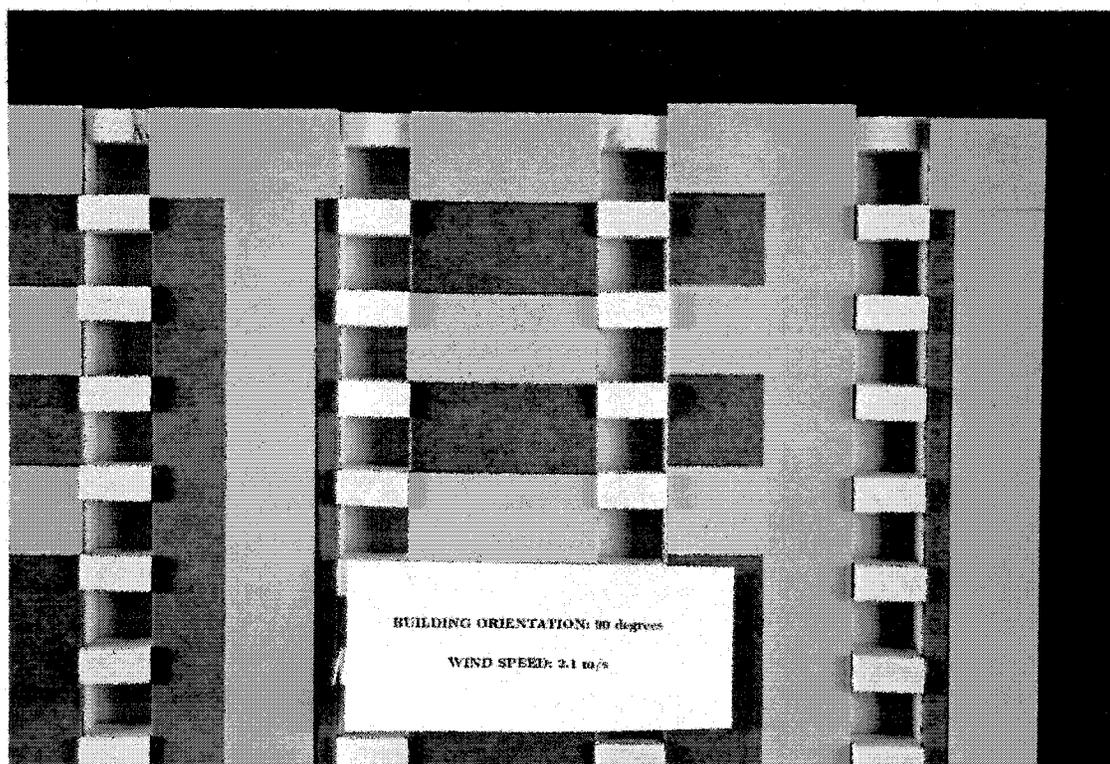


b) détail, angle du bâtiment=0

Figure C.12 Distribution du mouillage à la phase I, bâtiment avec balcons, vitesse du vent dans le tunnel=1,5 m/sec au sommet du bâtiment



c) détail, angle du bâtiment=45



d) détail, angle du bâtiment=90

Figure C.12 Suite

ANNEXE D

PHOTOGRAPHIES DES DISTRIBUTIONS DE MOUILLAGE DE LA PHASE II

Numéro d'essai	Bâtiment	Angle du bâtiment	Configuration du bâtiment
2, 20	A	0	référence
1, 18	B	0	référence
3, 19	C	0	référence
7	A	45	référence
6	B	45	référence
5	C	45	référence
10	A	90	référence
8	B	90	référence
9	C	90	référence
15	A	0	corniche de 2 m
11	B	0	corniche de 2 m
14	C	0	corniche de 2 m
12	B	45	corniche de 2 m
13	B	90	corniche de 2 m
24	A	0	corniche de 1 m
22	B	0	corniche de 1 m
23	C	0	corniche de 1 m
16	B	0	toit pointu
17	B	0	coins rentrants
4	cylindre	-	-
21	B	0	corniche de 2 m durée 27 sec

Tableau D.1 Sommaire des essais de distribution du mouillage, phase II

Remarques :

- 1 Tous les essais, sauf le n 21, ont duré 6 secondes. L'essai n 21 a été arrêté quand l'eau a commencé à couler de la corniche.
- 2 Pour tous les essais, la vitesse du vent a été de 1,5 m/sec à une hauteur de 0,94 m (hauteur du bâtiment à la phase I).
- 3 Pour les essais n 1 à 13, l'humidité relative a varié entre 63 % et 68 %. Pour les essais n 14 à 21, elle a varié entre 77 % et 80 %.

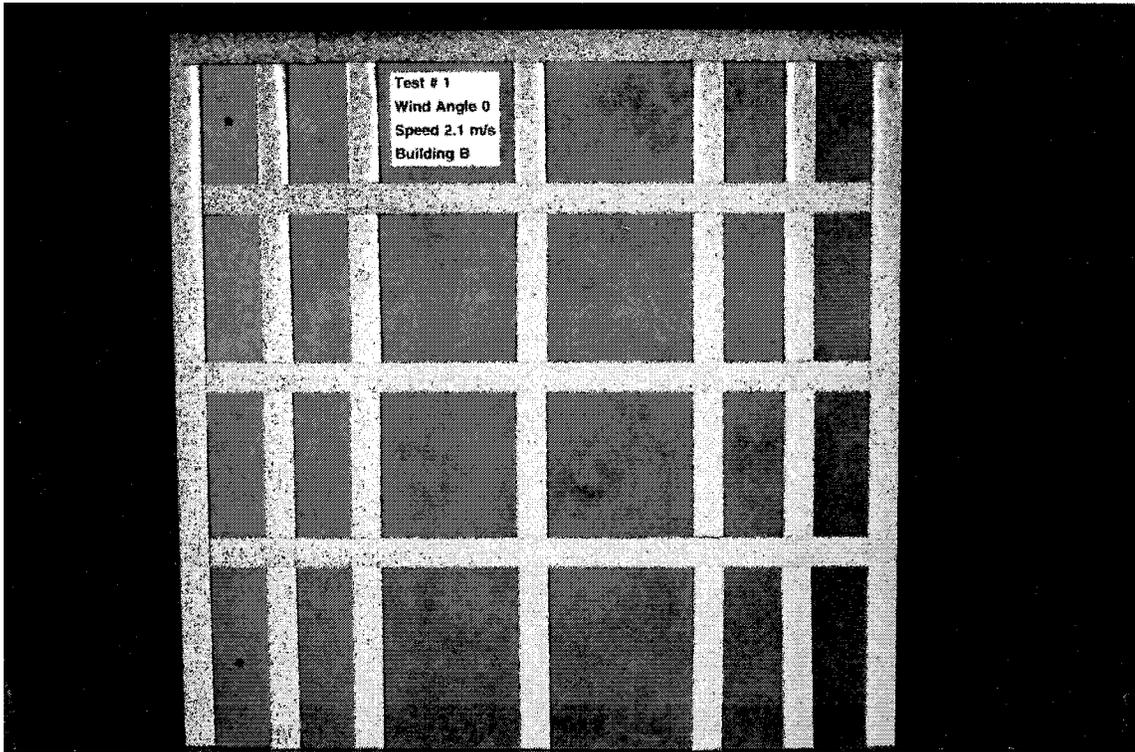


Figure D.1a. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment B, angle du bâtiment=0 degré, côté large seulement

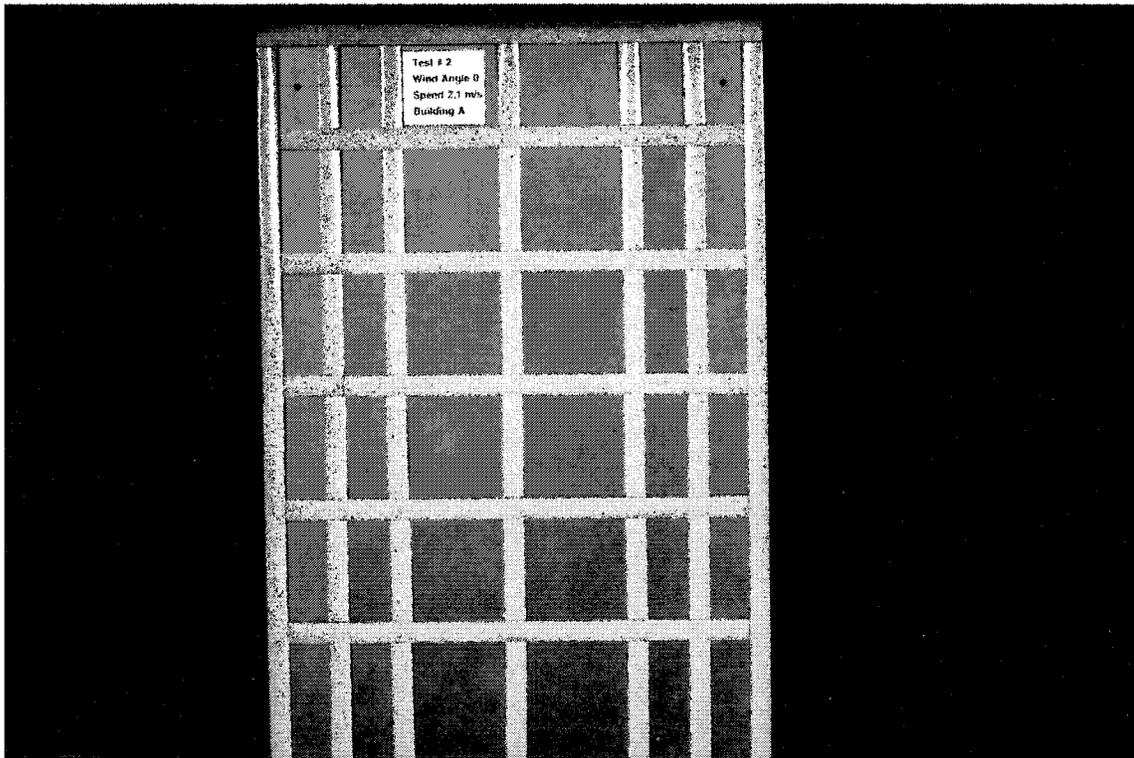


Figure D.1b. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment A, angle du bâtiment=0 degré, côté large seulement

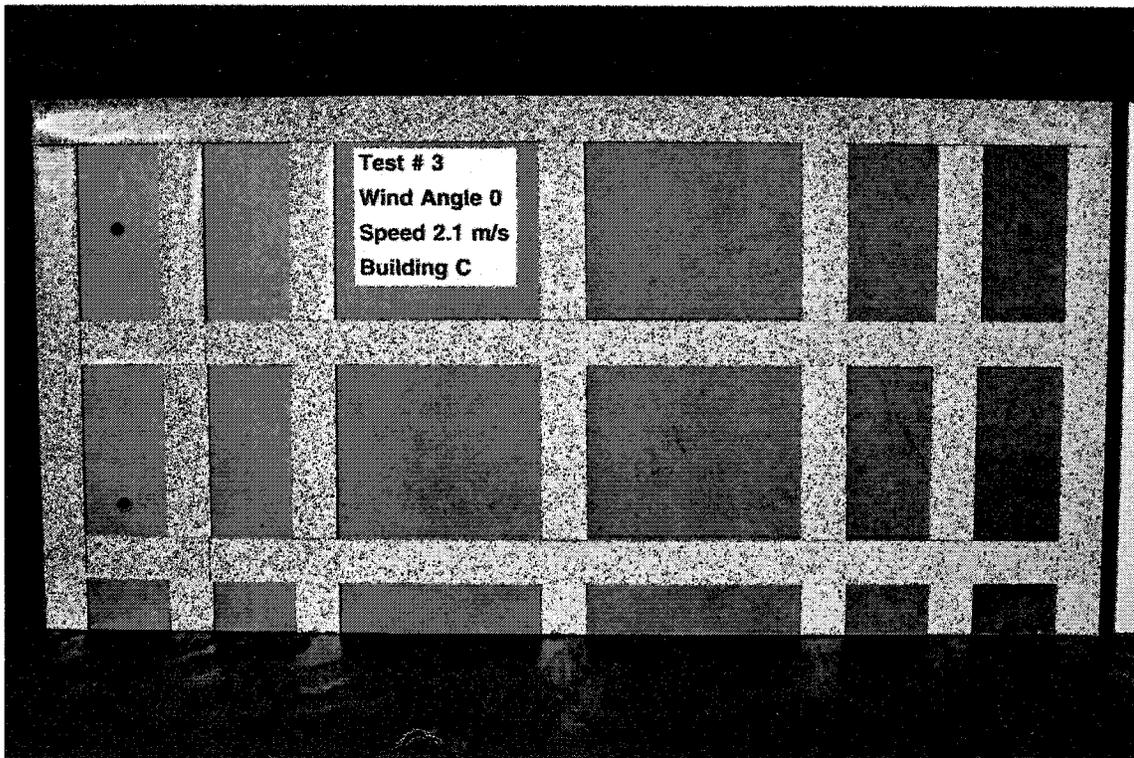


Figure D.1c. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment C, angle du bâtiment=0 degré, côté large seulement

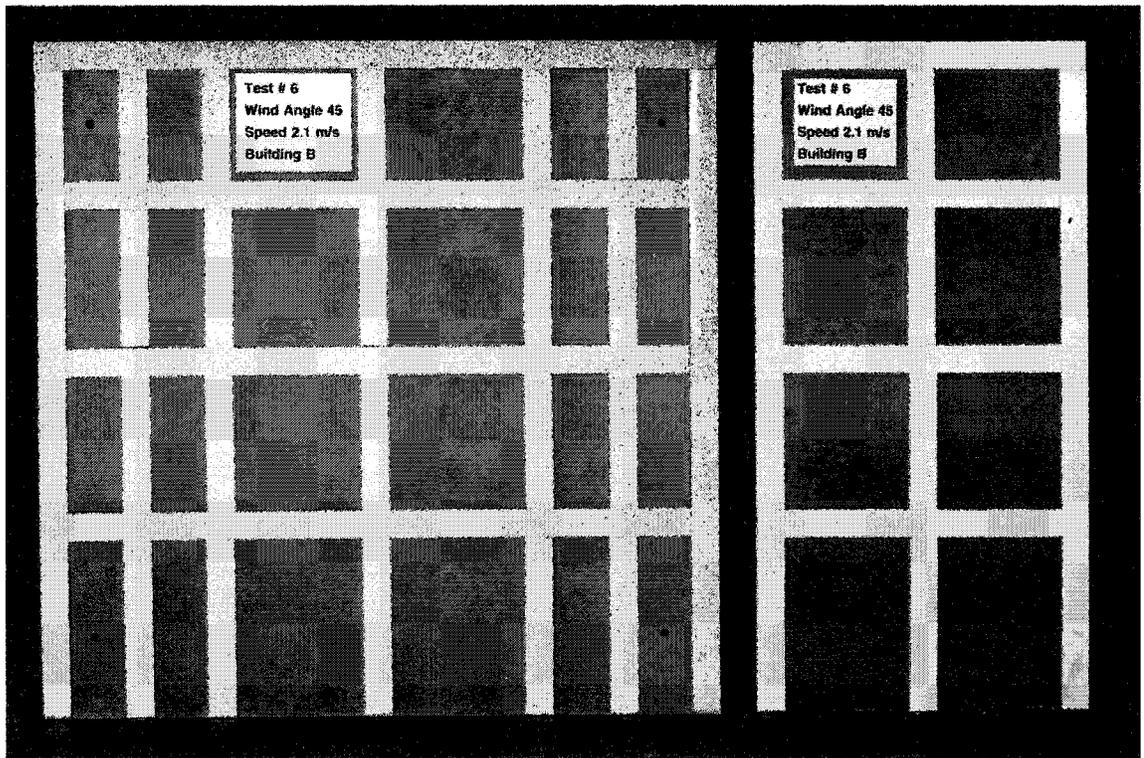


Figure D.2a. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment B, angle du bâtiment=45 degrés

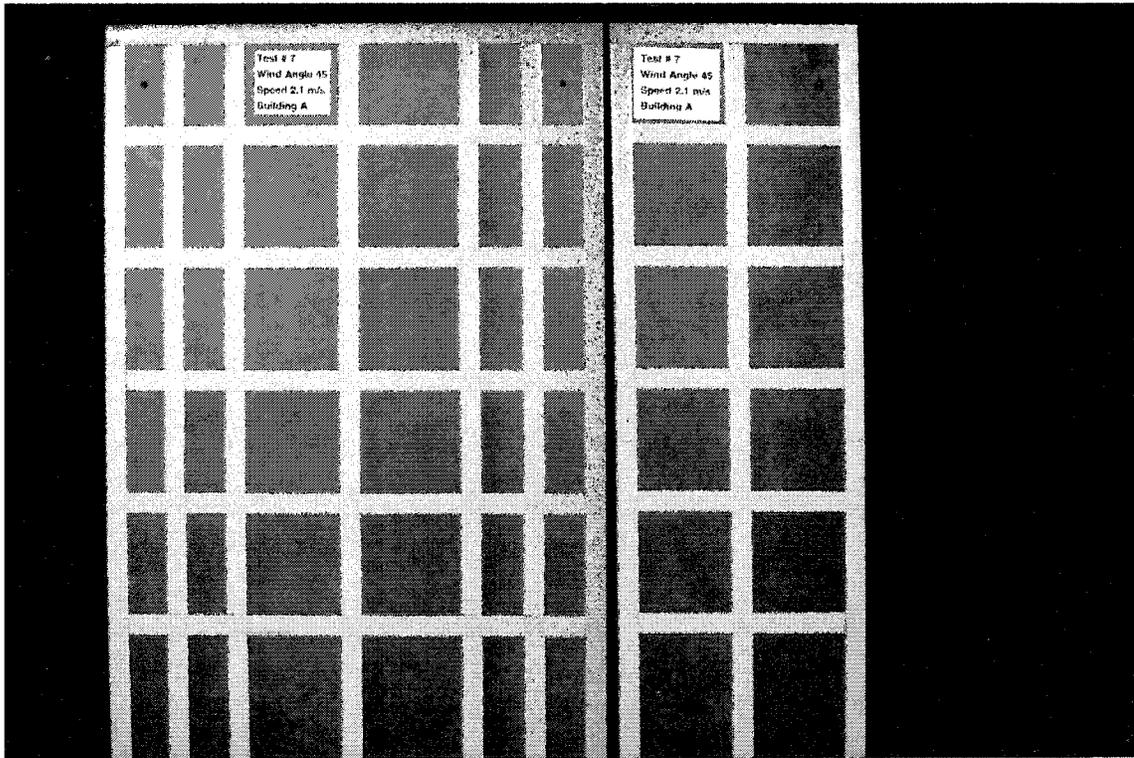


Figure D.2b. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment A, angle du bâtiment=45 degrés

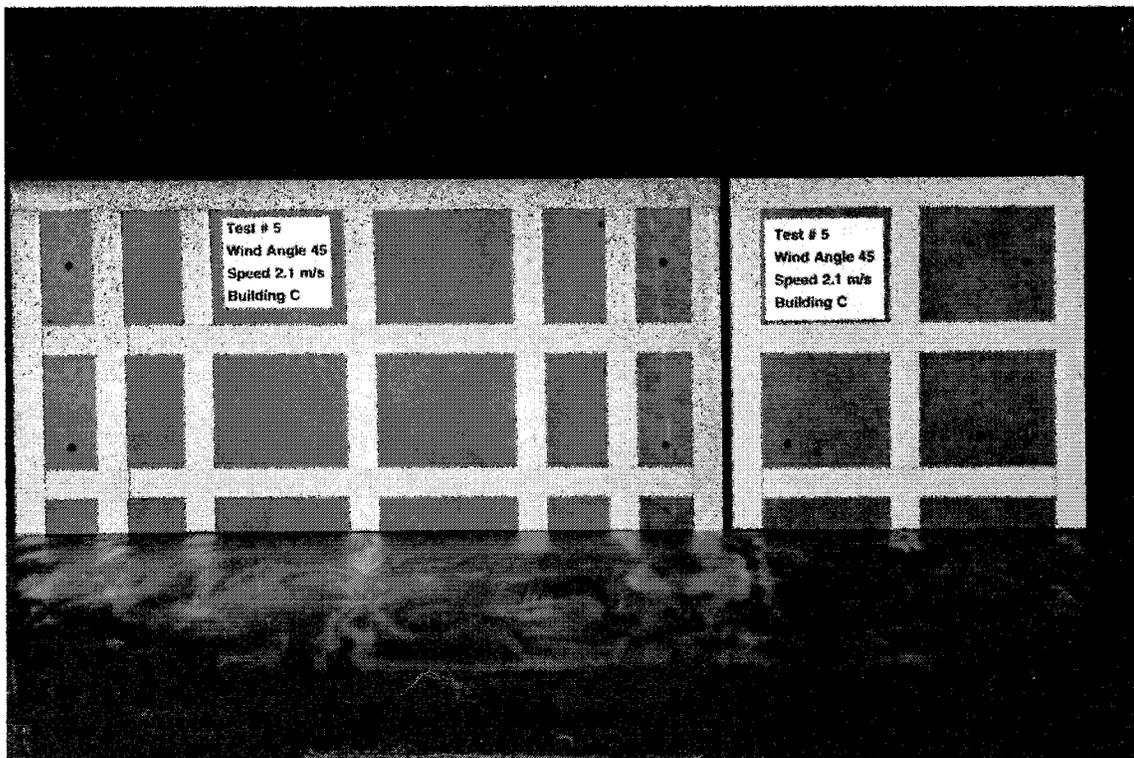


Figure D.2c. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment C, angle du bâtiment=45 degrés

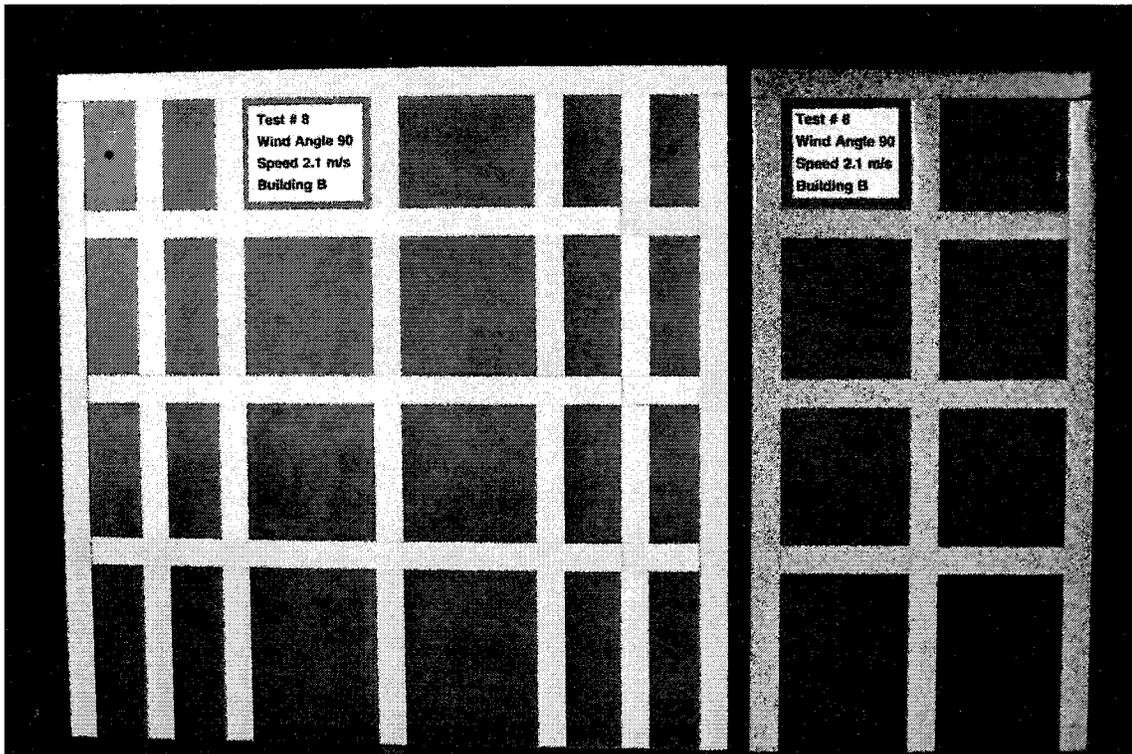


Figure D.3a. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment B, angle du bâtiment=90 degrés

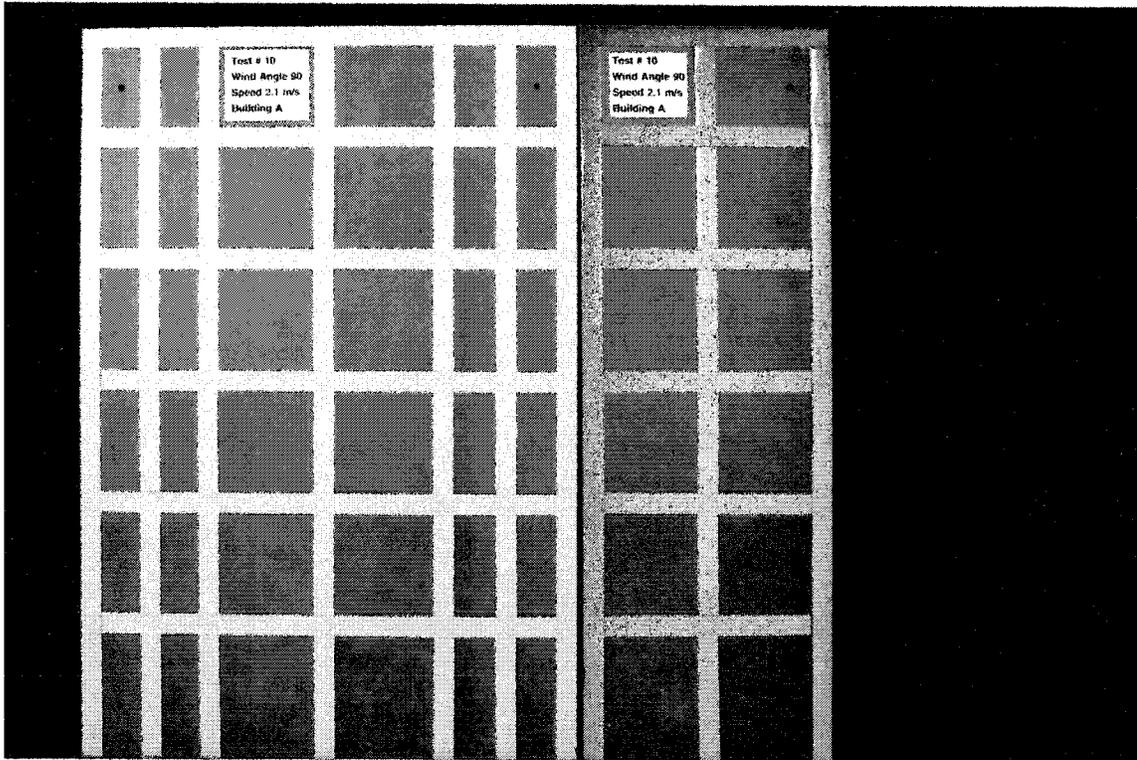


Figure D.3b. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment A, angle du bâtiment=90 degrés

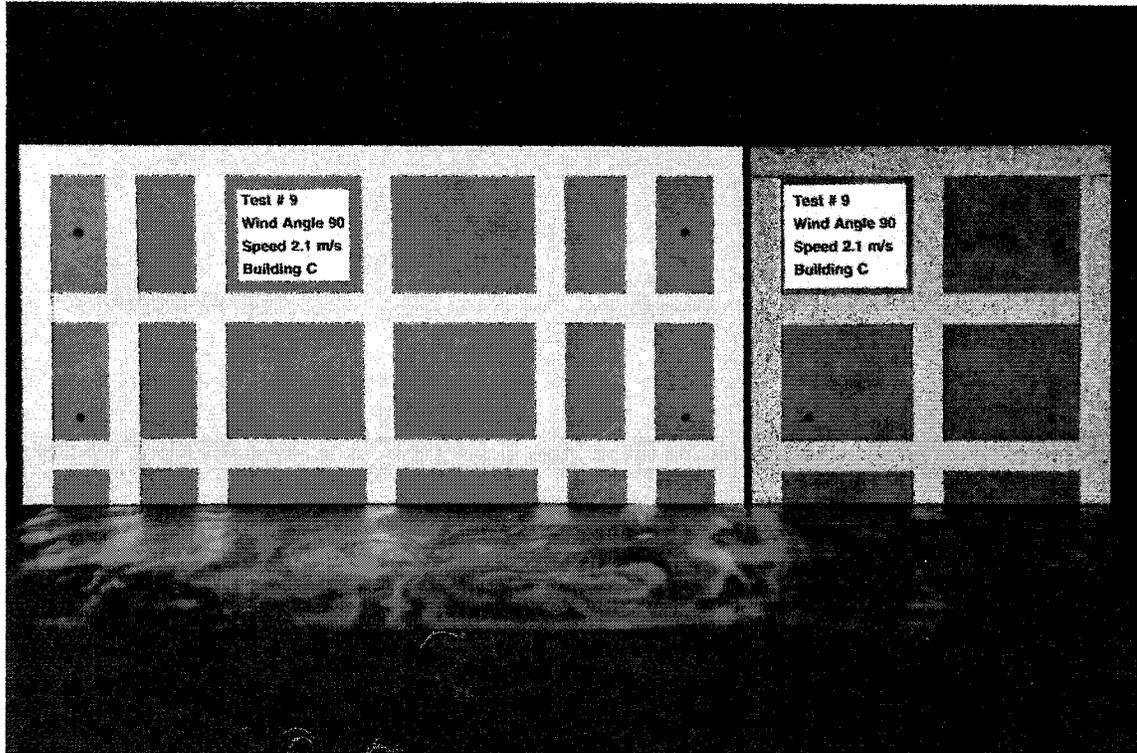
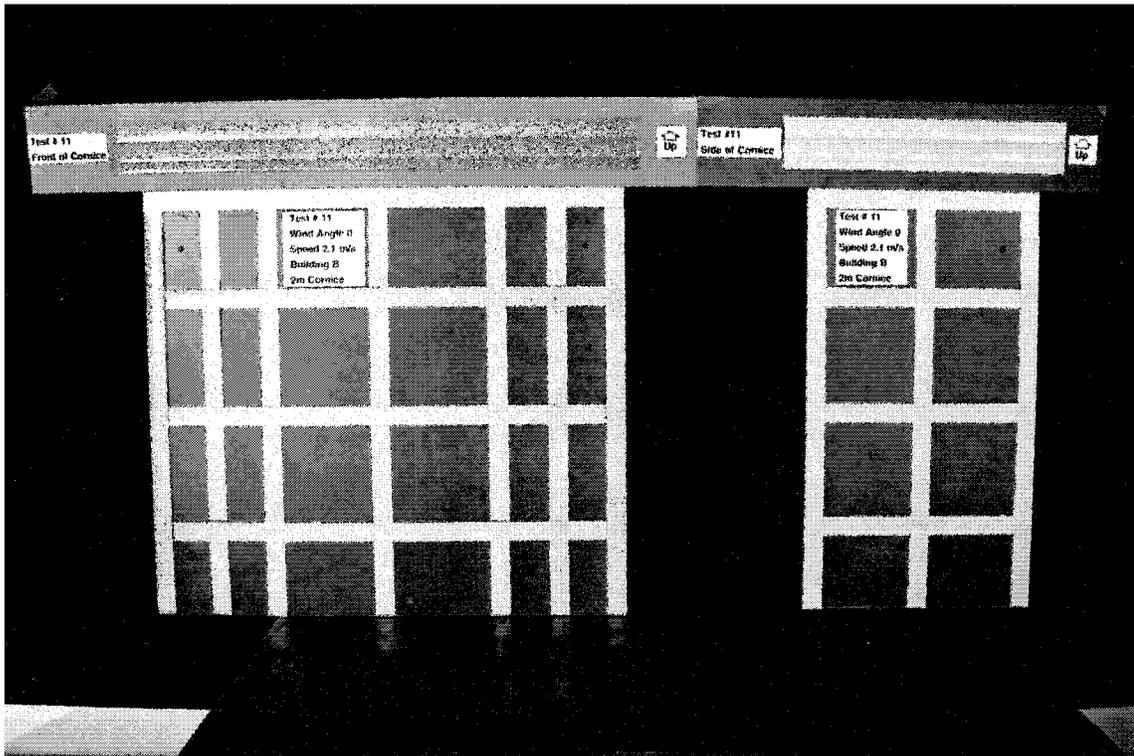


Figure D.3c. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment C, angle du bâtiment=90 degrés



note: cornice is mounted upside down in photograph

Figure D.4a. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment B avec corniche de 2 m, angle du bâtiment=0 degré

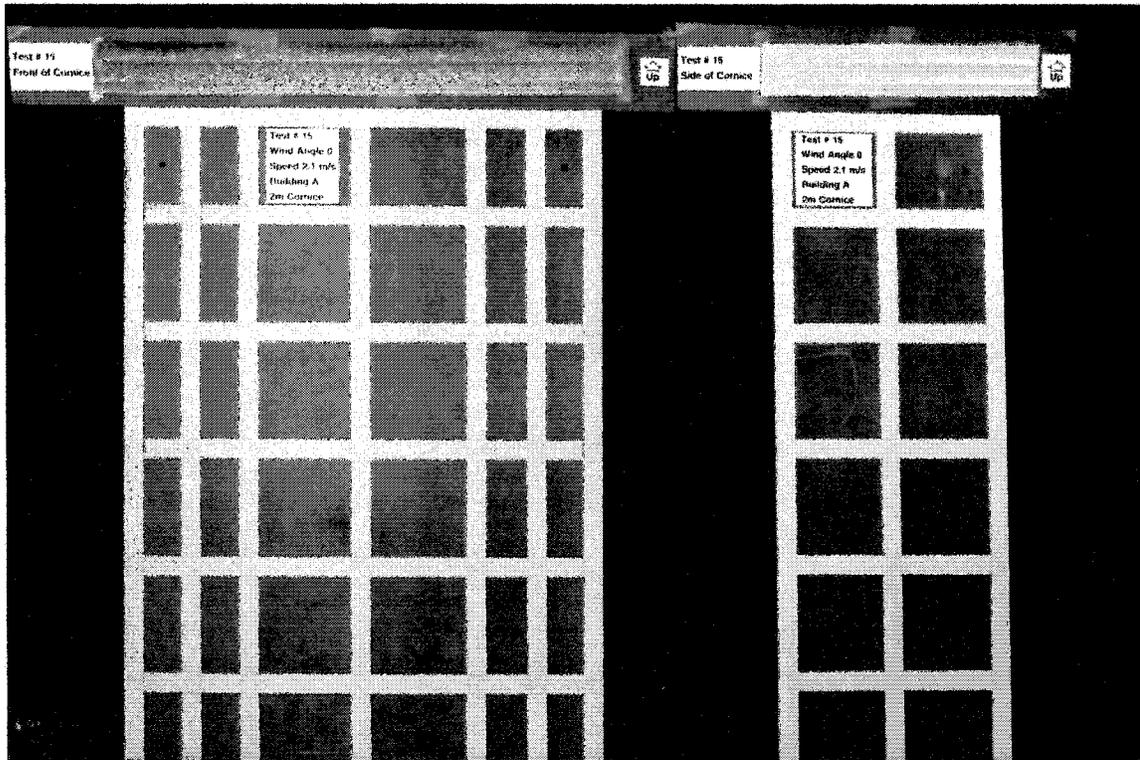


Figure D.4b. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment A avec corniche de 2 m, angle du bâtiment=0 degré

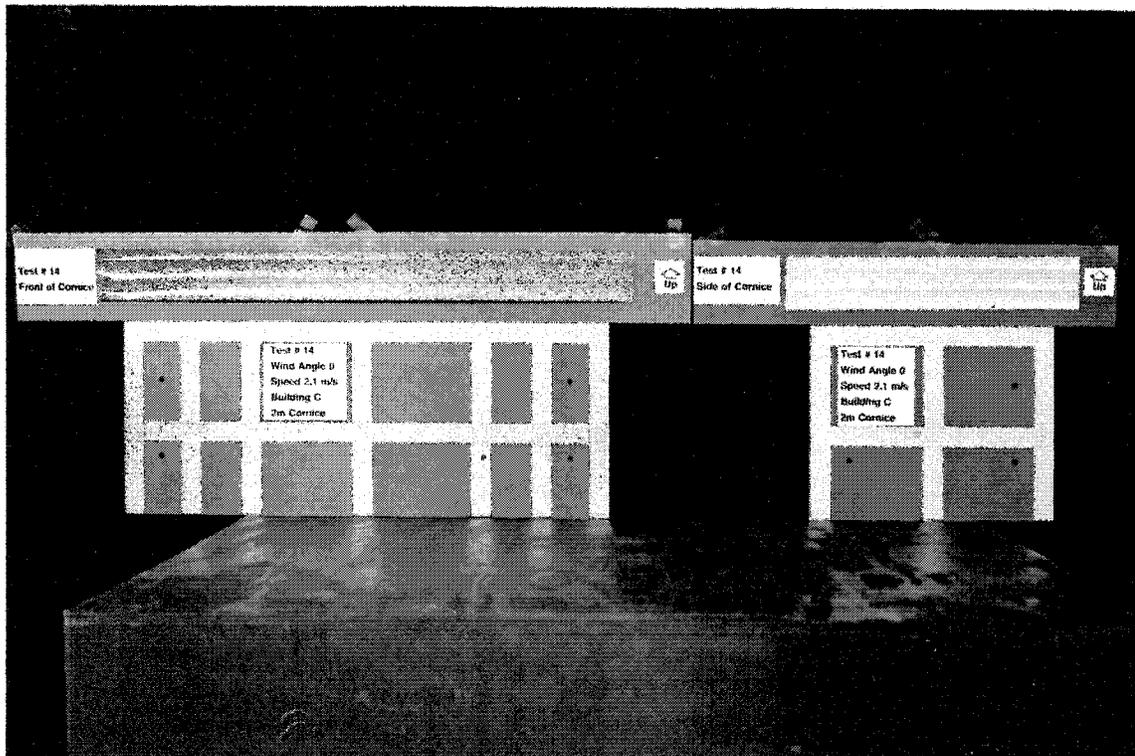


Figure D.4c. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment C avec corniche de 2 m, angle du bâtiment=0 degré

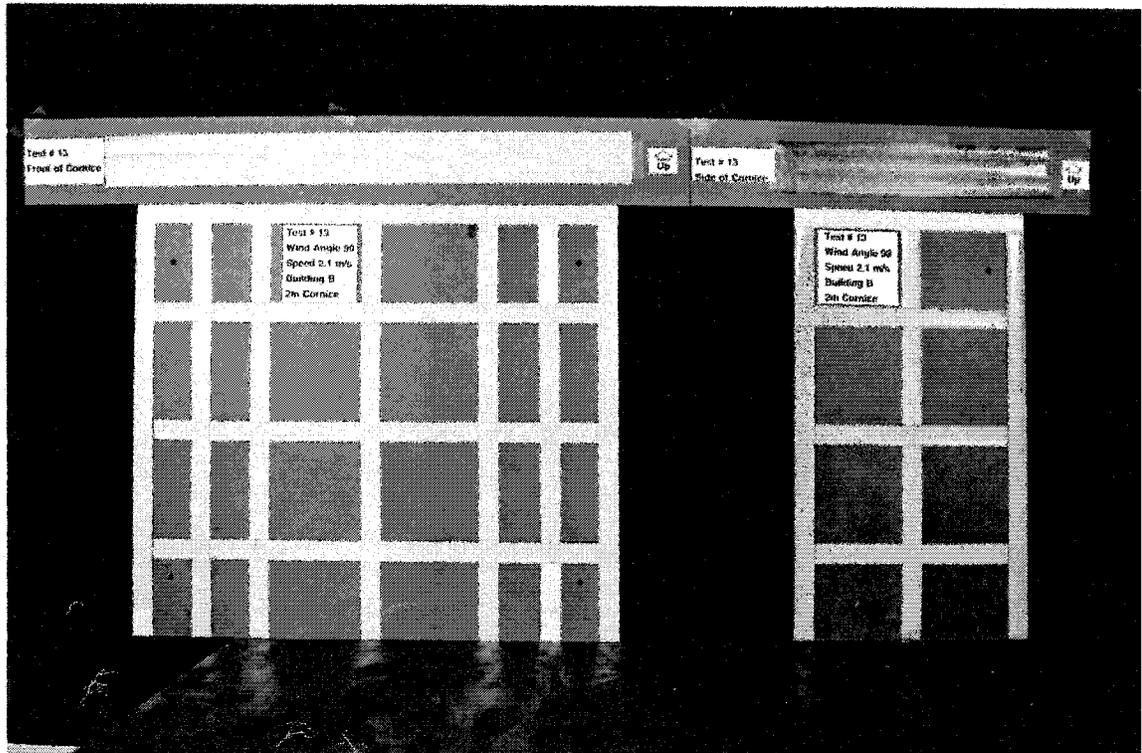
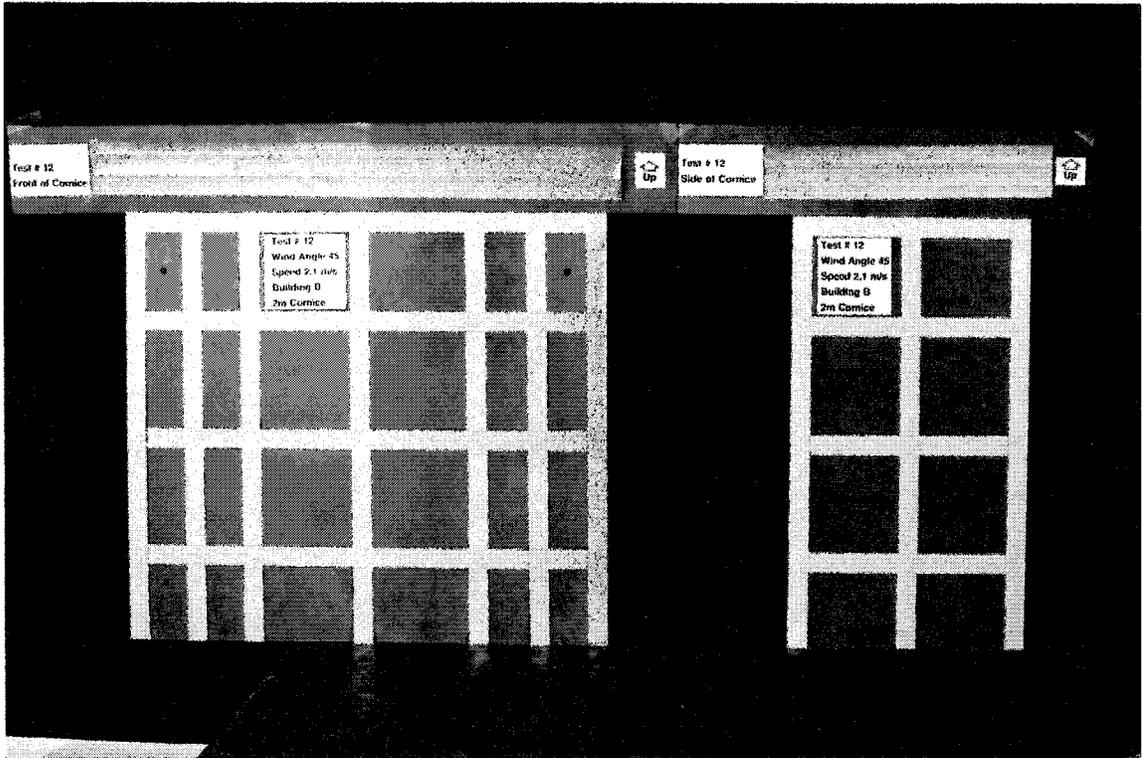


Figure D.5. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment B avec corniche de 2 m, angles du bâtiment=45 et 90 degrés

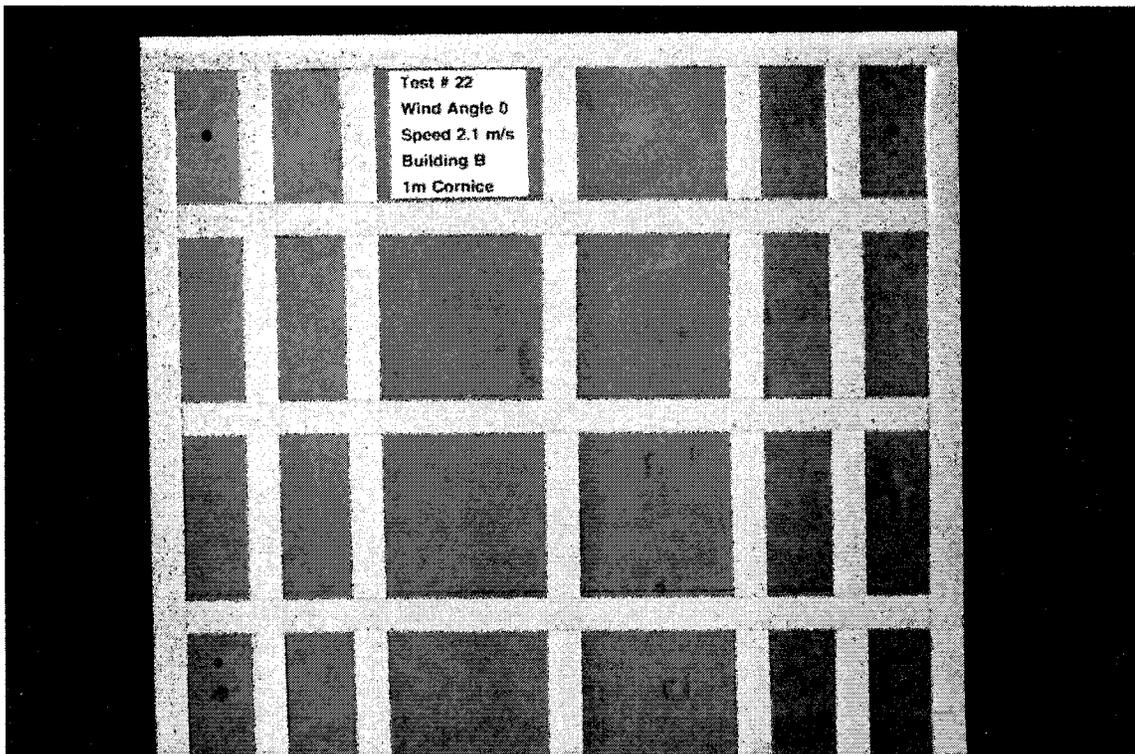


Figure D.6a. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment B avec corniche de 1 m, angle du bâtiment=0 degré, côté large seulement

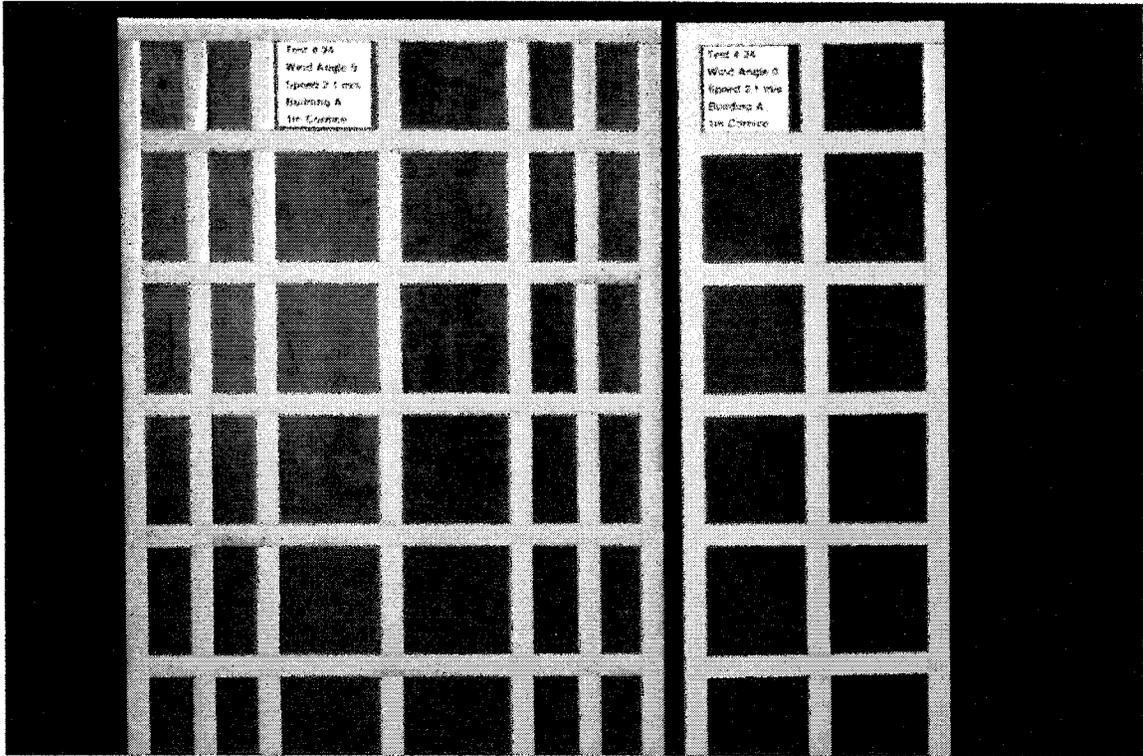


Figure D.6b. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment A avec corniche de 1 m, angle du bâtiment=0 degré

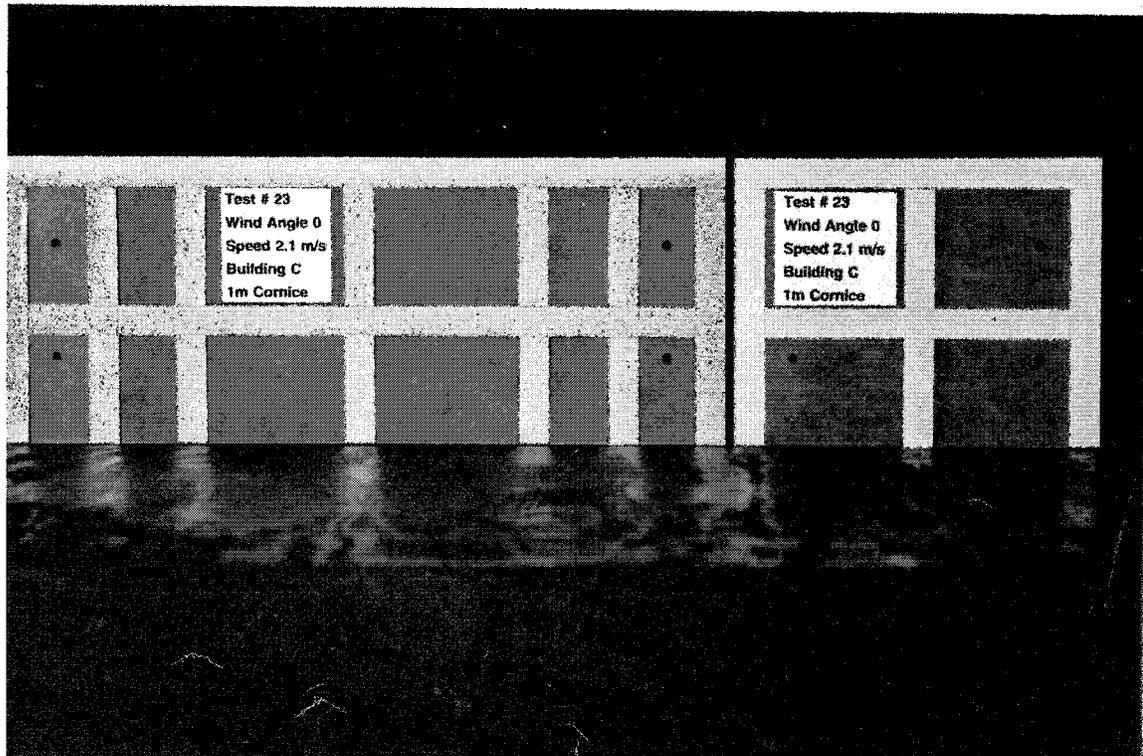


Figure D.6c. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment C avec corniche de 2 m, angle du bâtiment=0 degré

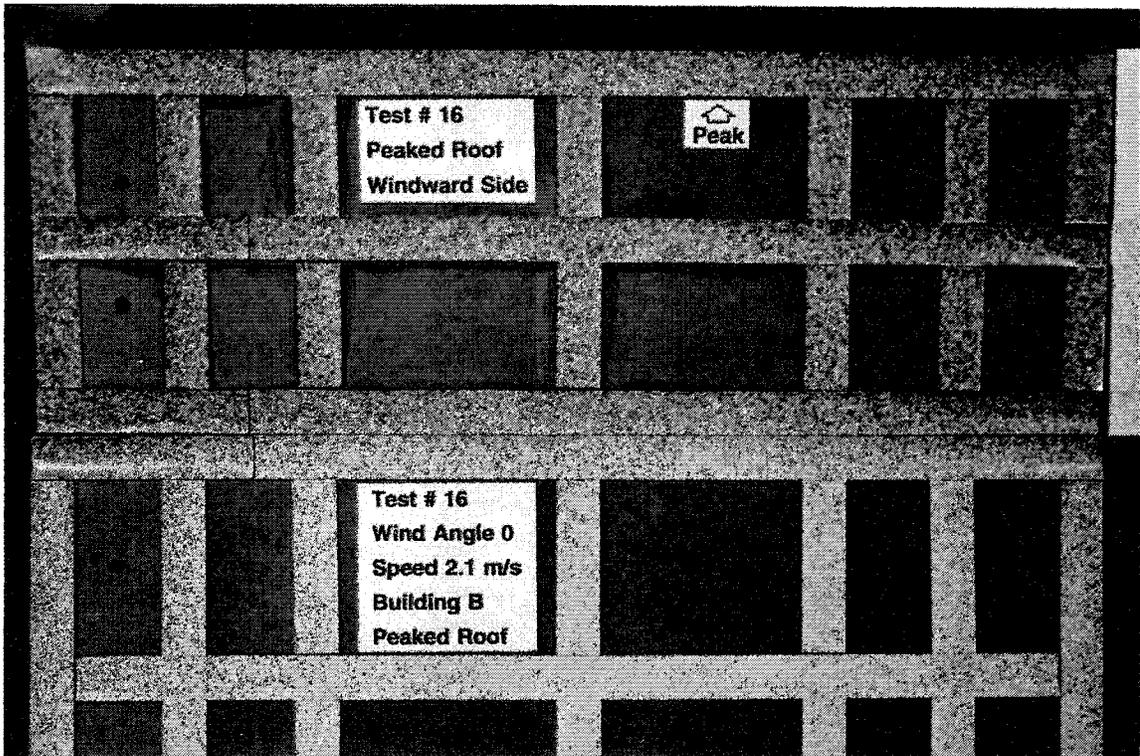
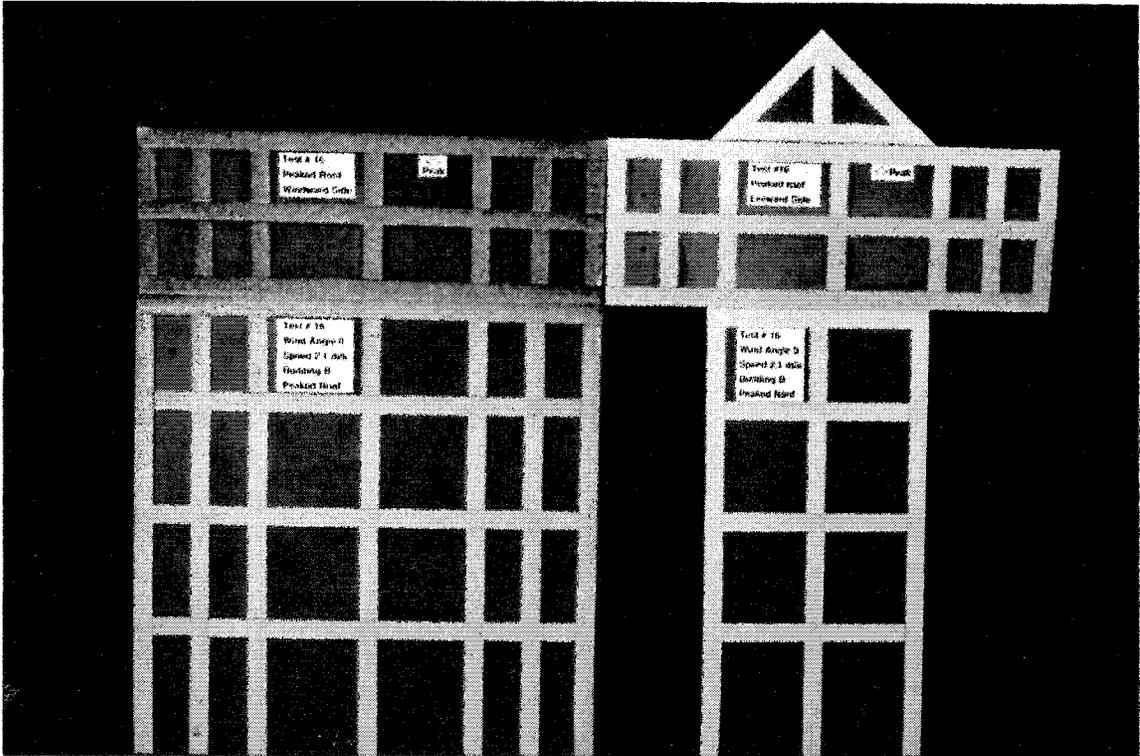


Figure D.7. Distribution complète du mouillage et détail à la phase II, bâtiment B avec toit pointu, angles du bâtiment=0 degré

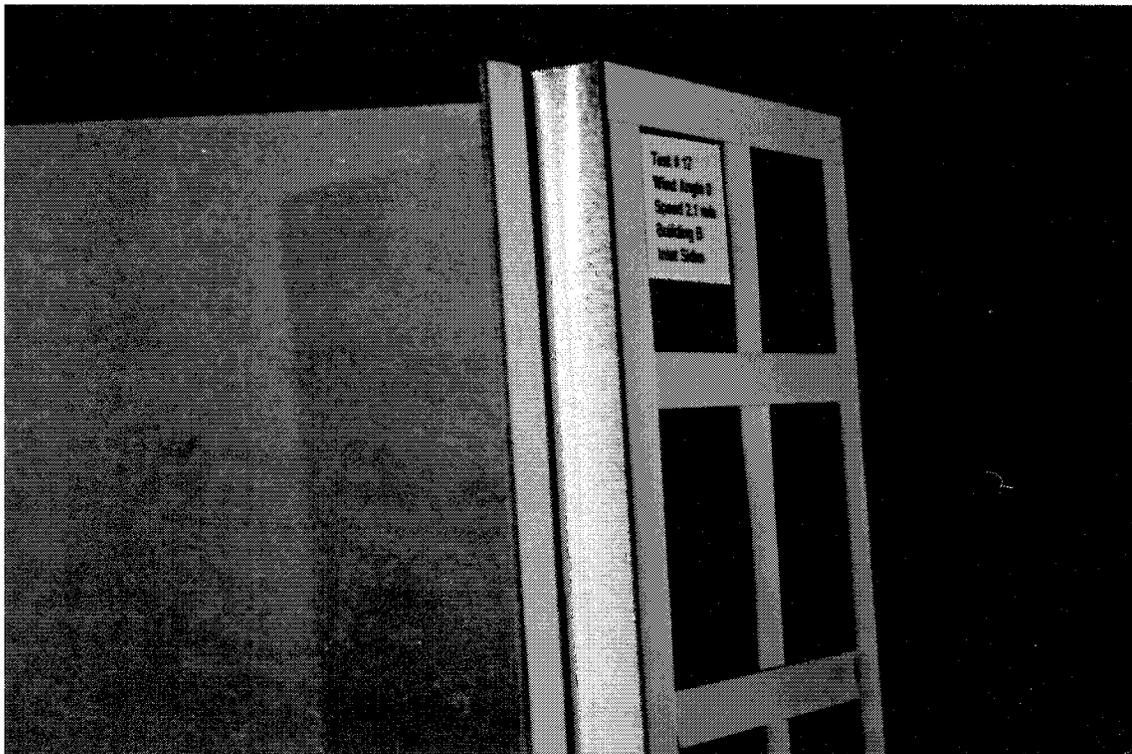
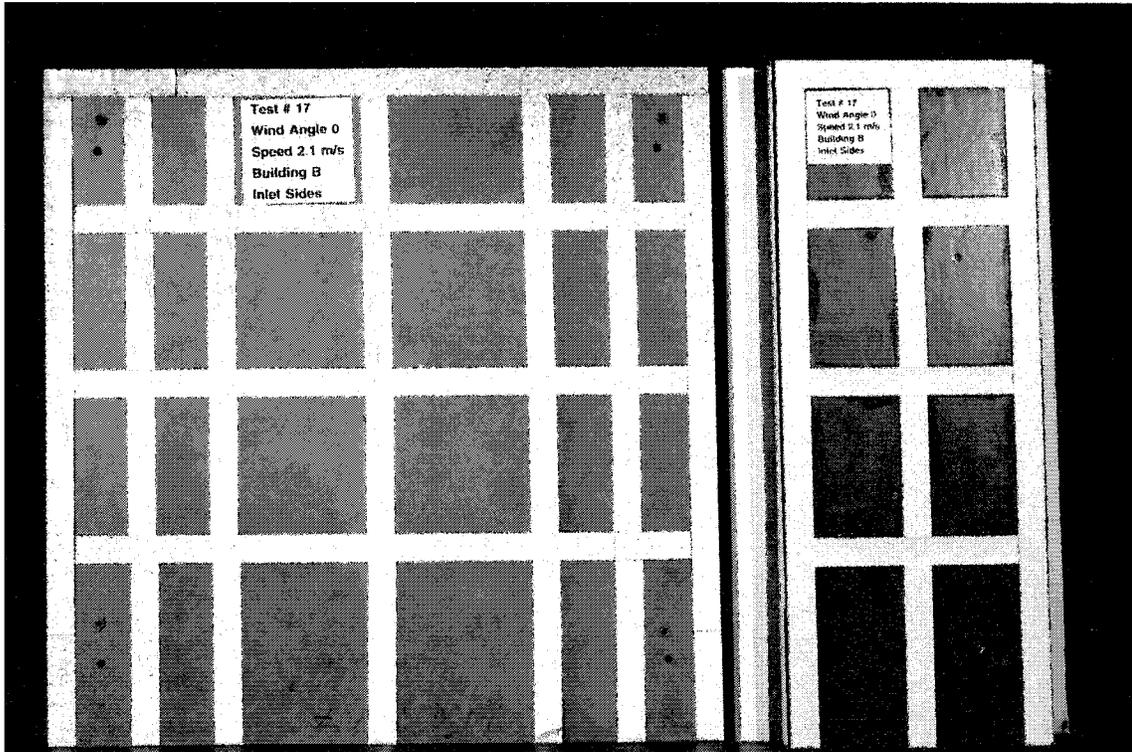


Figure D.8. Distribution complète du mouillage et détail à la phase II, bâtiment B avec coins rentrants, angles du bâtiment=0 degré

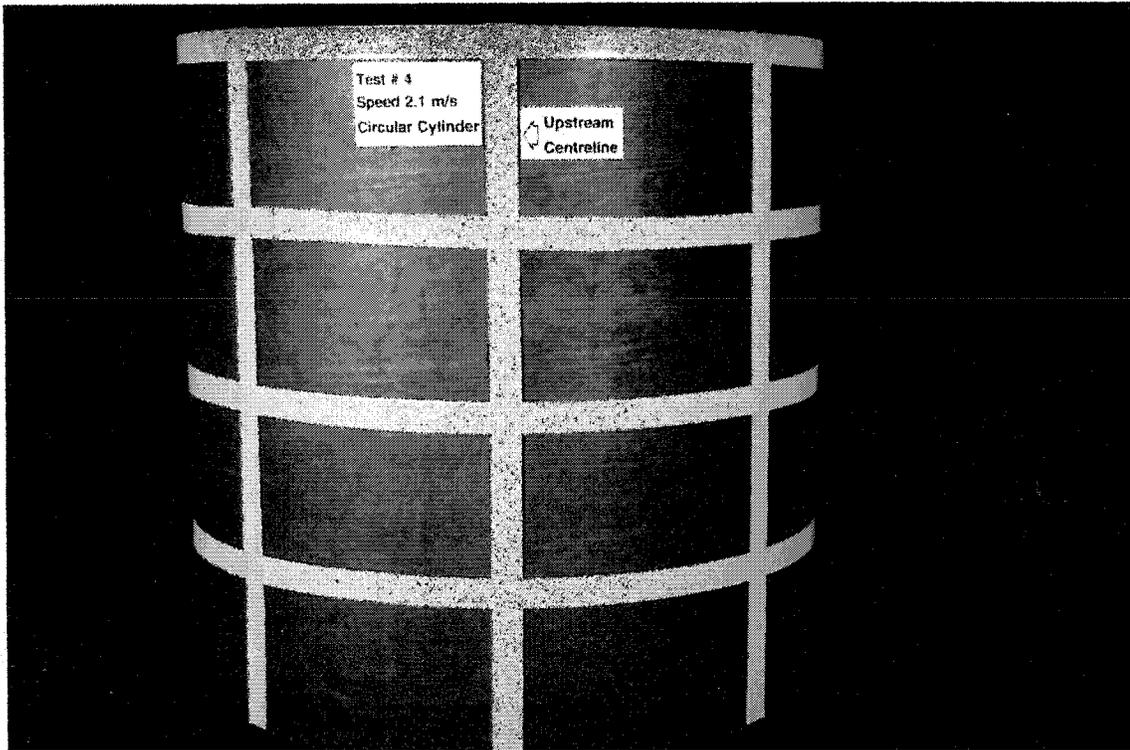


Figure D.9a. Distribution du mouillage, bâtiment cylindrique

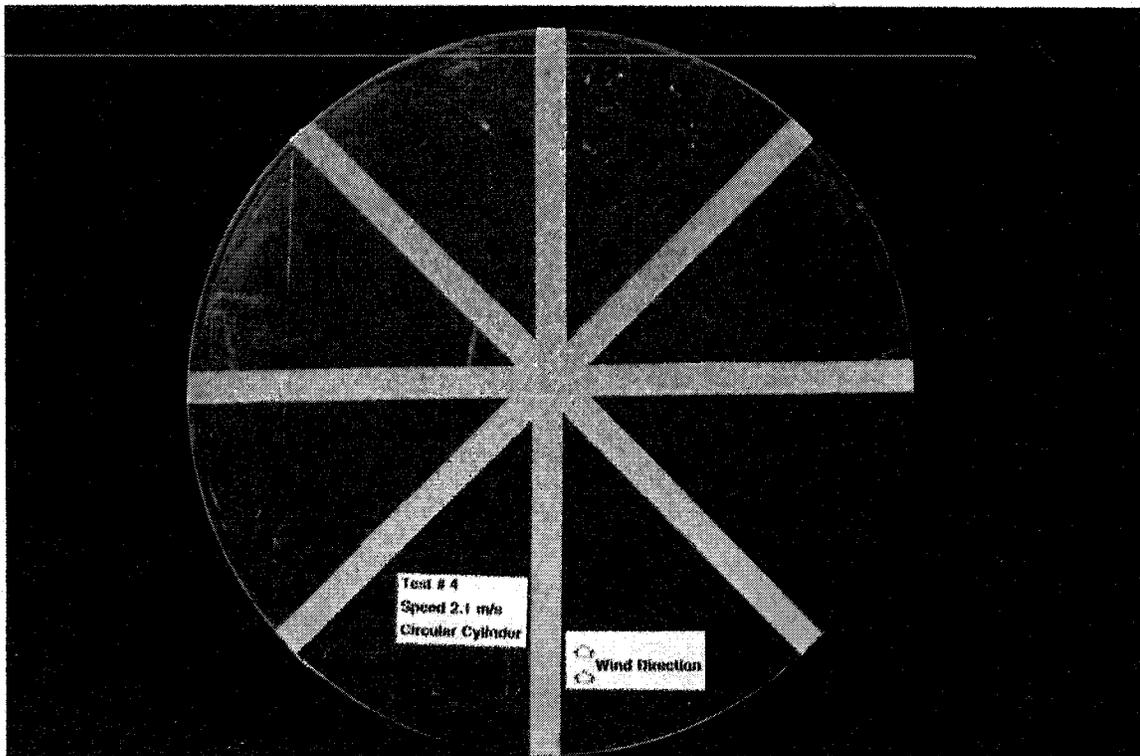
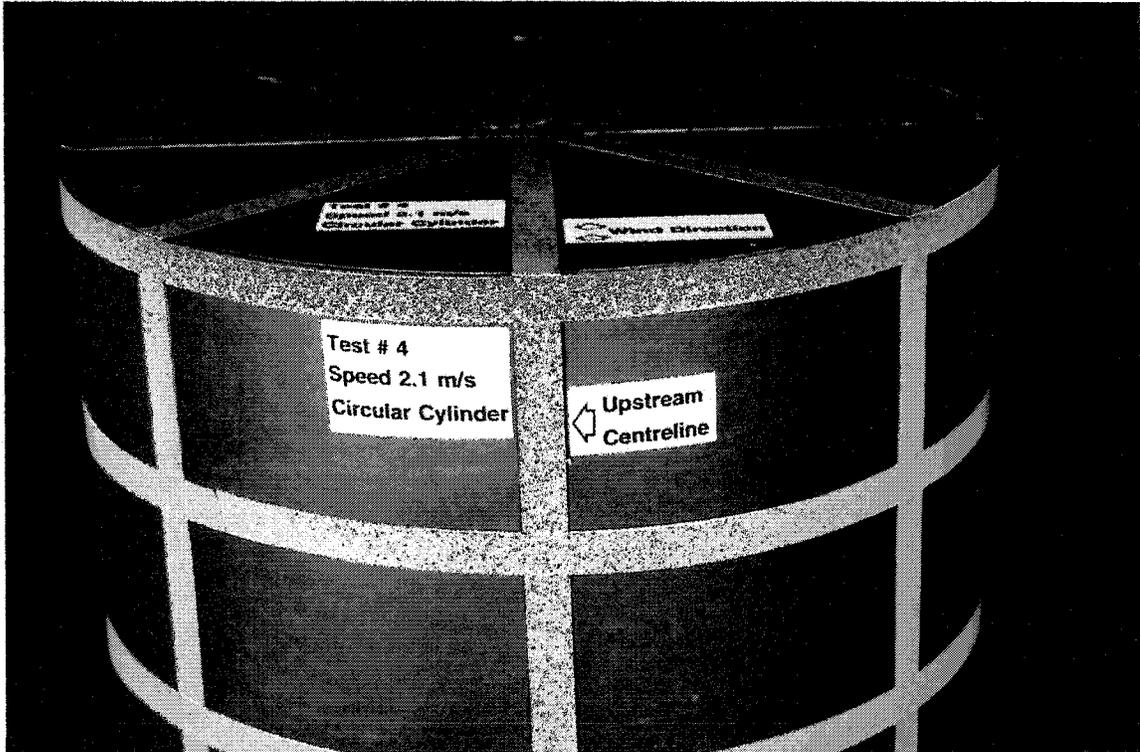


Figure D.9b. Détail de la distribution du mouillage, bâtiment cylindrique

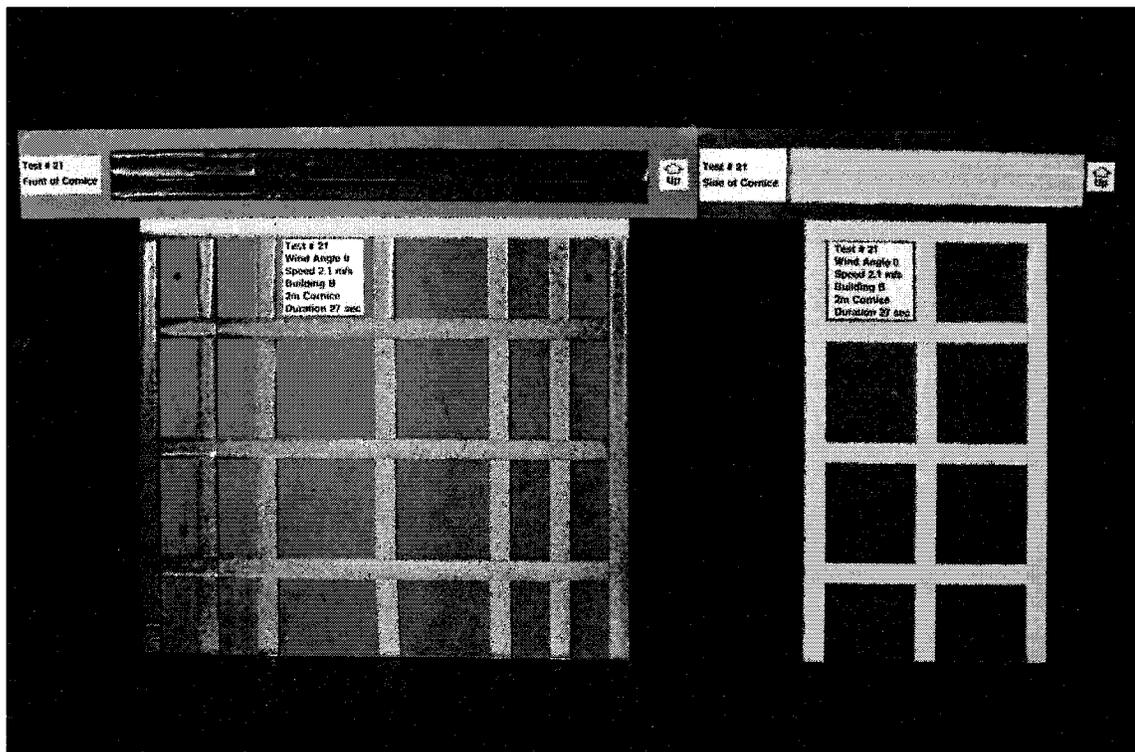


Figure D.10a. Distribution complète du mouillage à la phase II, bâtiment B avec corniche de 2 m, angle du bâtiment=0 degré, durée de l'essai=27 sec

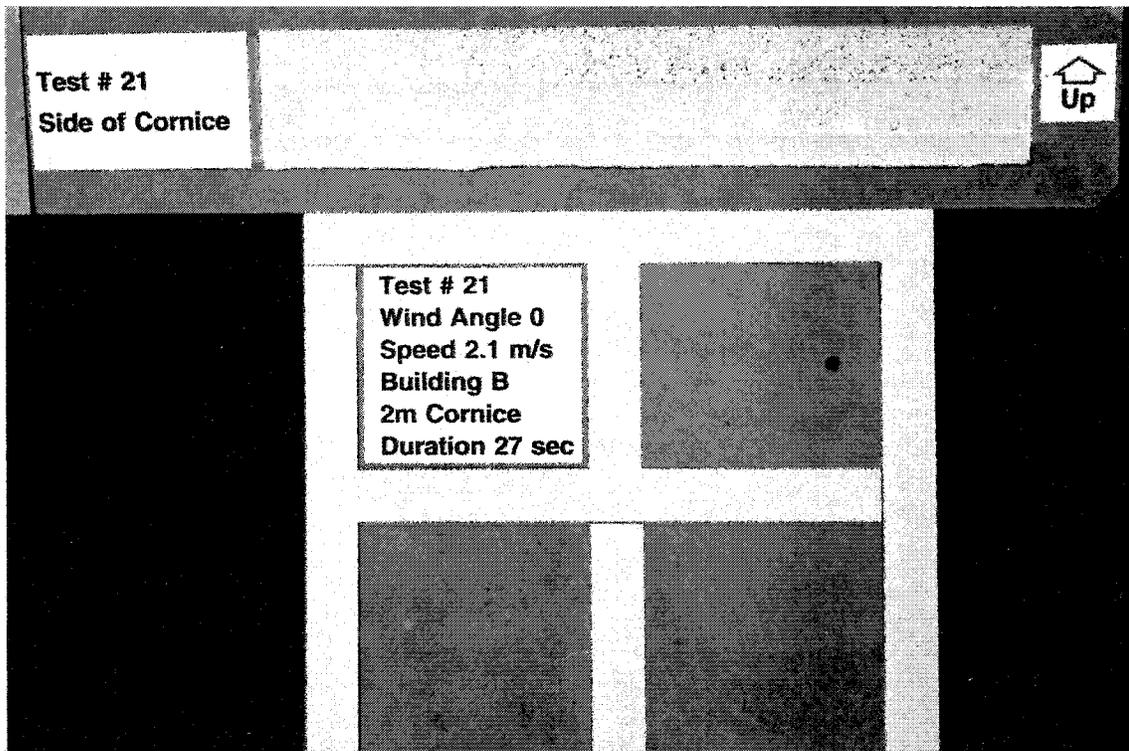
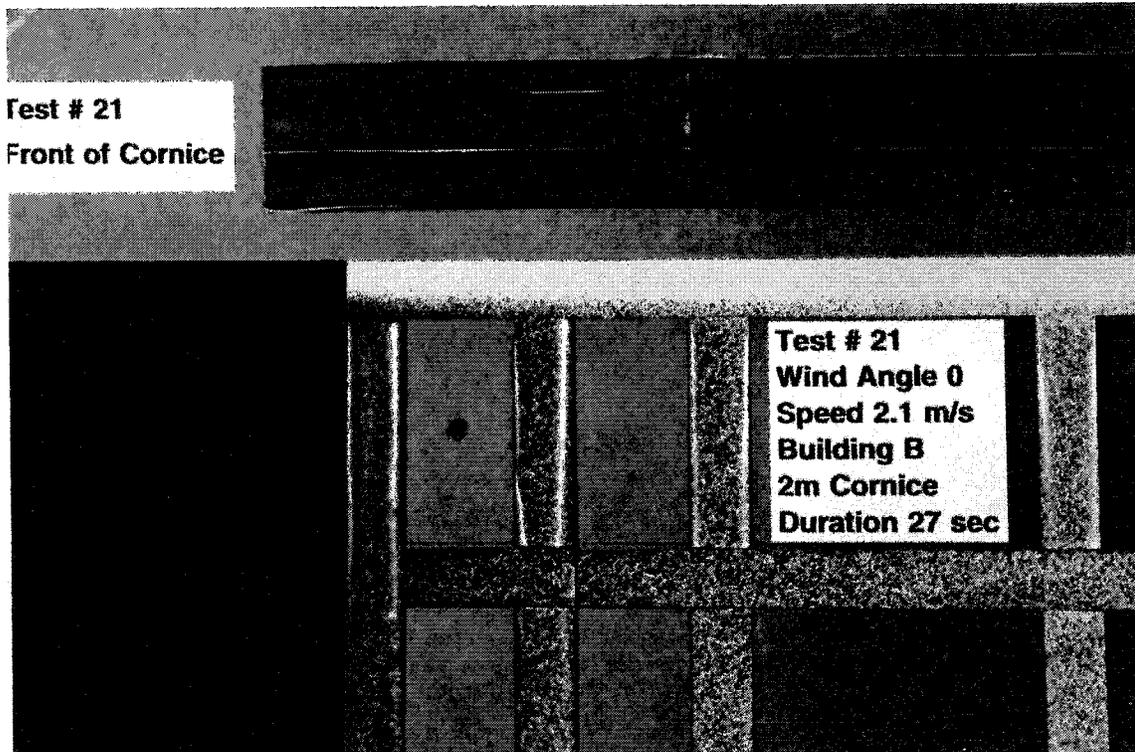


Figure D.10b. Détail de la distribution du mouillage à la phase II, bâtiment B avec corniche de 2 m, angle du bâtiment=0 degré, durée de l'essai=27 sec

ANNEXE E

VITESSES TERMINALES DES GOUTTES D'EAU

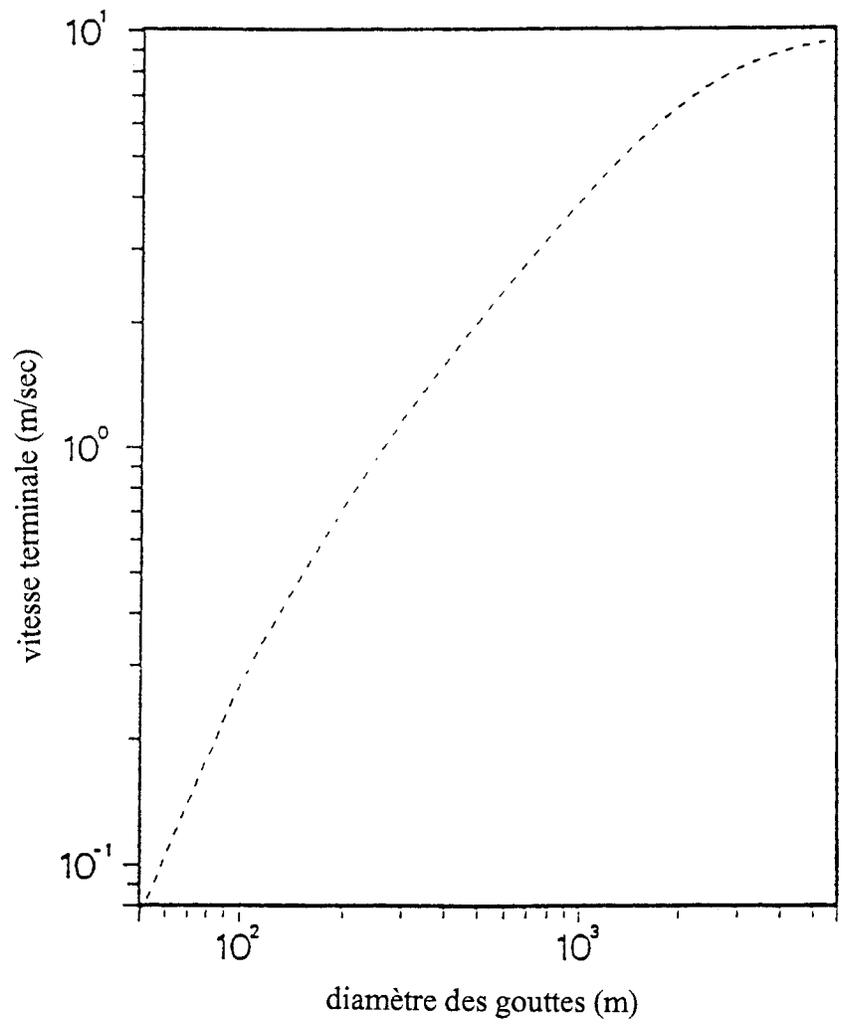


Figure E.1. Vitesse terminale en fonction du diamètre des gouttes d'eau (d'après la loi de Stokes [7], [10])

ANNEXE F

LES EFFETS DE LA PLUIE SUR LE VENT

Lorsque des gouttes de pluie tombent à travers un vent constant et uniforme, elles suivent une trajectoire rectiligne inclinée dont l'angle est défini par la composition de leur vitesse terminale verticale et de la vitesse horizontale du vent. Autrement dit, les gouttes de pluie n'ont pas de vitesse horizontale par rapport à l'air dans des conditions d'équilibre et dans un vent constant et uniforme.

Dans des circonstances réelles, la vitesse moyenne du vent diminue à l'approche du sol, et le niveau de turbulence augmente. Cela implique que les gouttes de pluie ne sont plus en équilibre. La vitesse moyenne locale et les écarts dus à la turbulence exercent des forces sur les gouttes. Des forces égales et opposées s'exercent sur le vent et la turbulence. La question se pose alors de savoir si l'interaction entraîne des modifications importantes dans les caractéristiques du vent. Si la réponse est oui, il faut savoir si l'interaction est identique à échelle réduite et grandeur nature.

L'exemple qui suit permettra d'apprécier l'ordre de grandeur de l'effet possible sur le profil de la vitesse moyenne : considérons un taux de précipitation de 10 mm/h dans un vent moyen de 5 m/sec, à 10 m de hauteur et en terrain découvert. En haut de la couche limite, à disons 300 m d'altitude, la vitesse moyenne correspondante devrait être approximativement de 8 m/sec. Si on suppose que c'est la vitesse horizontale de la pluie à son entrée dans la couche limite et que, quelle que soit la taille des gouttes, cette vitesse diminue encore de moitié avant d'atteindre le sol (4 m/sec au sol horizontalement, soit l'équivalent de la vitesse moyenne à une hauteur de 2 m), on peut déterminer la quantité de mouvement perdue dans le vent moyen. La masse d'eau qui traverse la couche limite en une heure est de 10 kg par mètre carré de surface plane. Par conséquent, la force totale communiquée (qui s'exerce pour accélérer la partie inférieure de la couche limite) par mètre

carré de surface plane est égale à $10 \text{ kg/m}^2 \cdot 4 \text{ m/sec} = 40 \text{ N/m}^2$. C'est l'équivalent d'une contrainte de cisaillement qui agirait dans le sens contraire de la traînée de frottement normale. À titre de comparaison, la contrainte de cisaillement typique à 10 m, pour cet écoulement de couche limite, est d'environ 0,15 N/m².

La contribution de la pluie est inférieure à 8 %. En comparaison, le passage d'un terrain découvert à une zone de banlieue multiplie par 3 la contrainte de cisaillement. Par conséquent, au plus, la pluie fait en sorte que l'écoulement moyen dans la couche limite se comporte comme s'il se trouvait au-dessus d'un terrain à peine plus lisse que la réalité.

L'effet de la pluie sur la turbulence est plus difficile à évaluer analytiquement parce que les gouttes de pluie sont continuellement en situation de non-équilibre; toutefois, les fluctuations de turbulence sont étroitement liées aux contraintes de cisaillement mentionnées ci-dessus, de sorte que cela laisse penser qu'un résultat identique pourrait en découler. Comme autre option, une expérience simple a été effectuée pour examiner les effets possibles à l'aide du modèle et de l'installation du tunnel aérodynamique décrits à la référence F.1. Une prise de pression, située en un point à mi-largeur et aux 3/4 de la hauteur de la face avant du bâtiment, a été surveillée dans un écoulement atmosphérique simulé, avec et sans la simulation de pluie décrite dans le texte

principal. Comme la pluie modélisée a considérablement plus de masse par unité de volume que dans l'hypothèse d'une simple mise à l'échelle géométrique (à cause du besoin d'harmoniser les vitesses terminales), ce devrait être un essai prudent. Sur la face avant, il existe une relation relativement simple, en l'occurrence une fonction de transfert linéaire, entre les fluctuations de vitesse et les fluctuations résultantes de pression; par conséquent, la deuxième grandeur devrait traduire la première. La difficulté posée par l'entrée éventuelle de l'eau dans le tube de pression et la déformation des résultats qui s'ensuivrait a été résolue par l'emploi de prises de pression sous cache. Deux genres de cache ont été utilisés, l'un en forme de quart de sphère et l'autre en forme de demi-cylindre. Il est possible que ces caches aient introduit un petit supplément d'énergie à haute fréquence dans la pression, mais la circonstance était la même avec et sans pluie. Les résultats sont donnés aux figures F.1 et F.2. Aucune différence importante dans les spectres mesurés n'est visible, ce qui laisse supposer que l'influence de la pluie sur les propriétés de la turbulence est insignifiante, au moins aux taux de précipitation essayés. Pour ce qui est de la masse d'eau contenue dans l'écoulement, on peut déduire le taux de précipitation simulé au moyen de relations linéaires de mise à l'échelle, ce qui fait que, pour l'échelle de modélisation de 1/64, la simple mise à l'échelle géométrique du taux de précipitation donne un facteur de 8. Par conséquent, les taux mesurés, sur la base de cette simple mise à l'échelle de la masse, correspondent à des valeurs grandeur nature de l'ordre de 25 à 100 mm/h; c'est très intense (une mise à l'échelle stricte, qui retire la masse déformée nécessaire au maintien des vitesses terminales requises, donne des taux de l'ordre de 100 de moins que ces valeurs).

En résumé, il apparaît qu'il n'y a pas lieu de s'inquiéter de l'influence matérielle de la pluie sur les propriétés moyennes du vent ou de la turbulence, pour les taux modélisés typiquement employés et, probablement, pour des taux grandeur nature assez intenses. D'autres effets, comme la convection puissante qui peut accompagner les fortes pluies et d'autres variables, sont probablement dominants.

Cache I, quart de sphère

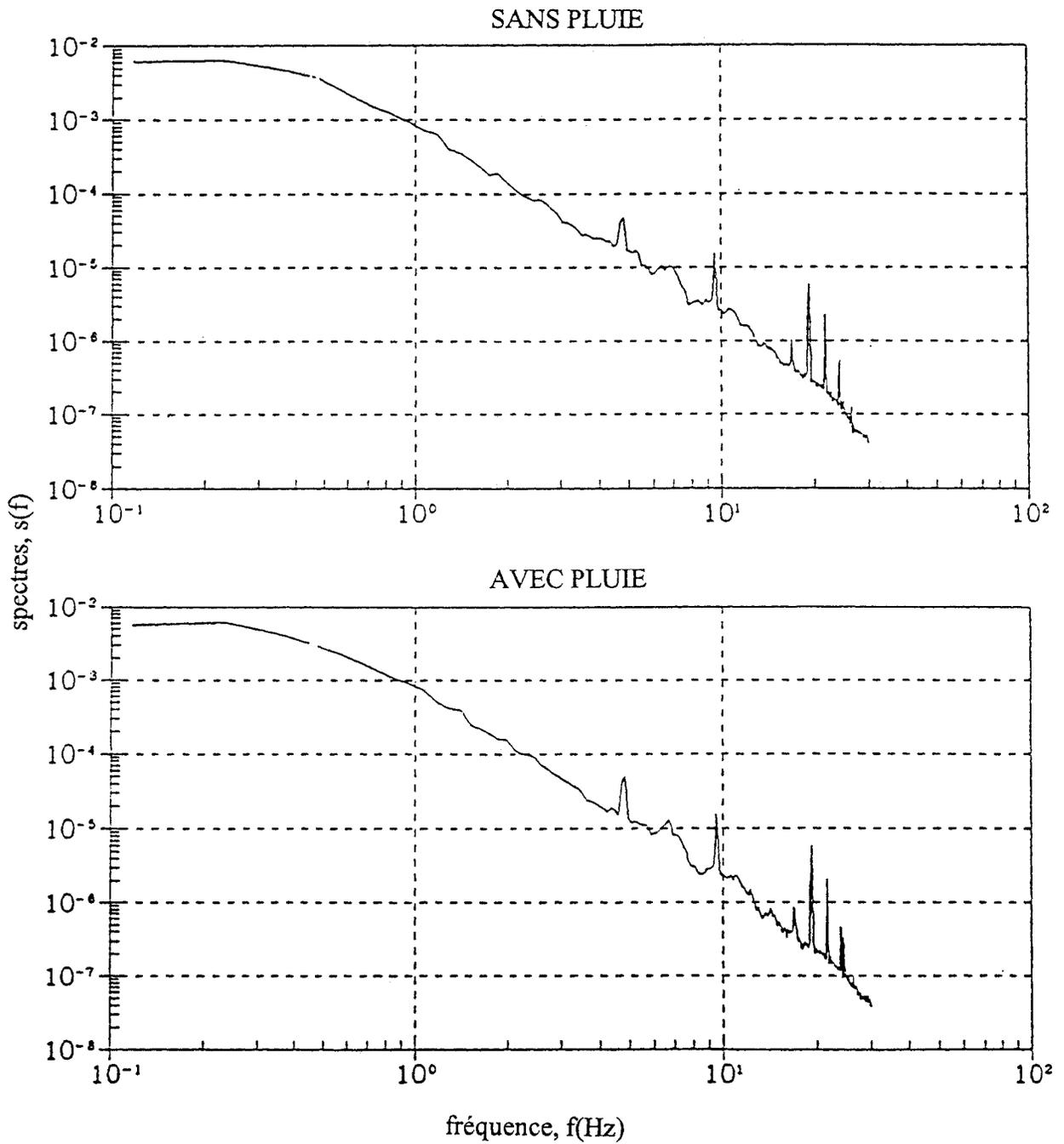


Figure F.1 Spectres d'énergie de pression mesurée

Cache II, demi-cylindre

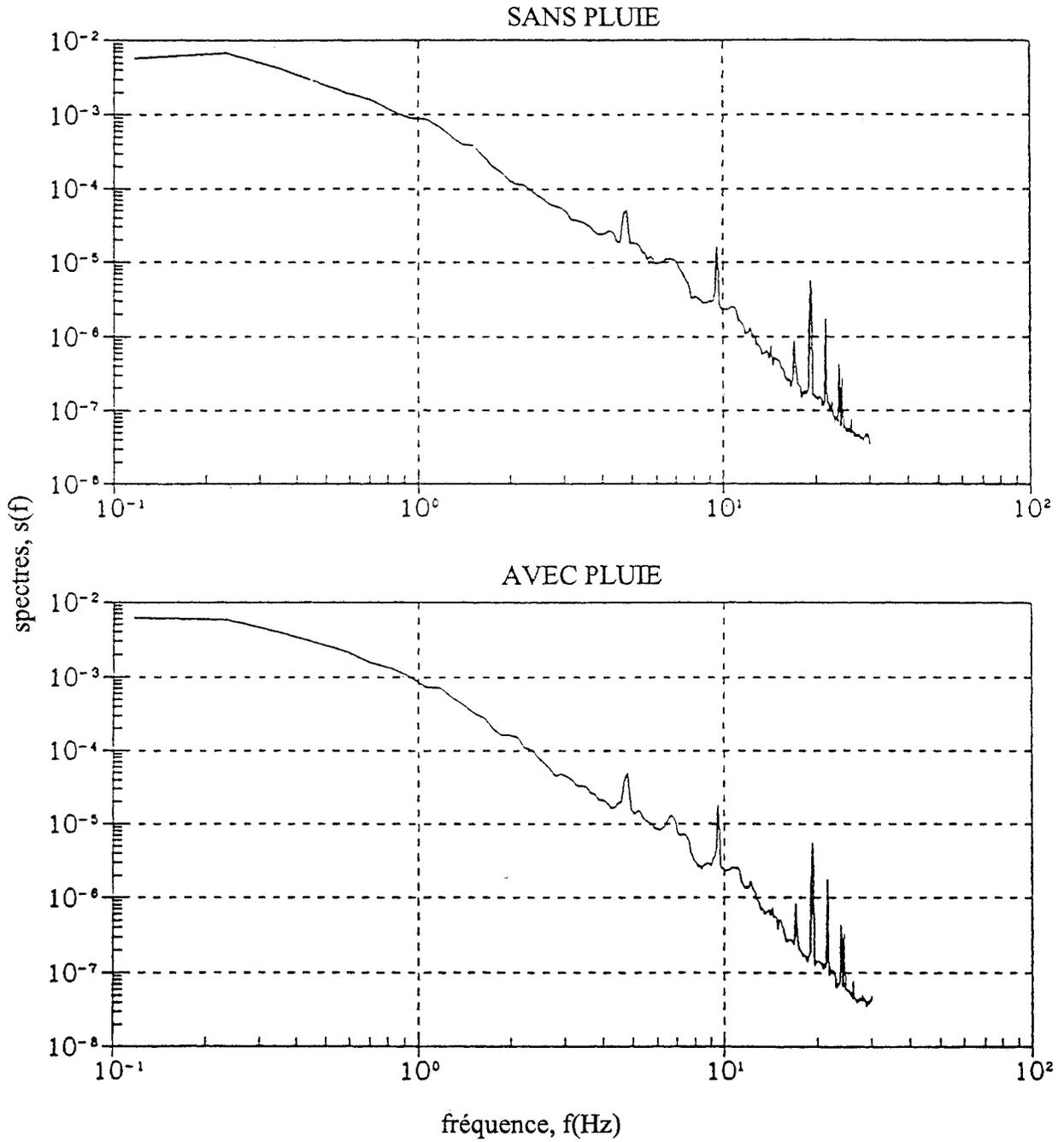


Figure F.2 Spectres d'énergie de pression mesurée

RÉFÉRENCE

F.1 P.F. Skerlj et D. Surry, "A Study of Mean Pressure Gradients, Mean Cavity Pressures, and Resulting Residual Mean Pressures Across a Rainscreen for a Representative Building", The University of Western Ontario Research Report, BLWT-SS23-1994.