



Etude expérimentale en vraie grandeur et modélisation des pressions induites par le vent dans les combles (application à l'étanchéité des toitures à l'eau)

Rima Tarbadar

► To cite this version:

Rima Tarbadar. Etude expérimentale en vraie grandeur et modélisation des pressions induites par le vent dans les combles (application à l'étanchéité des toitures à l'eau). Climatologie. Ecole Centrale Paris, 1995. Français. <NNT : >. <tel-04784561>

HAL Id: tel-04784561

<https://hal.science/tel-04784561v1>

Submitted on 15 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY 4.0 - Attribution - International License

THESE
présentée par

Mme Rima TARBADAR

pour l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : Sciences et Techniques du Bâtiment

Laboratoire d'accueil : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

Sujet :

ETUDE EXPERIMENTALE EN VRAIE GRANDEUR ET MODELISATION
DES PRESSIONS INDUITES PAR LE VENT DANS LES COMBLES

-Application à l'étanchéité des toitures à l'eau-

Soutenue le : 4 Juillet 1995

devant le Jury composé de :

M. ALLARD Francis

Président

M. GANDEMER Jacques

Examineurs

M. MAURETTE Jean

M. SOLLIEC Camille

M. PEUBE Jean Laurent

Rapporteur



ECOLE CENTRALE PARIS

THESE

présentée par

Mme Rima TARBADAR

pour l'obtention du

GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : Sciences et Techniques du Bâtiment

Laboratoire d'accueil : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

Sujet :

ETUDE EXPERIMENTALE EN VRAIE GRANDEUR ET MODELISATION
DES PRESSIONS INDUITES PAR LE VENT DANS LES COMBLES

-Application à l'étanchéité des toitures à l'eau-

Soutenue le : 4 Juillet 1995

devant le Jury composé de :

M. ALLARD Francis

Président

M. GANDEMER Jacques

Examineurs

M. MAURETTE Jean

M. SOLLIEC Camille

M. PEUBE Jean Laurent

Rapporteur

EN-SC 95.24 R

**Etude expérimentale en
vraie grandeur et
modélisation des pressions
induites par le vent
dans les combles**
Application à l'étanchéité
des toitures à l'eau

Thèse soutenue le 4 juillet 1995

Rima TARBADAR

SERVICE AERODYNAMIQUE ET
ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE



CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT
11 rue Henri Picherit, 44071 Nantes Cédex 03
Tél : 40.37.20.00, Fax : 40.37.20.60

EN-SC 95.24 R

**Etude expérimentale en
vraie grandeur et
modélisation des pressions
induites par le vent
dans les combles
Application à l'étanchéité
des toitures à l'eau**

Thèse soutenue le 4 juillet 1995

Rima TARBADAR

SERVICE AERODYNAMIQUE ET
ENVIRONNEMENT CLIMATIQUE

THESE
présentée par

M^{me} Rima TARBADAR

pour l'obtention du
GRADE DE DOCTEUR

Spécialité : Sciences et Techniques du Bâtiment

Laboratoire d'accueil : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

Sujet :

ETUDE EXPERIMENTALE EN VRAIE GRANDEUR ET MODELISATION
DES PRESSIONS INDUITES PAR LE VENT DANS LES COMBLES

-Application à l'étanchéité des toitures à l'eau-

Soutenue le : 4 Juillet 1995

devant le Jury composé de :

M. ALLARD Francis

Président

M. GANDEMER Jacques

Examineurs

M. MAURETTE Jean

M. SOLLIEC Camille

M. PEUBE Jean Laurent

Rapporteur

سقف بيتي حديد ركن بيتي حجر
فاعصفي يا رياح وانهمر يا مطر¹

à Sari et Ola

¹"Solide est ma maison, étanche est ma toiture
Allez, vent, souffle Allez, pluie, tombe..."

*A tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce travail,
je présente tous mes remerciements,
quelle que soit la nature ou l'ampleur de leur aide.*

ABSTRACT

Generally, the rain penetration through pitched lapped roofs is created by the difference of external and internal pressure, generated by the wind.

In this thesis, a numerical model has been developed for prediction of internal pressure under the elements (the external pressure can be measured on a model in a boundary layer wind-tunnel). Two cases have been studied :

- roof without underlay
- roof with flexible or stiff underlay.

The dynamics of internal pressure is, in general, a complex problem. This is due to the poor knowledge on the leakage paths characteristics. Therefore, full-scale experimental studies have been carried out to characterize the roof wind permeability (test apparatus) and to investigate the effects of windspeed, atmospheric turbulence and rain intensity on this permeability (climatic wind-tunnel).

The analytical results were compared with full-scale results (roof without underlay case), and they matched closely.

Parametric studies (underlay case) have shown that it is possible to reduce considerably the wind loads. Through a complete knowledge of the controlling parameters it will be possible to design and construct pitched lapped roofs, from which the problems of rain penetration is strongly reduced.

RESUME

La pénétration d'eau de pluie à travers une toiture à pentes constituée de petits éléments est principalement liée à la différence de pression externe et interne, générée par le vent sur le toit. Le champ de pression externe est accessible aux mesures, sur maquette en soufflerie atmosphérique.

En revanche, le champ de pression interne ne peut être obtenue qu'en vraie grandeur. Une modélisation numérique de ce dernier a donc fait l'objet de cette thèse. Il s'agit plus précisément de calculer la pression instantanée en sous-face de la couverture, dotée ou non d'un écran qu'il soit souple ou rigide.

L'estimation de la pression interne est délicate faute d'une bonne connaissance des caractéristiques de l'écoulement à travers des parois perméables.

Une campagne de mesures en vraie grandeur a donc été menée pour caractériser la perméabilité à l'air de la toiture pour un revêtement donné (banc de mesures), ensuite pour étudier les effets de la vitesse et de la turbulence du vent et de l'intensité de la pluie sur cette perméabilité (soufflerie climatique).

La pression interne issue du modèle sans écran reproduit bien celle mesurée.

L'étude paramétrique du cas avec écran a montré la possibilité de réduire considérablement la pression différentielle. Une bonne connaissance des paramètres qui influencent le différentiel de pression permet de concevoir des toits à pentes, pour lesquels les problèmes de pénétration d'eau de pluie sont considérablement réduits.

Mots clés :

Pression interne, pression instantanée, modélisation numérique, perméabilité à l'air, étanchéité eau, toiture, toiture deux versants, essai vraie grandeur, essai soufflerie, soufflerie climatique, mesure pression, construction basse, bâtiment habitation.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
1. EFFETS DES CONDITIONS CLIMATIQUES SUR UNE TOITURE A PENTES	3
1.1. Introduction	3
1.2. Les paramètres climatiques	3
1.2.1. Le vent	3
1.2.2. La pluie	8
1.2.3. Concomitance de la pluie et du vent en France	11
1.3. Les effets du vent et de la pluie sur une toiture	13
1.3.1. Caractéristiques de l'écoulement autour d'un bâtiment - Champs de vitesse et de pression externe	13
1.3.2. Lamé d'eau d'écoulement	22
1.3.3. Champs de pression interne	22
1.3.4. Conséquence en terme de perte d'étanchéité à l'eau	22
1.3.4.1. Les mécanismes d'infiltration d'eau dans le comble	22
1.3.4.2. Les Forces liées au gradient de pression :	27
1.3.4.3. Conclusion	27
2. PRESSION DANS UN VOLUME A PAROIS PERMEABLES SOUMISES A ECOULEMENT TURBULENT	28
2.1. Introduction	29
2.2. L'écoulement à travers les orifices localisés ou répartis d'une toiture	29
2.2.1. Cas des chatières de ventilation	29
2.2.2. Cas des recouvrements des petits éléments	30
2.2.3. L'effet des fluctuations de pression sur la perméabilité mesurée	36
2.2.4. L'effet d'un flux tangentiel	38
2.3. Fluctuation de la pression interne	39
2.3.1. Introduction	39
2.3.2. L'évolution temporelle de la pression interne dans un volume	39
2.3.3. Pression interne dans une lame d'air	47
2.3.4. Densité spectrale de la pression interne - Fonction de transfert	56
2.3.5. Conclusion	62
2.4. Démarches pratiques	63
2.4.1. Les hypothèses de base	63
2.4.2. La méthode de travail	64

3. MODELISATION DU CHAMP DE PRESSION INTERNE DANS LES COMBLES	65
3.1. Introduction.....	65
3.2. Modélisation de la pression interne - Cas général.	65
3.3. Cas d'un comble avec couverture sans écran en sous face.....	68
3.3.1. Hypothèses et notations.	68
3.3.2. Mise en équations.....	70
3.3.3. Conditions aux limites	70
3.3.4. Résolution numérique.....	71
3.3.5. Procédure du calcul	72
3.4. Cas d'un écran en sous face de la couverture.....	73
3.4.1. Introduction.....	73
3.4.2. Hypothèses et notations	73
3.4.3. Equations de base.....	76
3.4.4. Calcul de $Q(i,t)$	77
3.4.5. Calcul de la variation volumique de la maille (i)	78
3.4.6. Formulation du système d'équation.....	79
3.4.7. Conditions aux limites	80
3.4.8. Adaptation informatique.....	81
3.4.9. Procédure de résolution.....	82
3.5. Conclusion	86
4. ASPECT METROLOGIQUE.	87
4.1. Introduction.....	87
4.2. Les mesures	88
4.3. Chaîne de mesure de pression - Aspects métrologiques.....	91
4.3.1. Prises de pression	91
4.3.2. Transmission pneumatique du signal - Réponse dynamique.....	93
4.3.3. Capteurs de pression	96
4.3.4. Les filtres	98
4.3.5. Etalonnage de la chaîne.....	100
4.3.6. Conclusions opérationnelles.....	100
4.4. Définition des paramètres d'acquisition	101
4.5. Optimisation du maillage.....	102
4.6. Vérification expérimentale des hypothèses.....	104
4.6.1. Description des expériences.....	104
4.6.2. Essais et analyse des résultats.	108

4.7. Conclusion	112
5. MESURES EXPERIMENTALES	113
5.1. Introduction.....	113
5.2. Mesure de la perméabilité à l'air de la couverture.	113
<i>5.2.1. Les mesures</i>	<i>114</i>
<i>5.2.2. Analyses des résultats et commentaires.</i>	<i>115</i>
<i>5.2.3. Discussion.....</i>	<i>119</i>
5.3. Essais échelle 1 effectués en soufflerie climatique.....	119
<i>5.3.1. Objectifs.....</i>	<i>119</i>
<i>5.3.2. Description des essais.....</i>	<i>119</i>
<i>5.3.3. Paramètres d'influence sur le champ de pression différentielle externe/interne sur le toit.</i>	<i>126</i>
<i>5.3.4. Paramètre d'influence sur la perméabilité à l'air des couvertures (cas d'une couverture ardoise).....</i>	<i>135</i>
5.4. Conclusion.	139
6. VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE.....	140
6.1. Introduction.....	140
6.2. Validation du modèle du calcul de la pression interne dans les combles	140
<i>6.2.1. Comparaison calcul/mesure vraie grandeur.....</i>	<i>141</i>
<i>6.2.2. Conclusion.....</i>	<i>155</i>
6.3. Test numérique du modèle de calcul des pressions internes dans le cas d'un écran fixé en sous face de la couverture.....	156
<i>6.3.1. Description du cas test</i>	<i>157</i>
<i>6.3.2. L'effet de l'écran et sa perméabilité à l'air.</i>	<i>159</i>
<i>6.3.3. L'effet de la perméabilité au niveau du faîtage.</i>	<i>161</i>
<i>6.3.4. L'effet de flexibilité de l'écran.....</i>	<i>164</i>
<i>6.3.5. Conclusion et perspectives.</i>	<i>167</i>
6.4. Exploitation du modèle de calcul et perspectives :	168
7. CONCLUSION	171
ANNEXE 1 : Bibliographie technique sur les couvertures en ardoise.....	173
ANNEXE 2 : La soufflerie climatique.....	183
ANNEXE 3 : Mesures préliminaires du champ de pression externe sur la maison expérimentale de Bouin.....	193
ANNEXE 4 : Proposition de mise en oeuvre d'un banc d'essai.....	216
LIST DE NOTATION ET DE PRINCIPAUX SYMBOLES	222
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	225

INTRODUCTION

Une toiture constituée de petits éléments peut ne plus être étanche à l'eau pour certaines combinaisons de vent et de pluie.

Ce problème a fait l'objet de plusieurs études théoriques et expérimentales.

Les études expérimentales montrent le rôle primordial de la pression différentielle induite par le vent.

En outre, des travaux de recherche ayant fait l'objet d'une thèse en 1977, ont pris en considération une différence de pression constante afin d'étudier les conditions dans lesquelles une fuite d'eau se produit au niveau de l'emboîtement des tuiles constitutives d'une toiture. Négligeant le caractère fluctuant de la pression, cette analyse ne donne qu'une vague idée de la réalité du phénomène de pénétration d'eau.

Or, connaître l'évolution temporelle de ce différentiel de pression est essentiel pour la conception de la toiture (forme des éléments au niveau de l'emboîtement, longueur de recouvrement nécessaire ...).

De plus, il est important d'analyser les paramètres qui influencent ce différentiel (mise en place ou non d'un écran, caractéristiques de l'écran ...) pour améliorer les techniques de mise en oeuvre et pour concevoir des toitures où les problèmes d'infiltration d'eau de pluie seraient réduits.

L'évolution spatiale et temporelle du champ de pression généré par le vent ne peut être déterminée à l'heure actuelle qu'expérimentalement en vraie grandeur ou en soufflerie. Les mesures en vraie grandeur sont lourdes, coûteuses, et ne peuvent être utilisées que pour les ouvrages existants. Par conséquent, on a actuellement recours aux techniques de similitude en soufflerie atmosphérique, sachant que le champ de pression externe, mesuré en soufflerie sur une maquette à échelle réduite, est représentatif de celui en vraie grandeur. En revanche, ce n'est pas le cas pour le champ interne, car la similitude des pertes de charge à travers les orifices du revêtement de la toiture est impossible. Une modélisation du champ de pression interne dans le comble est donc indispensable : elle constitue l'objectif de cette thèse.

Pour réaliser ce travail, il a fallu utiliser en parallèle de l'approche théorique, des mesures expérimentales en vraie grandeur, afin de mieux comprendre les comportements des éléments de la toiture vis-à-vis du climat ambiant.

Ce document se divise en trois parties : les deux premières ne sont pas indépendantes.

La première partie est essentiellement théorique. Nous commençons par caractériser les excitations externes : pluie et vent, éléments du climat ambiant. L'étude se poursuit en étudiant localement leurs effets sur une toiture à pente : champ de vitesse et de pression externe, lame d'eau de ruissellement (chapitre 1). Enfin, à partir de l'analyse bibliographique sur les mécanismes de transmission des pressions externes vers le comble (chapitre 2), nous avons élaboré un modèle numérique qui calcule le champ instantané de pression en sous-face de la couverture, dotée ou non d'un écran (chapitre 3). Ce modèle s'appuie sur la connaissance du champ de pression externe et des coefficients de perméabilité facilement accessibles aux mesures.

La deuxième partie est expérimentale. Tout d'abord, nous avons choisi avec beaucoup de soin chacun des constituants de la chaîne de mesure de pression instationnaire en vraie grandeur afin de minimiser l'erreur de mesure (chapitre 4). Puis nous avons caractérisé expérimentalement la perméabilité à l'air de la couverture (mesures des coefficients de perméabilité sur banc d'essai). Ensuite, les mesures en soufflerie climatique ont été utilisées pour étudier l'influence des différents paramètres (intensité de pluie, intensité de turbulence et vitesse de vent) sur la perméabilité à l'air de la couverture (chapitre 5). Cette base de données nous a permis de vérifier expérimentalement le modèle théorique. Cette validation constitue la troisième partie et l'objectif final de notre étude (chapitre 6).

1. EFFETS DES CONDITIONS CLIMATIQUES SUR UNE TOITURE A PENTES

1.1. Introduction

L'étanchéité à la pluie d'une toiture dépend à la fois de ses caractéristiques propres et des caractéristiques du climat auquel elle est exposée.

Quelques caractéristiques géométriques des toitures, en particulier celles des couvertures en Ardoise, sont exposées en annexe 1. Par contre, les deux paramètres climatiques vent et pluie et leurs effets sur la toiture d'un bâtiment, sont étudiés au cours de ce chapitre.

1.2. Les paramètres climatiques

1.2.1. Le vent

Caractéristiques du vent atmosphérique :

Les caractéristiques du vent (vitesse, direction, densité de probabilité ou temps de retour...) sont données par des stations météorologiques souvent placées dans un site dégagé.

La vitesse du vent est une fonction aléatoire du temps (figure 1.1.), qui peut s'exprimer comme la somme de deux termes :

La valeur moyenne de la vitesse $\overline{U}$ sur la période d'observation et la fluctuation instantanée de la vitesse $u'(t)$ autour de sa valeur moyenne avec $\overline{u'} = 0$ par définition :

$$U(t) = \overline{U} + u'(t)$$

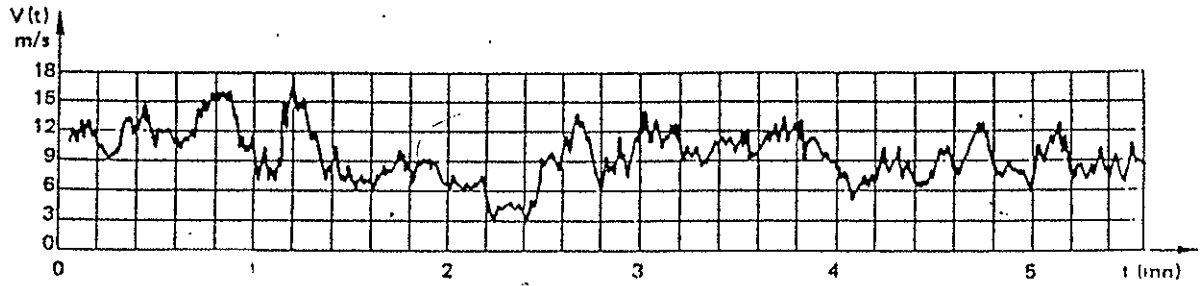


Figure 1.1. : Enregistrement de la vitesse du vent

La distribution de l'énergie cinétique des fluctuations de la vitesse $E_c = \frac{1}{2} \overline{u'^2}$ en fonction de la fréquence (spectre d'énergie) (figure 1.2.) nous montre une zone à très faible énergie située entre deux pics. L'énergie des basses fréquences est centrée sur une période de quatre jours et une période d'un an. L'énergie des hautes fréquences est centrée sur une période d'une minute [1].

En moyennant la vitesse sur une période comprise dans le "trou d'énergie" (entre 5 mn et 2 h), la vitesse moyenne obtenue est peu sensible aux variations suffisamment rapides des mouvements de l'air appelées "turbulence atmosphérique" et aux variations suffisamment lentes de l'écoulement planétaire. La vitesse est donc considérée comme localement stationnaire sur cette période, d'où le choix de $T = 600$ s en micro-météorologie.

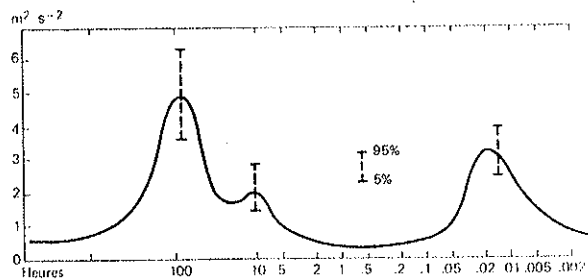


Figure 1.2. : Spectre de la vitesse horizontale du vent à 100 m d'après Van der Hoven

La vitesse moyenne, pratiquement nulle au niveau du sol, est une fonction croissante de la hauteur. Plusieurs formulations empiriques, semi-empiriques ou théoriques permettent de représenter la loi de variation de la vitesse moyenne avec la hauteur. Les plus fréquemment utilisées dans le cas de la couche limite atmosphérique sont la loi en puissance et la loi logarithmique que nous allons rappeler :

- Loi en puissance :
$$\frac{\overline{U_{Z_2}}}{\overline{U_{Z_1}}} = \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^N \quad (I.1)$$

- Loi logarithmique :
$$\frac{\overline{U_Z}}{U_*} = \frac{1}{K} \log \frac{Z}{Z_0} \text{ pour } Z \gg Z_0 \quad (I.2)$$

où N : exposant dépendant du type de rugosité

$\overline{U_{Z_1}}, \overline{U_{Z_2}}$: vitesses moyennes aux hauteurs Z_1 et Z_2 .

U_* : vitesse de frottement à la surface (fonction de la rugosité)

$K = 0.4$ constante de Von Karman et Z_0 le paramètre de rugosité (tel que $\overline{U_{Z_0}} = 0$) qui caractérise cette dernière mais n'a pas de sens physique direct [2, 3]. Le tableau 1.1. donne les valeurs de Z_0 selon le type de site.

Intensité de turbulence.

Les fluctuations de chacune des composantes de la vitesse sont représentées par un écart quadratique moyen. Pour la composante longitudinale $U(t)$ on définit σ_u au point M .

$$\sigma_u^2 = \overline{(u'(t))^2} \quad (I.3)$$

Pour les composantes transversale $V(t)$ et verticale $W(t)$, σ_v et σ_w sont définis de la même manière à partir de leurs fluctuations.

$$\sigma_v^2 = \overline{(v'(t))^2} \quad (I.4)$$

$$\sigma_w^2 = \overline{(w'(t))^2} \quad (I.5)$$

L'intensité de turbulence dans la direction longitudinale $I_x(M)$ est définie par la grandeur adimensionnelle :

$$I_x(M) = \frac{\sigma_u(M)}{U(M)} \quad (\text{I. 6})$$

Les intensités de turbulence I_y, I_z dans les directions transversale y et verticale z sont définies de la même façon. I_x est une fonction croissante de la rugosité et décroissante de la hauteur.

La figure (1.3.) présente les intensités de turbulence pour trois types de terrain, ainsi que le paramètre Z_g , épaisseur de la couche limite atmosphérique.

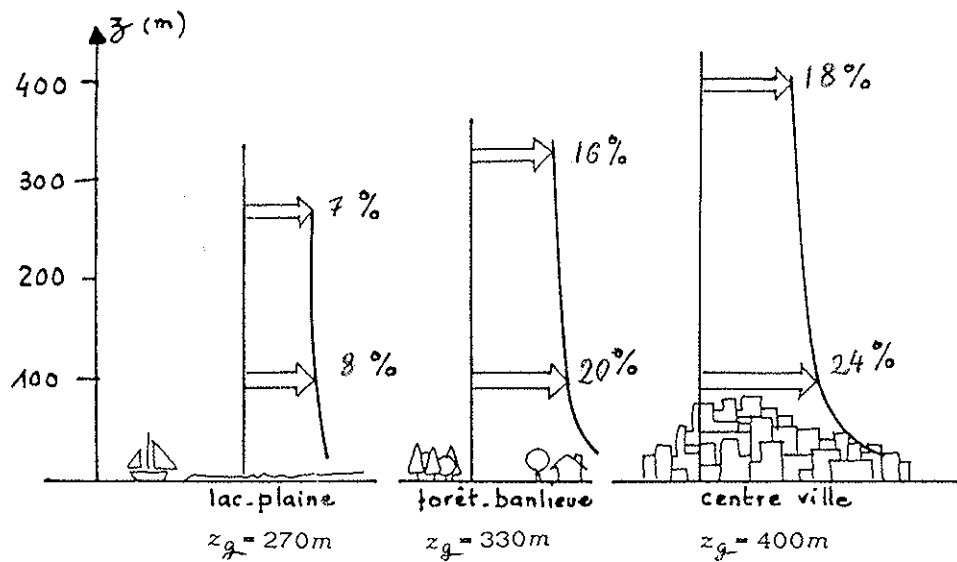


Figure 1.3. : Intensité de la turbulence pour différents types de terrain

Type de surface	Paramètre de rugosité Z_0 (m)
mer, lacs (vent faible)	0,0001 - 0,0002
mer, lacs (vent fort)	0,003 - 0,005
grandes étendues de sable	0,0002 - 0,0005
terrain plat enneigé	0,0001 - 0,0007
terrain gelé	0,001 - 0,012
terre non cultivée	0,001 - 0,004
herbe rase	0,008 - 0,03
herbe haute et bruyère	0,02 - 0,06
cultures basses	0,04 - 0,09
cultures hautes	0,12 - 0,18
bocage dense	0,35 - 0,45
forêt	0,80 - 1,60
bâtiments bas type banlieue	0,40 - 0,70
grande ville	0,70 - 1,50

Tableau 1.1. : Gammes de longueurs de rugosités obtenues par mesures in situ (d'après J. Wieringa, 1992 et D. Delaunay, 1987) [2, 3]

Echelles de turbulence

Le mouvement turbulent peut être vu comme la superposition de bouffées fluides (tourbillons) de dimensions variables en interaction les unes avec les autres de façon aléatoire.

Les échelles de longueur de la turbulence donnent une idée sur l'étendue spatiale de ces structures tourbillonnaires. De même, les échelles de temps et les spectres de la turbulence fournissent un ordre de grandeur des fréquences de passage des bouffées turbulentes (ou de leurs temps de vie).

L'échelle longitudinale L_u^x de la composante U du vent, dans le sens de l'écoulement moyen, est calculable à partir du coefficient d'auto-corrélation au point M , $R_i(M, M, \Delta t)$ sous certaines conditions (hypothèse de Taylor) [1] :

$$L_u^x = \overline{U} T_u^x \text{ avec } T_u^x = \int_0^\infty R_i(M, M, \Delta t) d\Delta t \quad (\text{I. 7})$$

L_u^x , échelle longitudinale de la composante longitudinale du vent, est une fonction croissante de la hauteur et décroissante de la rugosité [1].

Les deux échelles verticale et transversale correspondant à la composante longitudinale du vent L_u^z et L_u^y sont également croissantes avec la hauteur et peuvent être exprimées en fonction de L_u^x [1]:

$$Z < 200 \text{ m} \quad L_u^z \approx 0,5L_u^x \text{ et } L_u^y \approx 0,3L_u^x \quad (\text{I. 8})$$

Analyse spectrale de la vitesse du vent.

La densité spectrale de puissance de la composante longitudinale fluctuante de la vitesse $S_u(n)$ donne la répartition d'énergie cinétique par gamme des fréquences ; elle est calculée à partir de la transformée de Fourier du coefficient d'auto-corrélation.

Comme $\int_0^\infty S_u(n)dn = \sigma_u^2$, $\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2}$ représente, par unité de masse, la proportion d'énergie cinétique turbulente de la composante U due aux mouvements dont la fréquence est n .

La représentation adimensionnelle du spectre $\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = F\left(\frac{nL_u^x}{U}\right)$ est donnée par des formules couramment utilisées pour la similitude en souffleries [1].

1.2.2. La pluie

Paramètres caractéristiques

De tous les paramètres qui caractérisent la pluie, les deux plus importants sont :

- l'intensité de précipitation I_p (mm / h)
- le diamètre des gouttes D .

Classification par intensité de pluie

Pendant une séquence pluvieuse, il existe toujours une phase d'intensité de pluie maximale $I_p \max(mm/h)$ représentée par un plateau dont la durée est inversement proportionnelle à l'intensité[4].

Ceci se remarque également dans le cas des pluies tropicales mais avec des structures d'averses un peu différentes.

	Classe de la pluie	Intensité moyenne de la classe (mm/h)	Durée moyenne observée
Métropole	Pluie fine (crachin)	5 à 20	2 h à 6 h
	Averse moyenne	30 à 60	15' à 20'
	Forte averse (orage)	80 à 120	4' à 5'
Tropique	Pluie tropicale	150 à 250	5' à 15'

Tableau 1.2. : L'intensité et la durée moyenne de pluie selon la classe [4].

Diamètre des gouttes.

Le diamètre moyen des gouttes de pluie n'est pas constant et varie avec l'intensité de précipitation. La répartition n'est d'autre part pas uniforme mais suit des lois de distribution qu'il est important de connaître pour chercher à les reproduire.

Répartition des diamètres de gouttes par classe de pluie.

La recherche bibliographique sur le sujet montre que la forme générale des spectres ou distribution qui associe diamètre de gouttes D et nombre de gouttes $N(D)$ est une courbe "en cloche", plus ou moins régulière, et qui peut être multiples. Le diamètre des gouttes est compris entre 0,3 mm et 5 mm ; peu de gouttes quelle que soit l'intensité de pluie, ont un diamètre inférieur à 0,3 mm ou supérieur à 5 mm. A noter que la valeur de mode se situe en général autour de 2 mm pour une pluie ordinaire.

Des travaux expérimentaux ont été effectués au C.S.T.B. pour déterminer les relations $N(D)$ pour les 4 classes [4]. Sur ces bases, quatre spectres type en relation avec la classification d'intensité de pluie ont été établis (figure 1.4.).

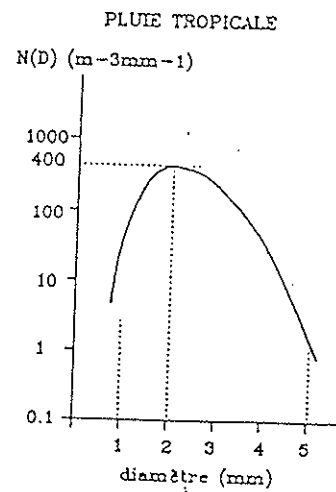
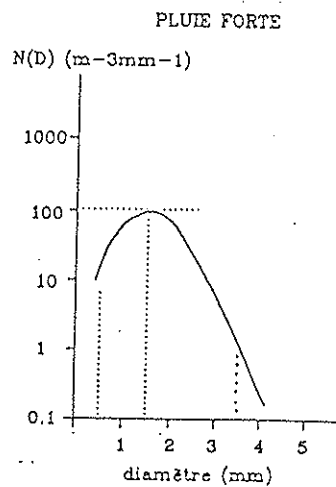
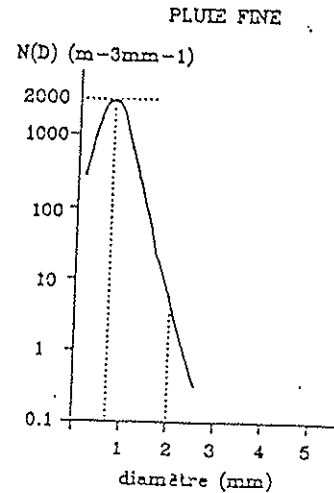
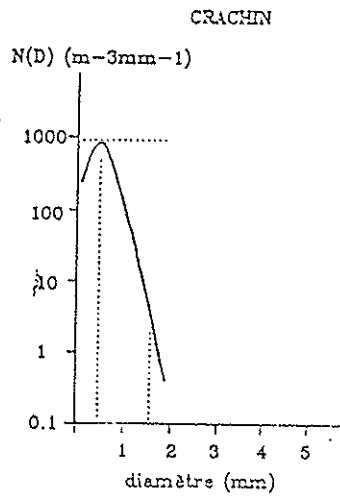


Figure 1.4. : Classification des spectres type de pluie par classe d'intensité de précipitation [4].

1.2.3. Concomitance de la pluie et du vent en France.

Les stations météorologiques fournissent les observations de la vitesse et de la direction du vent associées aux conditions pluviométriques au moment de l'observation. Selon l'existence ou non d'un événement pluvieux et de sa sévérité, on distingue trois classes. A chaque classe une vitesse moyenne extrême de vent est associée [5]:

Classe A : correspond à l'ensemble des observations indépendamment de l'état de l'atmosphère.

Classe B : il pleut lors des observations.

Classe C : il pleut fortement.

Pour l'étude d'étanchéité des joints d'une toiture, la classe B paraît la mieux adaptée puisqu'il suffit que la pression exercée par le vent au niveau du joint soit supérieure à un seuil donné pour que la pluie pénètre à l'intérieur quel que soit son intensité ou sa durée [6].

La probabilité de la perte d'étanchéité à l'eau est liée entre autres à celle de dépassement de ce seuil. Cette valeur de pression correspond à une vitesse de vent de période de retour T , définie par l'intervalle de temps séparant en moyenne deux occurrences consécutives du phénomène considéré [7].

Compte tenu de la durée de vie des constructions (10 - 50 ans), nous considérons la période de retour de l'événement "perte d'étanchéité à l'eau" d'environ 10 ans comme convenable [6]. La vitesse de vent à considérer pour la conception des couvertures est donc la valeur extrême par temps de pluie (classe B) dont la probabilité de non dépassement P_x vaut 90% (une période de retour T de 10 ans) :

$$T = \frac{1}{1 - P_x} \quad (\text{ans})$$

Le tableau 1.3. donne la vitesse moyenne extrême de vent, dans 29 stations en France, pour une période de retour de 10 ans et pour les deux classes A et B.

On notera que ces vitesses de référence sont celles observées à 10 m de hauteur, en site dégagé. Toute extrapolation à la zone du bâtiment étudié nécessitera la prise en compte de correction de recalage de site (topographie, hauteur, environnement proche).

DIRECTION « SUD » (SECT. 4 ET 5, 130°-210°)			DIRECTION « OUEST » (SECT. 6, 7 ET 8, 210°-330°)			DIRECTION « NORD » (SECT. 9 ET 1, 330°-50°)			DIRECTION « EST » (SECT. 2 ET 3, 50°-130°)		
Station	A	B	Station	A	B	Station	A	B	Station	A	B
Abbeville	17	15	Abbeville	25	22	Abbeville	17	15	Abbeville	15	9
Agen	15	15	Agen	19	19	Agen	9	8	Agen	15	13
Ajaccio	16	15	Ajaccio	23	12	Ajaccio	16	12	Ajaccio	23	17
Avord	16	16	Avord	20	18	Avord	14	14	Avord	12	9
Bordeaux	15	14	Bordeaux	22	20	Bordeaux	20	18	Bordeaux	15	12
Brest	19	18	Brest	24	23	Brest	22	21	Brest	19	14
Caen	22	22	Caen	22	22	Caen	20	18	Caen	13	11
Carcassonne	9	6	Carcassonne	23	19	Carcassonne	11	9	Carcassonne	23	15
Cherbourg	22	19	Cherbourg	25	24	Cherbourg	25	24	Cherbourg	20	14
Dijon	18	16	Dijon	18	16	Dijon	14	11	Dijon	13	6
Gourdon	23	22	Gourdon	21	20	Gourdon	14	11	Gourdon	18	15
Istres	18	17	Istres	23	17	Istres	26	17	Istres	21	19
Lille	20	17	Lille	25	25	Lille	17	15	Lille	15	13
Lorient	21	21	Lorient	23	22	Lorient	16	13	Lorient	16	13
Luxeuil	18	16	Luxeuil	20	20	Luxeuil	12	10	Luxeuil	14	10
Lyon	22	18	Lyon	15	14	Lyon	20	14	Lyon	7	7
Montélimar	18	17	Montélimar	18	12	Montélimar	23	17	Montélimar	11	8
Nantes	18	18	Nantes	23	20	Nantes	16	14	Nantes	16	14
Nîmes	20	15	Nîmes	14	12	Nîmes	20	12	Nîmes	14	13
Orléans	19	17	Orléans	24	19	Orléans	17	13	Orléans	17	11
Pau	14	9	Pau	24	18	Pau	10	10	Pau	7	7
Perpignan	19	12	Perpignan	27	20	Perpignan	22	16	Perpignan	13	13
Poitiers	16	15	Poitiers	23	22	Poitiers	14	13	Poitiers	14	9
Reims	22	22	Reims	22	20	Reims	13	11	Reims	11	9
Rennes	18	17	Rennes	23	19	Rennes	21	15	Rennes	16	15
S'-Dizier	16	14	S'-Dizier	20	20	S'-Dizier	10	10	S'-Dizier	14	10
S'-Raphaël	11	8	S'-Raphaël	23	12	S'-Raphaël	14	12	S'-Raphaël	21	20
Strasbourg	16	14	Strasbourg	18	17	Strasbourg	11	8	Strasbourg	13	5
Tours	19	14	Tours	24	18	Tours	14	13	Tours	12	11

Tableau 1.3. : Vitesse moyenne extrême du vent pour une période de retour de 10 ans et pour les deux classes de temps A, B (m/s)[6]

1.3. Les effets du vent et de la pluie sur une toiture

1.3.1. Caractéristiques de l'écoulement autour d'un bâtiment - Champs de vitesse et de pression externe.

Aspect général :

L'écoulement autour d'un obstacle se fait différemment suivant :

- la géométrie de l'obstacle,
- le profil de la vitesse moyenne,
- l'intensité et les dimensions de la turbulence,
- l'incidence du vent,
- l'environnement proche : présence d'autres bâtiments par exemple [8].

La complexité du contournement croît avec celle de la géométrie de l'obstacle. La figure 1.5. donne l'exemple d'un bâtiment à arêtes vives.

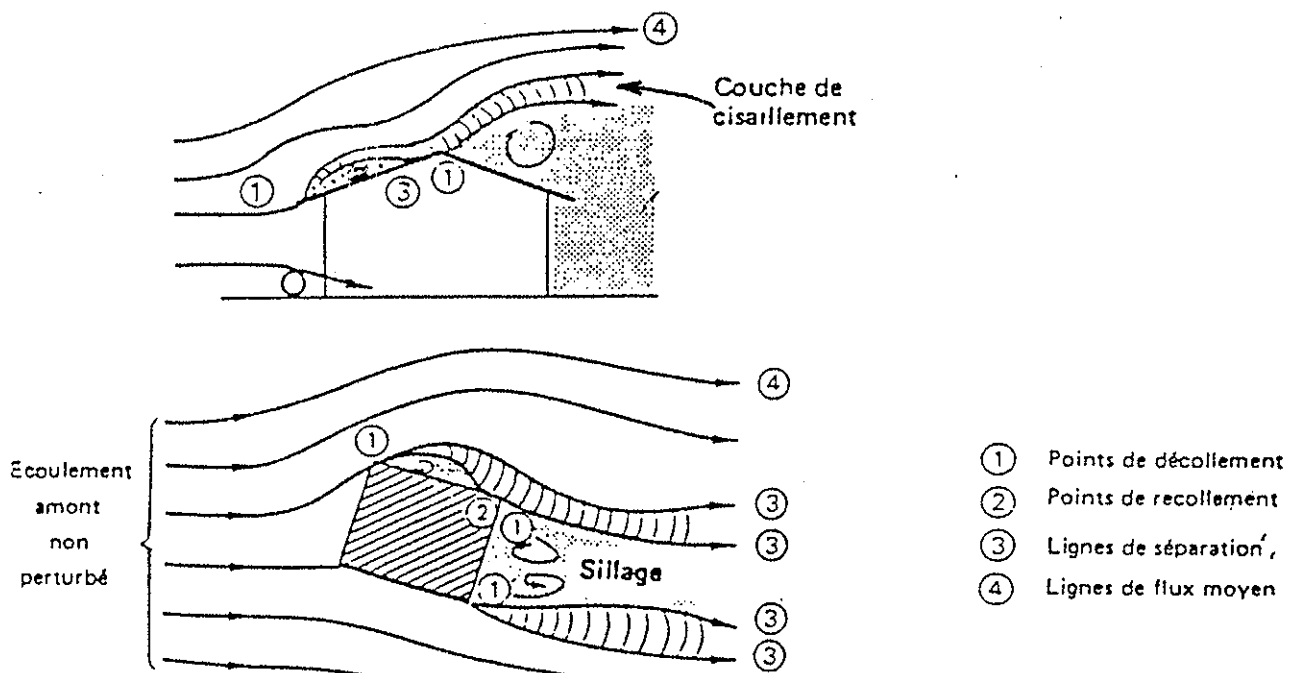


Figure 1.5. : Contournement d'un obstacle à arêtes vives [8].

En amont, le flux s'incurve progressivement en se séparant le long du bâtiment et du sillage pour se réunir en aval. Cette zone de l'écoulement non perturbée est séparée des faces amont du corps par une couche limite qui présente la condition de vitesse nulle à la paroi derrière les points de séparation. Cette couche limite dégénère en couche de cisaillement, à forts gradients de vitesse transversale, assurant la continuité de la vitesse entre le flux extérieur et le sillage [9, 10,11].

On distingue les régions suivantes :

1. Le flux incident et l'écoulement non perturbé,
2. Le sillage,
3. La couche de cisaillement ou couche limite,
4. La zone de décollement et recirculation.

La figure 1.6. décrit la répartition spectrale des fluctuations de vitesse dans les trois premières zones, où nous nous apercevons que les fréquences sont plus élevées dans le couche de cisaillement que dans le sillage [11].

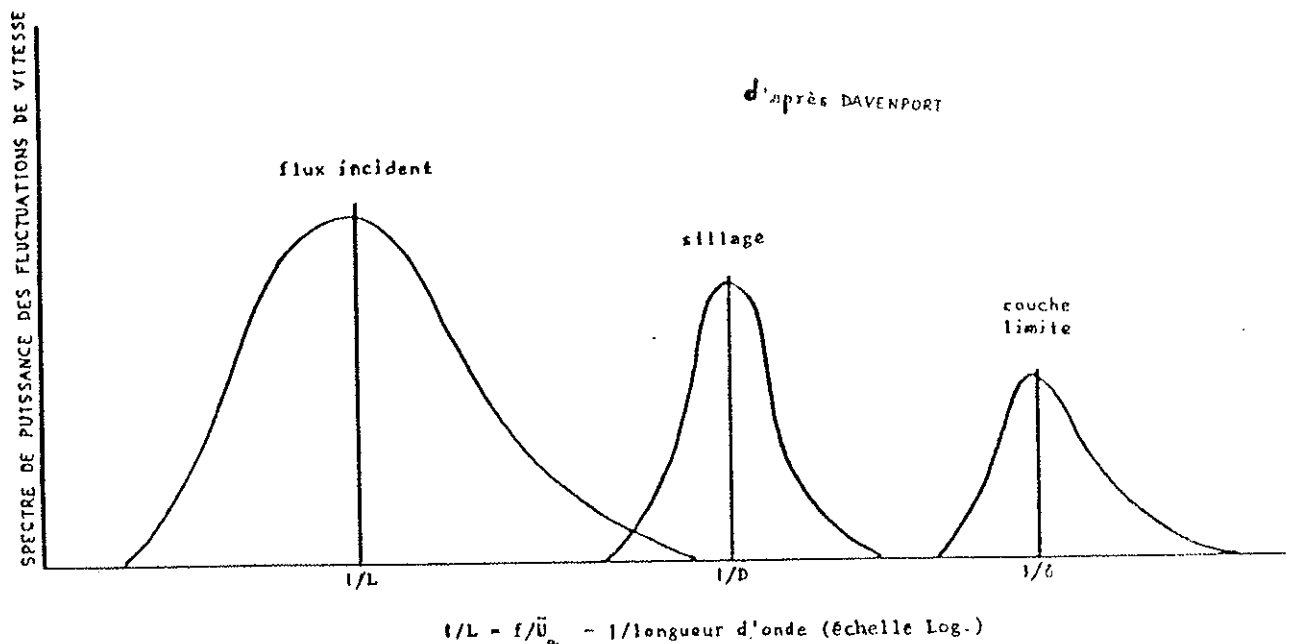


Figure 1.6. : Spectre de puissance des fluctuations de vitesse (corps non profilé) dans chaque zone [11].

Champs de pression :

En terme de valeur moyenne de la pression, par rapport à la pression statique, le sillage et la zone décollée représentent les zones dépressionnaires. Le point où la ligne de recollement correspond à une pression pratiquement égale à la pression statique, la zone de recollement est en surpression (cf. figure 1.7).

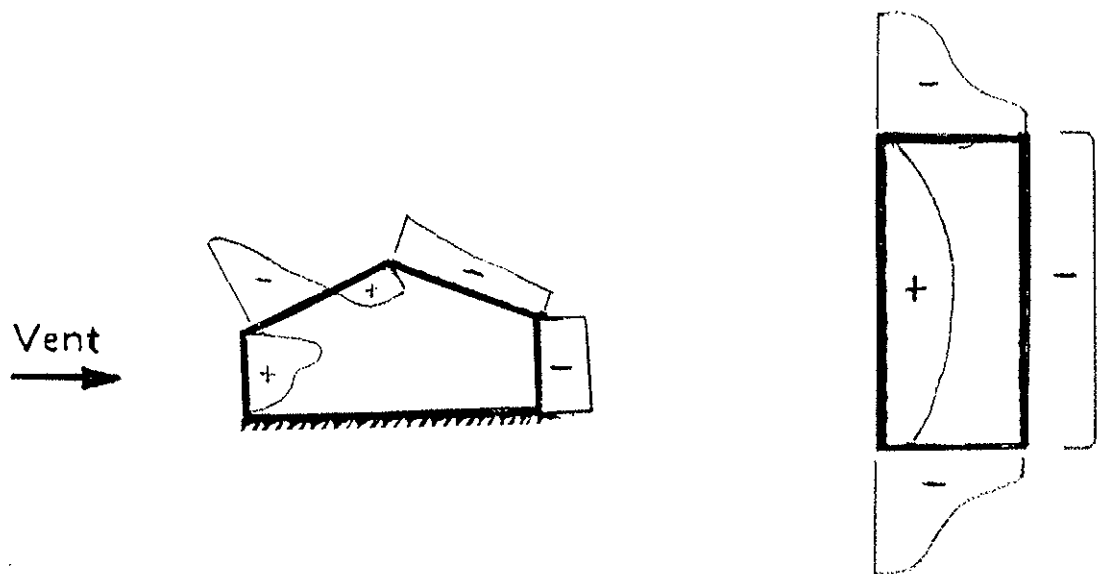


figure 1.7. :champ de pression moyenne.

Les fluctuations de la pression sur l'enveloppe du bâtiment dépendent entièrement des tourbillons existants dans les zones décrites précédemment. Les fréquences caractéristiques des fluctuations de pression sont donc plus élevées dans les zones de décollement et de recollement que dans le sillage [11].

Champ de pression sur un toit

Le champ de pression sur un toit dépend fortement de la pente. Dans le cas de fortes pentes au vent ($\alpha > 30^\circ$), le toit est en surpression. Les fluctuations de pression sont le résultat cumulé du flux incident et de la couche limite formée sur le toit (figure 1.8.).

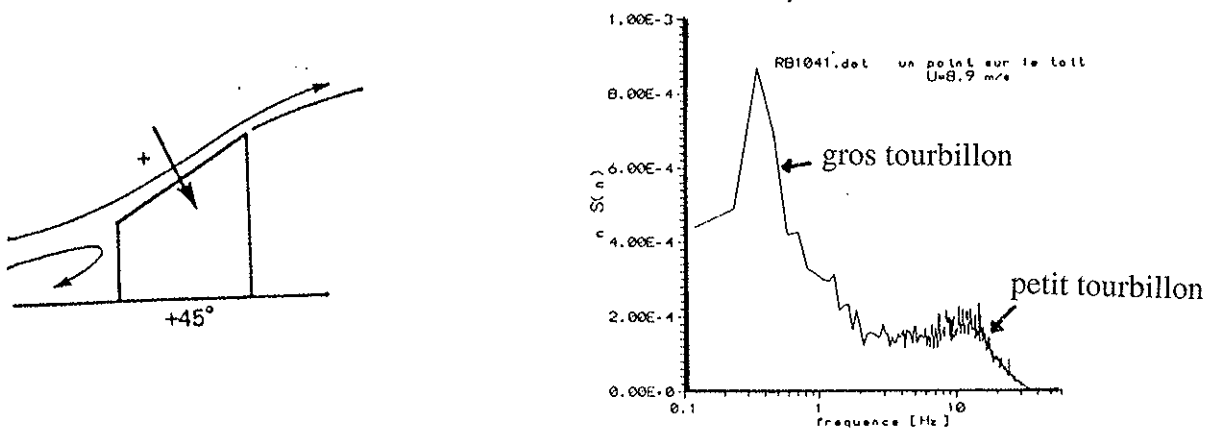


Figure 1.8. : Spectre de pression externe (cas de forte pente).

Lorsque la pente est comprise entre 20° et 30° , deux zones distinctes apparaissent (figure 1.9.) [9].

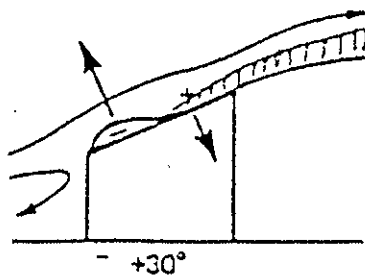
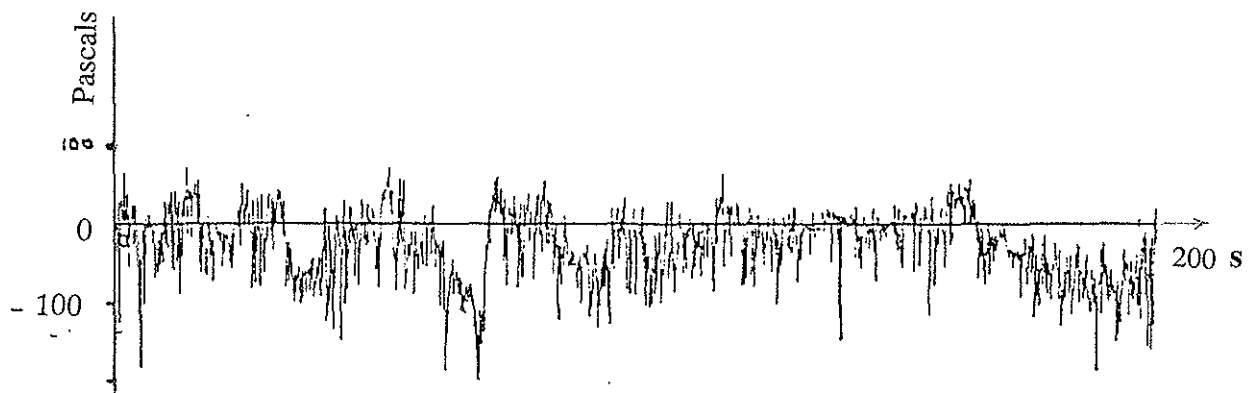


Figure 1.9. :

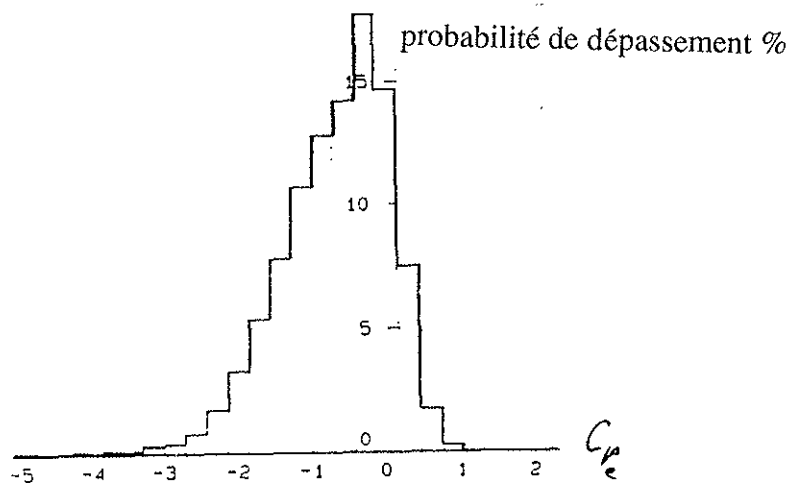
La zone de décollement, zone d'instabilité où la pression dynamique est caractérisée par des pics dépressionnaires qui sont nettement plus éloignés de la valeur moyenne que les pics de surpression (figure 1.10a) (annexe 3). La distribution de probabilité est du même coup non gaussienne et décalée vers les valeurs négatives (figure 1.10b) La durée des pics négatifs est très courte [0.01 , 0.1] sec. [12].

Quant à la fréquence dominante, elle correspond à celle du détachement tourbillonnaire; l'étude menée par Peterka et Cermak [12] montre que le nombre de Strouhal est dans la gamme [0.2 , 1.4], dans nos mesures à Bouin (annexe 3), on le trouve compris entre 0.5 et 4 (figure 1.10c).

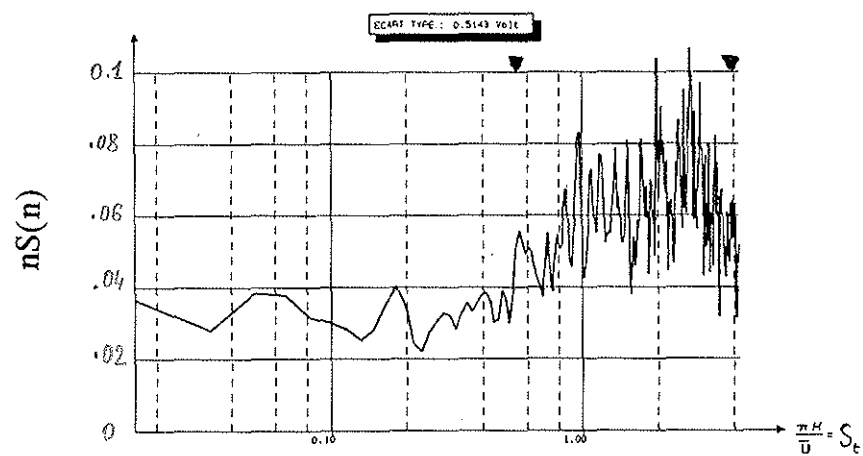
La zone de recollement est caractérisée par une faible énergie des fluctuations et une distribution gaussienne de la densité de probabilité (figure 1.11.). Le cas des faibles pentes ($0^\circ \leq \alpha < 20^\circ$) diffère par rapport au cas précédent, par l'absence de zone de recollement lorsque la largeur de l'obstacle n'est pas très grande (figure 1.12.).



(a) : L'instabilité de la variation temporelle de la pression

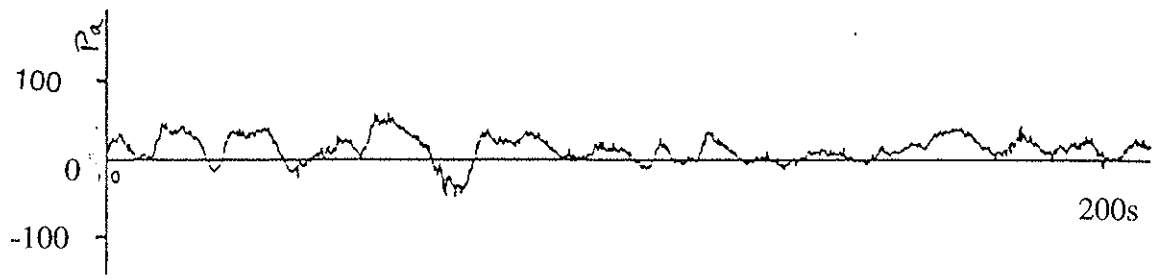


(b) : Distribution de densité de probabilité

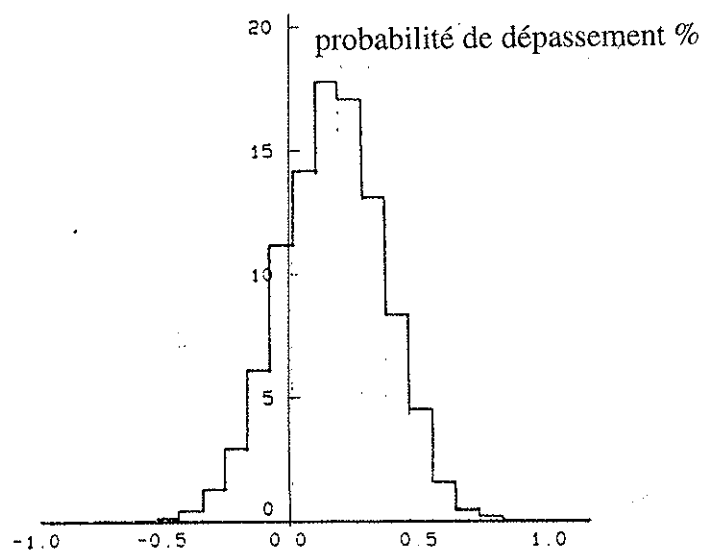


(c) : Spectre des fluctuations de pression

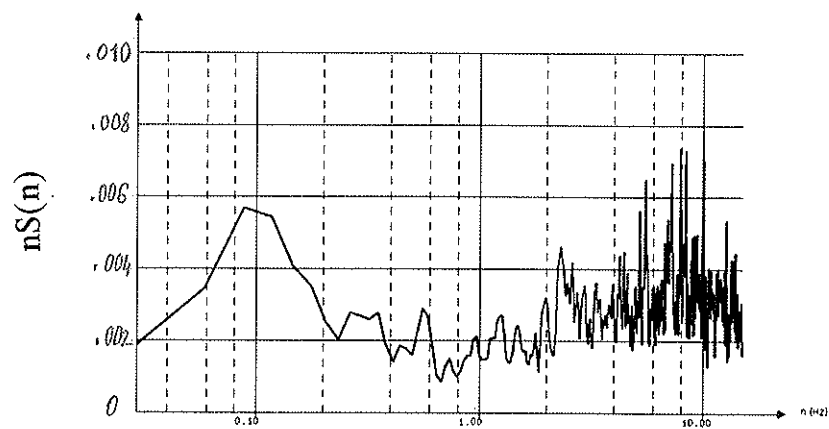
Figure 1.10. : Les caractéristiques des fluctuations de la pression dans la zone de décollement
- BOUIN 1993 -



(a) : Variation temporelle de la pression



(b) : Distribution de densité de probabilité dans la zone de recollement.



(c) : Spectre de pression

Figure 1.11. : Caractéristiques de la pression dans la zone de recollement.
- BOUIN 1993 -

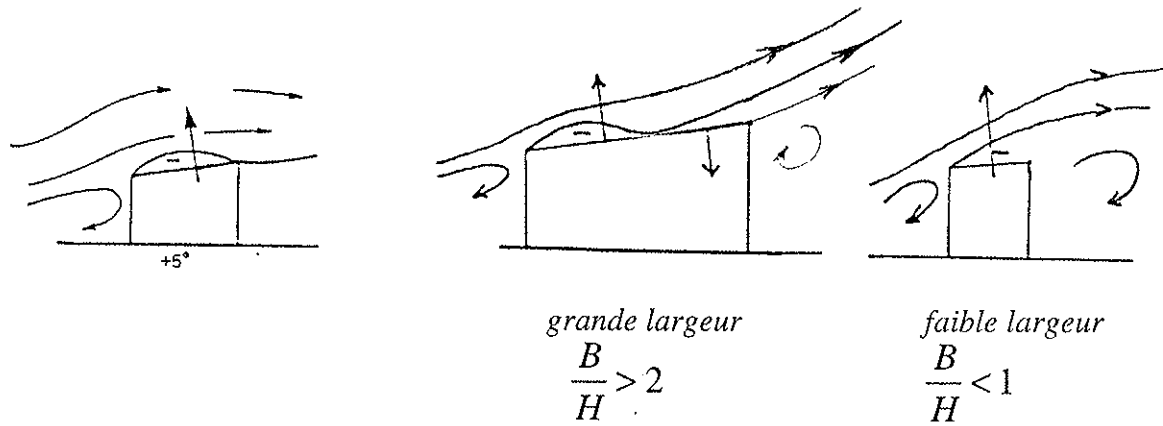


Figure 1.12. : Cas de très faible pente.

Lorsque la pente est inclinée dans le sens contraire à l'écoulement $\alpha < 0$ (versant sous le vent), le toit est situé complètement dans le sillage, où nous notons l'absence des hautes fréquences, la faible énergie des fluctuations, et la stabilité spatiale de la pression (cf. figure 1.13). Ceci provient de l'établissement d'un gros tourbillon peu énergétique en comparaison avec les petites structures tourbillonnaires [11]. La taille de ce tourbillon est de l'ordre de la dimension du bâtiment [8, 11].

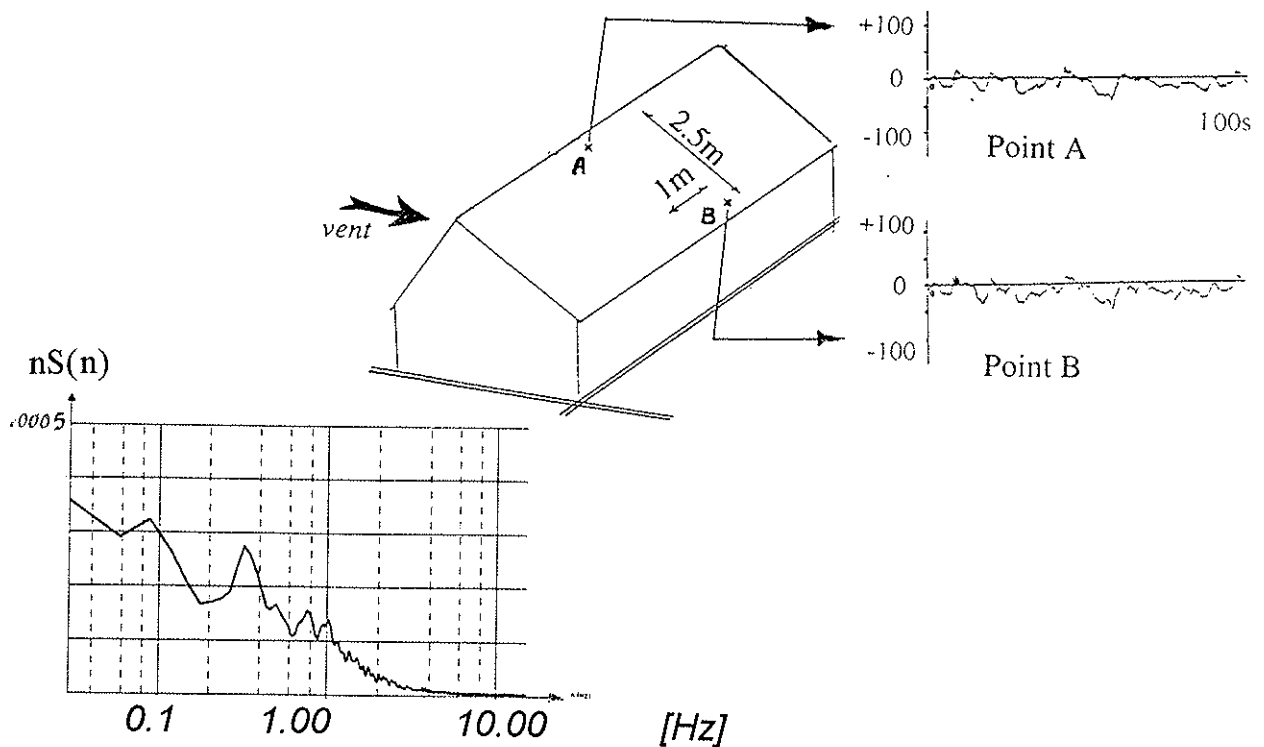


Figure 1.13. : Variations temporelles et spatiales pour le signal de pression mesurée sur le versant sous le vent. - BOUIN 1993 -

Champs de vitesse.

Le champ de vitesse au niveau du toit, comme celui de pression, influence le phénomène de pénétration d'eau de pluie à travers les couvertures, principalement par son effet sur l'épaisseur de la lame d'eau de ruissellement (cf. paragraphe 1.3.2). D'autre part, il joue sur la perméabilité à l'air des couvertures (cf. paragraphes 2.2.4 et 5.3.4).

La figure 1.14. donne un exemple pour une toiture à deux versants de pente 45° . Dans cet exemple les parois sont considérées lisses et imperméables à l'air [13]. Nous notons sur cette figure que le sens d'écoulement d'air est contraire à celui de ruissellement d'eau, ce qui peut favoriser l'infiltration d'eau de pluie. La prise en compte de la géométrie des éléments de toiture modifie cette constatation [14,15]. Il ne paraît pas donc suffisamment rigoureux de négliger la géométrie locale.

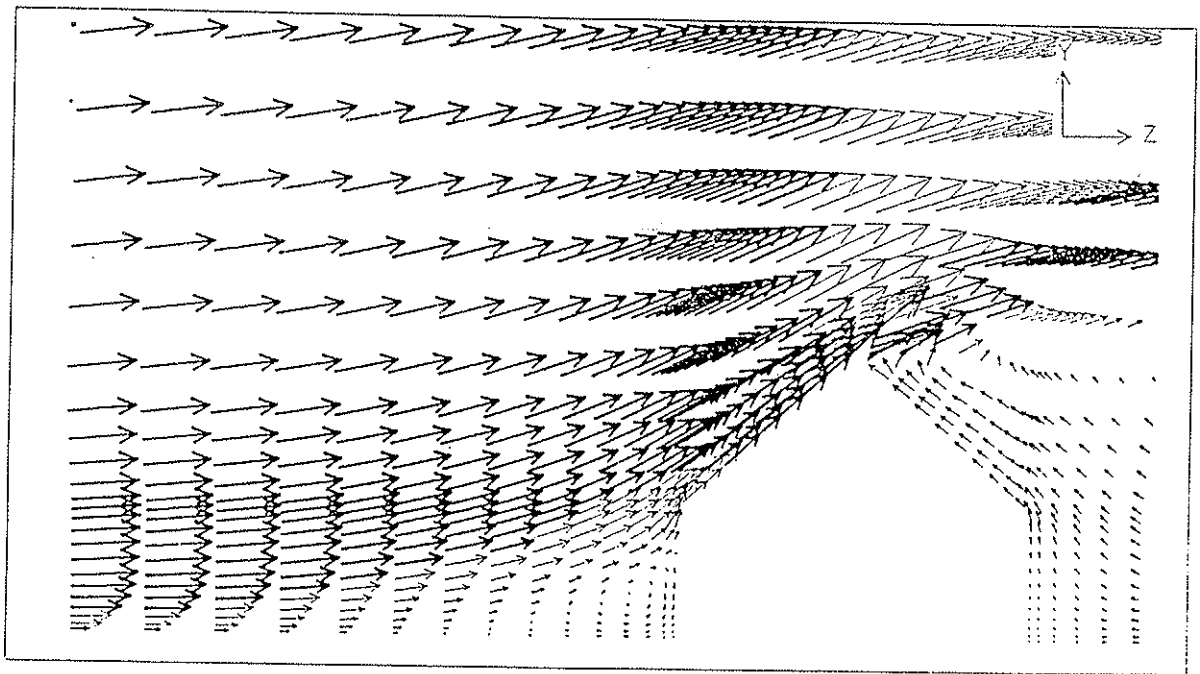


Figure 1.14. : Simulation numérique du champ de vitesse autour d'un bâtiment selon [13].

1.3.2. Lamme d'eau d'écoulement.

L'épaisseur de la lame d'eau joue d'une part sur la perméabilité, et d'autre part sur les valeurs de la pression externe à l'entrée du joint, par exemple une épaisseur de 5 mm représente une pression supplémentaire de 50 Pascals. Dans la pratique cette épaisseur est dans la gamme [4 - 6 mm] pour une forte averse [16]. Elle dépend du champ de "vitesse/pression" de l'écoulement secondaire dans la couche limite formée sur le toit, de la pente, des caractéristiques de la pluie (intensité et diamètre des gouttes) et de multiples paramètres tels que les reliefs et la rugosité de surface, la porosité des matériaux de surface, la qualité de l'eau [15, 17, 18].

1.3.3. Champs de pression interne.

Il s'agit ici de la pression qui règne dans le volume du comble ou directement derrière la couverture lorsque celle-ci est équipée d'un écran en sous-face (film protecteur ou panneau isolant ...).

La perméabilité globale de la toiture, la mise à l'atmosphère locale (chatières), la conception de la couverture (la présence ou non d'un écran en sous-face), et même de l'organisation des supports vont conditionner ce champ de pression (cf. chapitres 2 et 3).

1.3.4. Conséquence en terme de perte d'étanchéité à l'eau.

1.3.4.1. Les mécanismes d'infiltration d'eau dans le comble.

Les mécanismes de pénétration de la pluie les jours de vent, à travers les couvertures sont particulièrement complexes. En effet, ils résultent d'une combinaison de plusieurs phénomènes physiques.

L'infiltration d'eau aurait lieu essentiellement par les joints ou les emboîtements et dans certains cas particuliers, à travers le matériau de la couverture lui-même.

Les phénomènes physiques qui peuvent être les causes de la pénétration de l'eau dans le comble sont [19, 20, 21, 22] :

1. transfert d'humidité à travers le matériau
2. migration d'eau dans les pores de la surface de l'élément de la couverture (figure 1.17.)
3. siphonage (figure 1.18.)
4. capillarité (figure 1.19.)
5. fuite balistique (figure 1.20.)
6. fuite par débordement d'un joint rempli d'eau (figure 1.21.)

Les mécanismes 1, 2 et 3 restent toujours marginaux [19, 23].

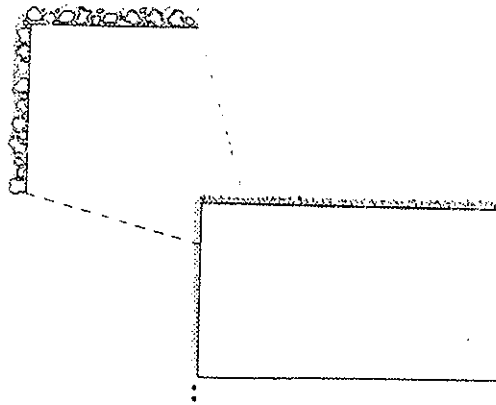
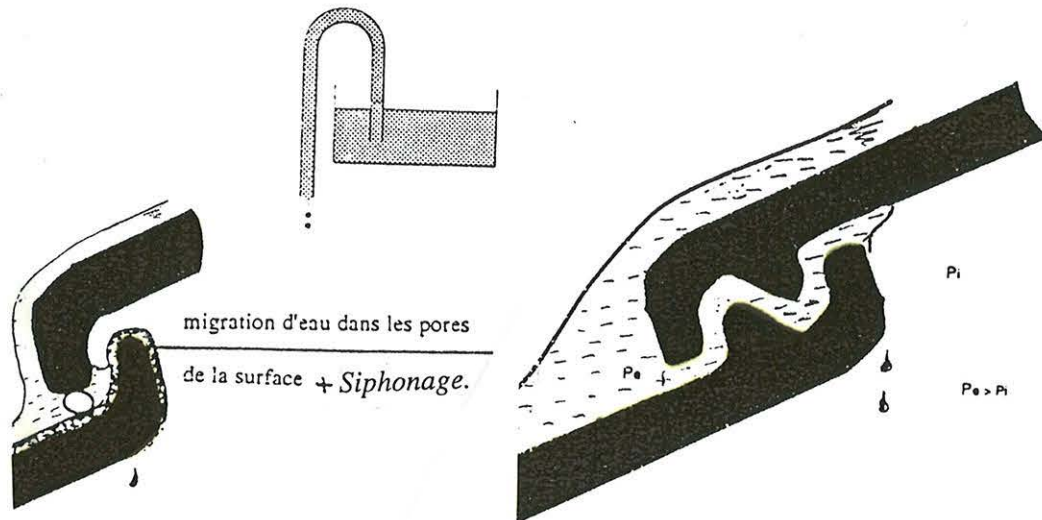


Figure 1.17. : Fuite par migration d'eau dans les pores de la surface.

Siphonage :

Il ne fait pas apparaître une fuite sans être accompagné d'autres phénomènes :

- migration d'eau en surface (figure 1.18a)
- différence de pression externe/interne (figure 1.18b)



(a) Cas d'un joint non rempli d'eau

(b) cas d'un joint rempli entièrement d'eau

Figure 1.18. : Siphonage.

Capillarité :

Elle peut se produire sans vent quand l'emboîtement est trop serré. L'eau aspirée par la capillarité s'arrête à la sortie du joint formant un ménisque (figure 1.19.). L'intervention d'autres forces est nécessaire pour qu'une fuite se produise.

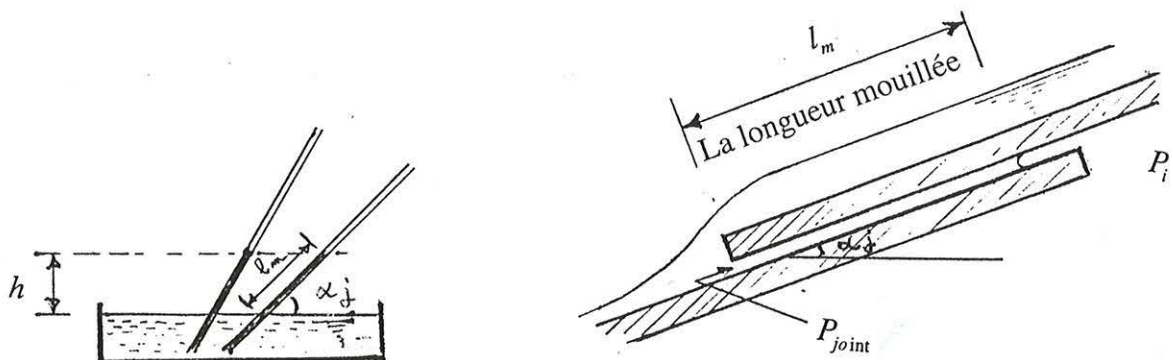
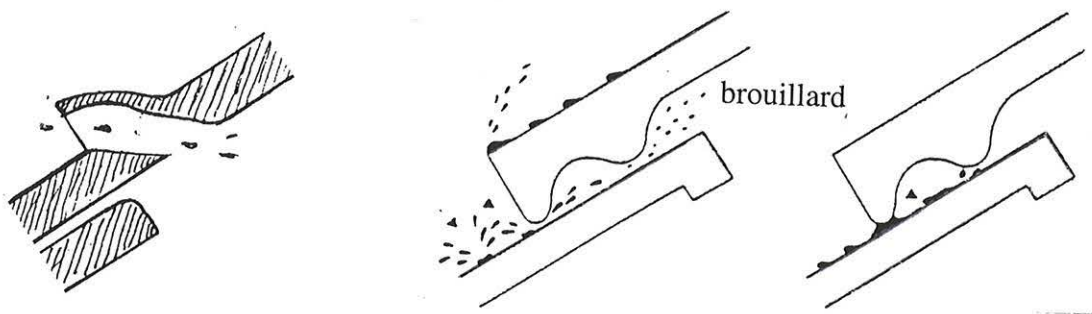


Figure 1.19. : La remontée d'eau par capillarité.

Fuite balistique :

Elle se produit lorsque les gouttes de pluie trouvent un accès direct au comble [16, 19, 23]. Par l'effet du gradient de pression de part et d'autre de la couverture, un brouillard visible à l'oeil formé par des gouttelettes ou par l'élatement des gouttes de pluie, traverse la couverture.

Durant cette phase de fuite, qui correspond toujours à faible écart de pression [23], les gouttes d'eau extrêmement petites sont portées sur les lignes de courant dans le joint entre deux éléments de la couverture (figure 1.20.). Cependant le joint en question n'est pas complètement rempli d'eau, contrairement au cas de débordement qui correspond souvent à un fort écart de pression.



(a) cas de chatière de ventilation.

(b) cas du joint entre les éléments de la couverture.

Figure 1.20. : Fuite balistique.

Fuite par débordement d'un joint rempli d'eau :

Elle se produit dans le cas du fort gradient de pression entre l'entrée et la sortie du joint. L'eau pénètre par capillarité et sous l'action du gradient de pression tandis que la gravité tend à l'évacuer. A la sortie du joint, l'eau forme un ménisque concave (figure 1.21.). Une fuite commence lorsque le ménisque devient convexe passant par l'état critique : ménisque mixte [16]. La formation d'un ménisque convexe veut dire que la pression dans l'eau, sur la surface du ménisque, est supérieure à celle de l'air interne (figure 1.22.).

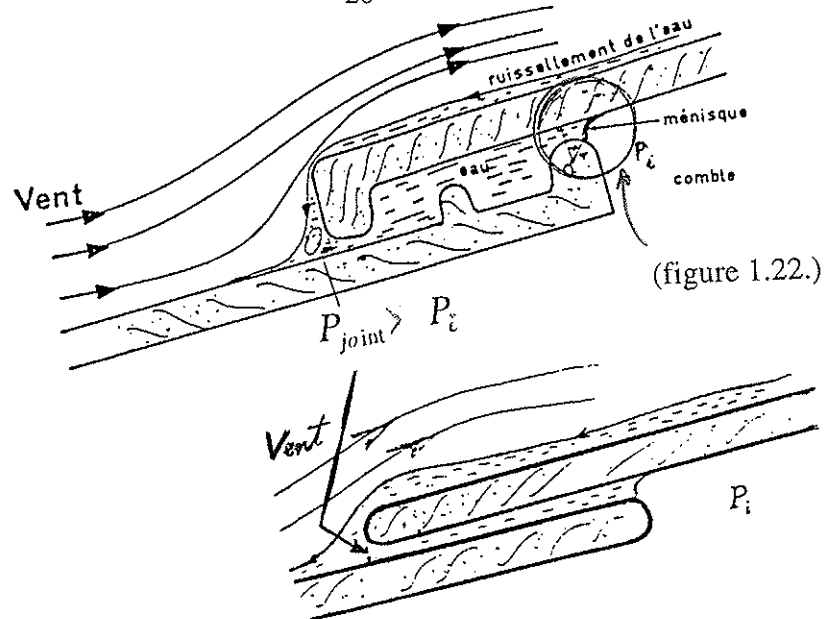


Figure 1.21. : Fuite par gradient de pression d'un joint rempli d'eau

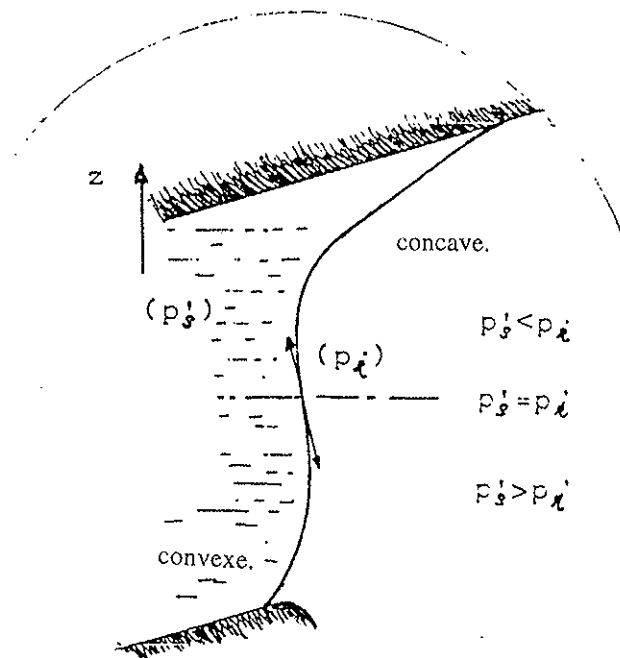


Figure 1.22. : Ménisque mixte présentant un point d'inflexion séparant une partie concave située au-dessus d'une partie convexe [16]

Ce sixième mécanisme représente un vrai dysfonctionnement de la couverture. Dans ce cas, la perte d'étanchéité à l'eau résulte de l'action conjuguée de plusieurs forces: la force de gravité, les forces liées au gradient de pression, les forces de tension superficielle eau-air et eau-matériaux, les forces de frottement ...

Nous nous intéressons uniquement aux forces liées au gradient de pression

1.3.4.2. Les Forces liées au gradient de pression :

Le gradient de pression est principalement d'origine aérodynamique (paragraphe 1.3.1. et 1.3.3.). En présence d'une lame d'eau importante, la pression à l'entrée du joint peut être décomposée en deux parties (figure 1.23.) :

- la pression externe due au vent P_e
- une pression due à la lame d'eau, dont la partie statique vaut $\rho_{eau}gh_{eau}$

D'où : $P_{joint} = P_e + \rho_{eau}gh_{eau}$

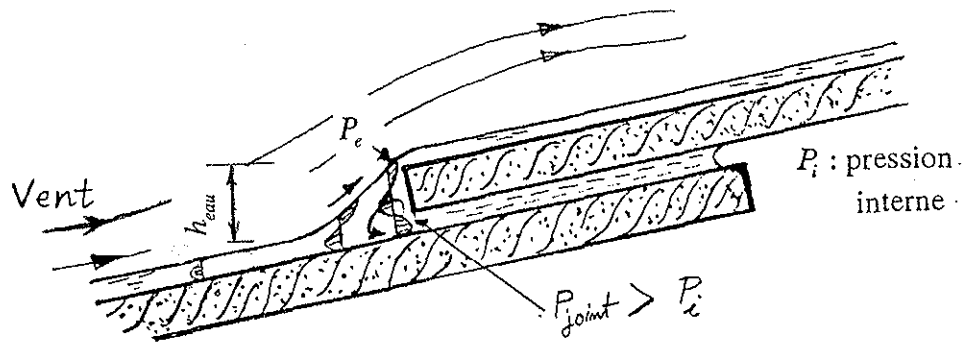


Figure 1.23. : Schéma montrant les conditions à l'entrée et à la sortie du joint

En général la partie hydraulique ne dépasse pas 60 Pascals (paragraphe 1.3.2.), donc moins qu'un dixième de ce que peut atteindre la partie aérodynamique(cf. annexe 3), surtout si l'on prend en compte qu'une perte d'étanchéité à la pluie des couvertures se produit souvent en présence de vents forts [15].

1.3.4.3. Conclusion.

L'analyse des mécanismes d'infiltration d'eau nous a montré le rôle primordial du gradient de pression entre intérieur et extérieur pour une éventuelle perte d'étanchéité à l'eau des couvertures. Cela fait ressortir l'importance d'une modélisation temporelle de la différence de pression.

2. PRESSION DANS UN VOLUME A PAROIS PERMEABLES SOUMISES A ECOULEMENT TURBULENT.

En lisant les études concernant l'estimation de la pression interne dans un volume, j'ai remarqué que les hypothèses de base du modèle théorique (ce qui constitue l'essentielle du travail de modélisation), sont souvent posées sans justification.

La question que je me suis posée lors de la lecture des articles est: "à quels cas concrets répondent ces modèles avec leurs diversités ?".

J'ai sélectionné quelques études qui ont constitué la base, d'une analyse critique de manière à pouvoir justifier les hypothèses du modèle adopté pour les cas des combles .

2.1. Introduction

La pression interne générée par le vent dans le volume dépend du champ de pression externe, de la perméabilité à l'air des parois, de leur flexibilité, de leurs éventuelles vibrations et de l'importance du volume.

Son mécanisme d'évolution est, en général, compliqué. Cela est lié, en grande partie, à la méconnaissance du comportement des parois perméables à l'air vis-à-vis de l'évolution de la pression externe.

Nous essayons d'abord de comprendre le rôle de la paroi perméable (dans notre cas, la couverture), élément de transmission des pressions, pour aborder ensuite le mécanisme d'évolution de la pression interne dans un volume.

2.2. L'écoulement à travers les orifices localisés ou répartis d'une toiture.

Le volume d'un comble est en communication avec l'extérieur par deux types d'ouvertures :

- les chatières de ventilation, petites ouvertures très localisées (annexe 1)
- l'ensemble des joints entre les petits éléments constitutifs de la toiture (ardoises, tuiles ...)

2.2.1. Cas des chatières de ventilation.

En régime stationnaire, le débit d'air traversant un orifice s'exprime par [25, 26, 27] :

$$Q = C_d s \left(\frac{2}{\rho} \Delta P \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.1})$$

où :

Q : débit volumique [m^3/s]

s : surface de l'orifice [m^2]

C_d : coefficient adimensionnel dit "de décharge"

L'expression peut aussi s'écrire :

$$\Delta P = \xi \left(\frac{1}{2} \rho u_0^2 \right) \quad (\text{II.2})$$

avec : $u_0 = \frac{Q}{s}$: vitesse moyenne de l'air dans l'orifice [m/s]

$$\xi = \frac{1}{C_d^2} \text{ coefficient de perte de charge [adimensionnel]}$$

C_d et ξ sont fonction du nombre de Reynolds R_e de l'écoulement dans la section de l'orifice.

Lorsque R_e est assez grand ($R_e > 10^5$), l'écoulement est turbulent, les coefficients C_d et ξ tendent vers des valeurs constantes C_{d_0} et ξ_0 . Ce qui est souvent le cas pour les chatières de ventilation. Les valeurs courantes de C_{d_0} et ξ_0 sont 0.65 et 2.5 [28, 29].

2.2.2. Cas des recouvrements des petits éléments.

On peut considérer que les recouvrements entre les petits éléments constitutifs de la couverture qui font office d'orifices, ont des dimensions et des comportements identiques. Aussi on peut assimiler la couverture à une paroi à perméabilité homogène, qui peut être caractérisée par les expressions suivantes, elles mêmes fonctions de paramètres significatifs.

Relation débit/pression :

$$Q = C_d \sum_{j=1}^m s_j \left(\frac{2}{\rho} \Delta P_j \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.3})$$

Sur une zone, où la différence de pression est uniformément répartie, on peut écrire:

$$Q = \left(C_d \frac{s_e}{S} \right) S \left(\frac{2}{\rho} \Delta P \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.4})$$

où $s_e = \sum_{j=1}^m s_j$: la surface effective ouverte [m²]

S : la surface totale [m²]

C_d : le coefficient de décharge lié à chaque ouverture s_j qui dépend du nombre de Reynolds et par conséquent de ΔP .

Cette équation peut être écrite sous la forme :

$$Q = CS(\Delta P)^N \quad (\text{II.5})$$

où : C : coefficient dimensionnel ($m.s^{-1}.P_a^{-N}$) dépend principalement des caractéristiques géométriques des ouvertures.

N : exposant adimensionnel, dépend de la nature de l'écoulement . Il est égal à 0.5 pour les écoulements turbulents, c'est le cas en particulier des écoulements à travers les parois à forte perméabilité (voir paragraphe 2.2.1.).

L'exposant vaut 1 dans le cas d'un écoulement laminaire, c'est par exemple l'écoulement à travers les fissures d'une paroi.

Il est généralement compris entre 0.6 et 0.7 si l'écoulement est mixte (cas des couvertures).

Coefficient de perte de charge :

Kramer [30] essaye d'isoler la perte de charge ΔP_c induite par la couverture en écrivant :

$$\Delta P_c = \Delta P_2 - \Delta P_1$$

ΔP_1 : la pression que l'on doit appliquer pour qu'un débit Q traverse la surface S avant le montage des éléments de la couverture.

ΔP_2 : la pression que l'on doit appliquer pour que le même débit Q traverse la surface S après le montage de la couverture.

En faisant les mesures pour des valeurs assez importantes de Q , le coefficient de perte de charge tend vers une valeur constante qui ne dépend plus du nombre de Reynolds.

$$\Delta P_c = \left(\frac{1}{s_e^2} - \frac{1}{S^2} \right) Q^2 \frac{\rho}{2} \quad (\text{II.6})$$

$$\Delta P_c = \xi_c \left(\frac{Q}{S} \right)^2 \frac{\rho}{2} \quad (\text{II.7})$$

où :

ξ_c ; le coefficient de perte de charge de la couverture

s_e : la surface ouverte effective

$$\xi_c = \frac{S^2}{s_e^2} - 1 \approx 1 / (s_e / S)^2 \quad S \gg s_e \quad (\text{II.8})$$

Le tableau 2.1. donne les valeurs de ξ_c pour une couverture en tuiles selon le type de tuiles.

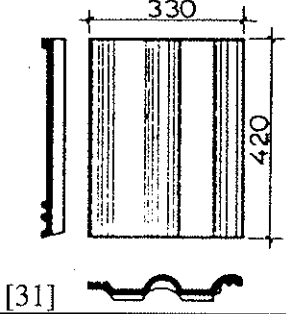
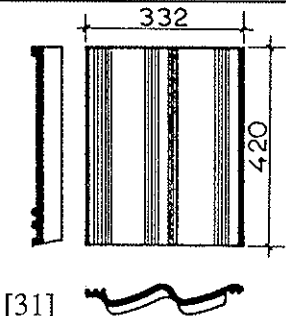
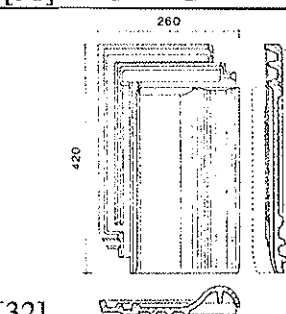
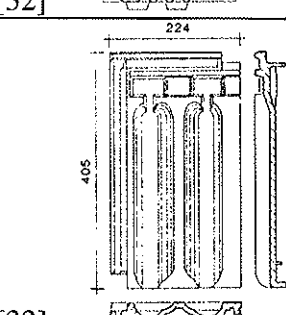
Types de tuiles *		ξ	$\left[\frac{s_e}{S} \right]$	Matériau de tuile
Frاندfurter Pfanne		23000	0.0066	béton
Doppel-S- Pfanne		64000	0.0039	béton
Flachdachpfanne		4380	0.0151	terre cuite
Doppelmulde		4530	0.0148	terre cuite

Tableau 2.1. : Valeurs de coefficient de perte de charge ξ_c et le rapport entre la surface effective ouverte et la surface totale $\left(\frac{s_e}{S} \right)$ pour différents types de tuiles [30]

* Nous avons préféré garder les dénominations Allemandes en les accompagnant de leurs caractéristiques géométriques.

Discussion :

Cette approche est applicable pour les grands débits, et principalement pour des études comparatives entre différents types de couvertures à condition de prendre pour toutes les mesures un débit constant qui pourrait être conventionnel.

Notre approche est différente : nous nous sommes intéressés, ici, à une modélisation mathématique valable quel que soit le débit.

Pour un débit quelconque l'expression du coefficient de perte de charge de la couverture en fonction de ΔP , N et C (définies précédemment) est la suivante :

$$\xi_c = \frac{2/\rho}{C^2[\Delta P]^{2N-1}} - \xi_1 \quad (\text{II.9})$$

Avec ξ_1 : le coefficient de perte de charge par l'ouverture S avant le montage des éléments de la couverture.

$\xi_1 \approx 1.18$ [27], il est donc négligeable devant ξ_c qui est de l'ordre de dizaine de milliers [30]. Il est par conséquent inutile d'effectuer les mesures avant le montage des éléments de la couverture.

$$\xi_c \approx \frac{2/\rho}{C^2[\Delta P]^{2N-1}} \quad (\text{II.10})$$

Rapport entre la surface ouverte et la surface totale :

L'approche de Kramer [30] permet de fournir une approximation du rapport $\left(\frac{s_e}{S}\right)$ (tableau 2.1.) par :

$$\frac{s_e}{S} = \sqrt{\frac{1}{\xi_c}} \quad (\text{II.11})$$

En appelant (s_e) la surface d'une ouverture unique donnant un débit identique à celui traversant la paroi perméable pour la même différence de pression ΔP , Davenport et Surry [29] sont amenés à écrire :

$$\frac{s_e}{S} = \frac{C}{C_d} \sqrt{\frac{\rho}{2}} \Delta P^{(N-0.5)} \quad (\text{II.12})$$

C_d : le coefficient de décharge de l'ouverture s_e pris égal à 0.65.

C, N : les deux coefficients caractérisant la relation débit/pression de la paroi perméable . N est pris égal à 0.65.

$$\frac{s_e}{S} = \frac{C}{0.65} \sqrt{\frac{\rho}{2}} \Delta P^{0.15} \quad (\text{II.13})$$

Dans cette étude $\left(\frac{s_e}{S}\right)$ est mesuré pour différents types de bâtiments pour une valeur constante de ΔP égale à 500 Pa.

Comme l'approche de Kramer, elle est utile pour effectuer des études comparatives.

Si l'on accepte les approximations ($N = 0.65$) et ($C_d = 0.65$) faites par Davenport et Surry, les valeurs de $\left(\frac{s_e}{S}\right)$ qu'ils ont estimées devraient être 1,5 fois supérieures à celles estimées par Kramer dans les mêmes conditions de mesure.

En conclusion, pour effectuer une modélisation mathématique, nous proposons l'utilisation directe de l'une des équations (II.5) et (II.10).

Il est donc indispensable de déterminer les deux constantes C et N .

En revanche, pour un but comparatif, la détermination de ξ_c (cf. équation. II.10) pour une valeur conventionnelle de ΔP est suffisante.

2.2.3. L'effet des fluctuations de pression sur la perméabilité mesurée.

Dans la pratique, les deux pressions externe et interne au voisinage de l'orifice sont fluctuantes, par conséquent le débit traversant l'orifice est instationnaire.

L'équation de l'écoulement instationnaire à travers l'orifice de la figure 2.1., est écrite selon l'axe (x) de l'écoulement [28] :

$$P_i - P_e = -\rho \dot{u}_0 \int \frac{s}{s_0(x)} dx - \xi \left(\frac{1}{2} \rho u_0^2 \right) \quad (\text{II.14})$$

où :

u_0 : la vitesse dans la section s [m/s] ;

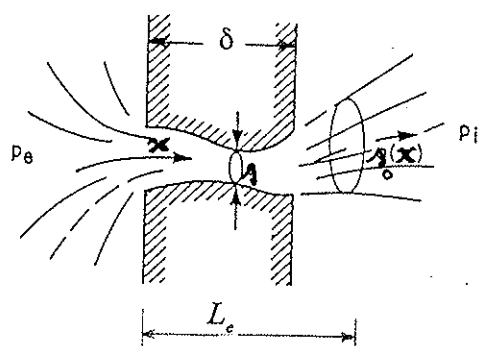
s : la surface nominale de l'ouverture [m²] ;

P_i, P_e : les pressions internes et externes au niveau de l'ouverture (cf. figure 2.1.).

$\int \frac{s}{s_0(x)} dx$: la longueur effective de la masse d'air en mouvement L_e , qui peut être donnée

par des formules simples, dans le cas d'un écoulement fluctuant de faible amplitude (cf. figure 2.2.). Nous notons que pour des valeurs δ relativement grandes par rapport à s (cas des joints entre les éléments plats de couverture), on peut poser $L_e = \delta$.

$$P_i - P_e = -\rho \dot{u}_0 \delta - \xi \left(\frac{1}{2} \rho u_0^2 \right) \quad (\text{II.15})$$



P_e : pression externe

P_i : pression interne

s : surface nominale de l'ouverture

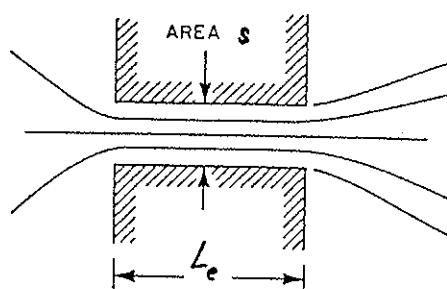
$s_0(x)$: section de jet d'air à l'abscisse x

x : l'abscisse selon l'axe de l'ouverture

δ : profondeur de l'ouverture

L_e : Profondeur équivalente "la longueur du jet"

Figure 2.1. : Notations



$$L_e = \delta + \beta\sqrt{s}$$

section circulaire $\beta = 0.89$

section carrée ($a \times a$) $\beta = 0.86$

rectangle ($a \times 2a$) $\beta = 0.65$

rectangle ($a \times 10a$) $\beta = 0.21$

Figure 2.2. : Longueur effective de la masse d'air en mouvement " L_e " [28]

Discussion :

Pour éliminer l'effet de ce terme, lors des mesures des deux coefficients C et N il faut que l'écoulement soit stationnaire. Les résultats obtenus sont applicables uniquement aux valeurs instantanées des pressions.

2.2.4. L'effet d'un flux tangentiel.

L'effet de la vitesse tangentielle de l'écoulement d'air secondaire dans la couche limite formée sur la toiture, est fortement lié au mode de fixation de ses éléments. Son importance et son sens d'influence dépendent par conséquent du type de couverture étudiée.

Dans le cas des couvertures en tuiles, l'écoulement tangentiel crée une dépression sur la partie "avant" de la tuile et une suppression sur sa partie "arrière", créant ainsi un moment qui soulève la tuile et augmente la perméabilité à l'air [33] (cf. figure 2.3.).

Ce phénomène, rencontré uniquement dans les zones de recollement, s'accroît pour une incidence nulle et pour un rapport $\left(\frac{e}{l_p}\right)$ élevé [33, 34].

où e : épaisseur de l'élément de la couverture ;

l_p : longueur visible de l'élément (assimilable au pureau pour les ardoises cf. annexe 1)

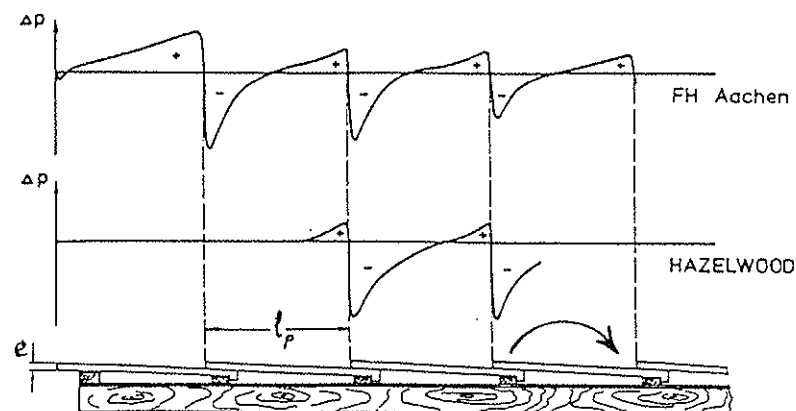


Figure 2.3. : Distribution de pression sur les tuiles en présence d'un écoulement ($\alpha = 0^\circ$) [33]

2.3. Fluctuation de la pression interne.

2.3.1. Introduction

La pression interne fluctuante, induite par le vent, dans un volume peut être décomposée en deux parties :

- la première est une conséquence des fluctuations des pressions externes,
- la deuxième est liée à un phénomène de résonance dans le volume.

La première partie est dominante dans le cas d'un flux parallèle à l'ouverture [35, 36] ou dans le cas des ouvertures réparties sur toutes les faces [28, 29, 37], tandis que la deuxième apparaît dans le cas d'une ouverture face au vent (ou sous le vent) [35, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44]. L'influence de la résonance est également dominante dans le cas d'un changement brutal de la surface d'ouverture [39, 40, 41], pour lequel les fluctuations de la pression externe sont négligeables pendant la phase transitoire.

Les études concernant l'estimation de la pression interne peuvent être divisées en deux catégories :

- la méthode temporelle, qui consiste à calculer la pression interne $P_i(t)$ à chaque instant (t) ;
- la méthode fréquentielle, qui consiste à exprimer $P_i(t)$ par la somme de ses composantes moyenne $\overline{P_i}$ et fluctuante p_i' . Cette dernière est présentée par sa densité spectrale.

L'approche temporelle sera divisée en deux cas selon la géométrie du volume : grand volume (comble) ou lame d'air (où l'une des dimensions est petite devant les deux autres, par exemple écran en sous-face de la couverture).

2.3.2. L'évolution temporelle de la pression interne dans un volume.

Pour une première approche, nous pouvons assimiler l'ensemble des ouvertures "en surpression" à une ouverture au vent (s_1), et l'ensemble des ouvertures "en dépression" à une ouverture sous le vent (s_2).

Dans la pratique, on peut distinguer deux cas :

- L'ensemble de la toiture est en surpression (ou en dépression) :

cas d'une seule ouverture : $S = S_1$ (ou $S = S_2$)

- Une partie seulement de la toiture est en surpression :

cas de deux ouvertures s_1 et s_2 .

Ces deux cas sont étudiés successivement. L'influence de flexibilité des parois sur l'évolution de la pression interne sera analysée à la suite.

Cas d'une seule ouverture.

Saathoff et Liu [39] ont décrit l'évolution de la pression interne par l'équation (II.16) en appliquant l'équation de Bernoulli instationnaire entre deux points au niveau de l'ouverture (Points 1 et 2 cf. figure 2.4), supposant la pression comme homogène à l'intérieur du volume et en tenant compte de la compressibilité de l'air:

$$\frac{\rho L_e V_0}{C_d s K_a} \ddot{C}_{P_i} + \left[\frac{\rho \bar{U} V_0}{2 C_d s K_a} \right]^2 \left| \dot{C}_{P_i} \right| \dot{C}_{P_i} + C_{P_i} = C_{P_e} \quad (\text{II.16})^1$$

où :

ρ : masse volumique de l'air ;

L_e : longueur effective de la masse d'air (égale à $0.89\sqrt{s}$ pour une ouverture circulaire) ;

V_0 : volume de la cavité ;

C_d : coefficient de décharge ;

s : section de l'ouverture ;

$\bar{U}$: vitesse moyenne du vent ;

C_{P_e}, C_{P_i} : coefficients de pression externe et interne ;

$1 / K_a$: coefficient de compressibilité de l'air.

$$= \frac{1}{\gamma P_0} \text{ (transformation adiabatique)}$$

$$= \frac{1}{P_0} \text{ (transformation isotherme).}$$

Dans cet analyse, les parois sont considérées comme parfaitement rigides.

¹Une formule similaire a été établie par Holmes [38] en 1979 en assimilant ce système à l'oscillateur de Helmholtz comme en acoustique.

L'équation (II.16) décrit l'évolution temporelle des fluctuations de la pression interne après une brutale mise à l'atmosphère (ouverture d'une porte ou une fenêtre). Pendant cette phase transitoire, le volume interne se comporte comme une cavité résonante de fréquence:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_a C_d s}{\rho L_e V_0}} \quad (\text{II.17})$$

et d'amortissement A:

$$A = \left[\frac{\rho \bar{U} V_0}{2 C_d s K_a} \right]^2 \left| \dot{C}_{pi} \right| \quad (\text{II.18})$$

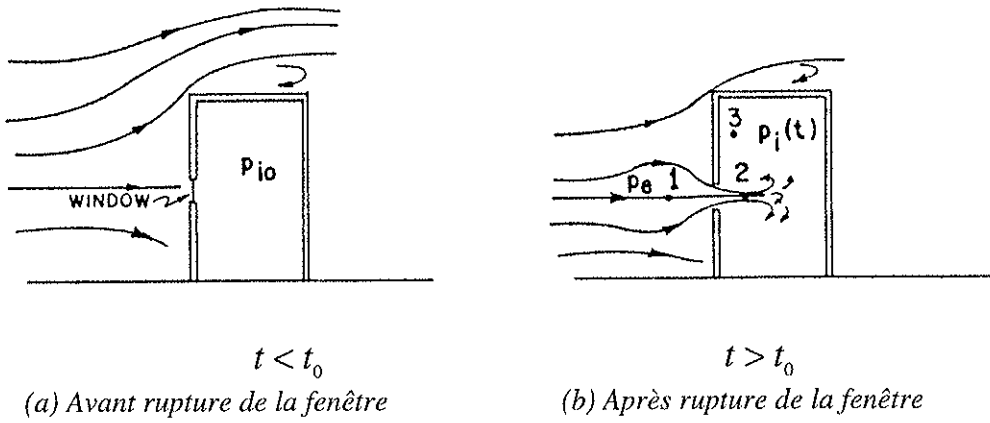


Figure 2.4. : Cas d'une ouverture brutale [39]

En valeur instantanée, le niveau de la pression interne peut être supérieur à celui de la pression externe au droit de l'ouverture. Ce phénomène ne peut pas être décrit par l'analyse stationnaire ou quasi-stationnaire. Il est par conséquent important d'étudier les conditions pour lesquelles un phénomène de résonance peut avoir lieu. Pour cela nous essayons de nous faire une idée sur les ordres de grandeurs des termes constitutifs de l'équation II.16.

Appelons facteur d'amortissement F_A le rapport entre le terme d'amortissement et le terme d'inertie $\left(\frac{\rho \bar{U} V_0}{2 C_d s K_a} \right)^2 / \left(\frac{\rho L_e V_0}{C_d s K_a} \right)$:

$$F_A = \left(\frac{\bar{U}}{C_a} \right)^2 \left(\frac{V_0}{4 C_d s L_e} \right) \quad (\text{II.19})$$

Lorsque F_A s'accroît, l'effet d'inertie devient négligeable; l'évolution de la pression interne est décrite par une équation différentielle du 1er ordre (pas de résonance).

Pour $F_A \ll 1$, le phénomène de résonance devient important [40, 42]. Il est à noter que cette condition est nécessaire mais insuffisante; elle doit être couplée avec d'autres conditions: par exemple parois parfaitement rigides, dissipation d'énergie par frottement faible à l'entrée de l'orifice, absence de fuites... [46].

Dans le cas d'un comble et pour les dimensions assez défavorables ($S = 10m^2, V_o = 20m^3$), les gammes des variations du facteur d'amortissement F_A et de la fréquence propre du système sont:

$$F_A \in [2.15, 2.87]$$

$$f_0 \in [6 \text{ Hz}, 20 \text{ Hz}]$$

Ces gammes sont déterminées en s'appuyant sur les mesures de perméabilité des tuiles [30]: $\frac{C_d S}{S} = \frac{s_e}{S} \in [0.0039, 0.0156]$ (cf. tableau 2.1.) et pour une vitesse moyenne du vent $\bar{U} \approx 20m/s$.

En conclusion, dans les cas courants des combles, la fréquence de résonance, *si elle a lieu*, devrait être supérieure à 5 Hz.

Vue que le terme d'amortissement est 2 à 3 fois plus important que celui d'inertie, la probabilité d'apparition de résonance est donc faible. On note également que les cas les plus défavorables, du point de vue "charges sur les éléments de la toiture" sont lorsque une partie de la toiture est en surpression (l'autre partie étant en dépression). Ceci augmente une fois de plus l'amortissement qui dépasse largement, dans ce cas, le terme d'inertie (cf. cas de deux ouvertures). Par conséquent, ce dernier pourrait être négligé.

Cela conduit à considérer comme quasi stationnaire l'évolution de la pression interne. Cette hypothèse est souvent valable pour les grands volumes à parois de faible perméabilité à l'air [37].

Dans ce cas de quasi stationnarité, la notion du temps de réponse devient importante. Il s'agit du temps de transmission du signal de la pression externe vers le volume interne.

Son expression, dans le cas d'une seule ouverture est la suivante [38]:

$$T_r = \frac{\rho V_0 \bar{U}}{C_d s K_a} \sqrt{C_{p_e} - C_{p_{i0}}} \quad (\text{II.21})$$

C_{p_e} : coefficient de pression externe au niveau de l'ouverture (supposé constant pendant la durée du temps de réponse T_r) ;

$C_{p_{i0}}$: coefficient de pression interne initiale.

Plus le temps de réponse est court, moins la différence de pression entre intérieur et extérieur est importante. On peut définir également la fréquence de coupure du système par l'inverse du temps de réponse. Les fluctuations de la pression externe ayant une fréquence supérieure à $\left(\frac{1}{T_r}\right)$ subissent un grand amortissement lors de leur transmission dans le volume interne.

Cas de deux ouvertures :

De la même manière que dans le cas d'une seule ouverture, Saathoff and Liu [47] appliquent l'équation de Bernoulli à chaque ouverture s_1, s_2 (cf. figure 2.5.). Le système d'équations différentiel peut être résolu numériquement pour un seul volume à deux ouvertures ou plusieurs volumes en communication :

$$\rho \dot{u}_{01} L_e + \frac{\xi}{2} \rho |u_{01}| u_{01} = P_{e1} - P_i \quad (\text{II.22})$$

$$\rho \dot{u}_{02} L_e + \frac{\xi}{2} \rho |u_{02}| u_{02} = P_i - P_{e2} \quad (\text{II.23})$$

$$\frac{K_a}{V_0} C_d (u_{01} s_1 - u_{02} s_2) = \dot{P}_i \quad (\text{II.24})$$

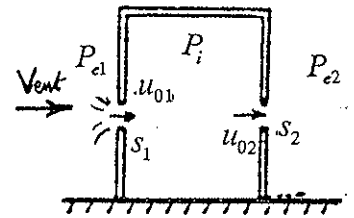
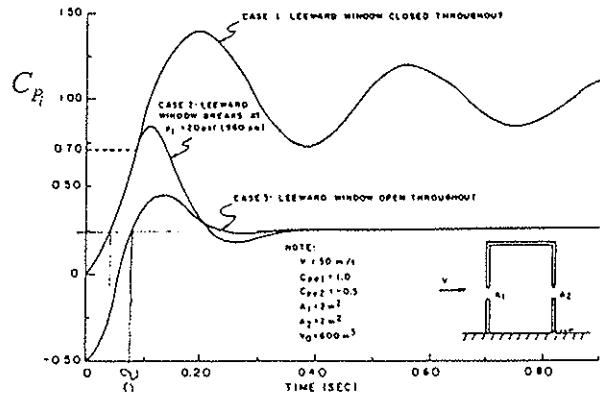
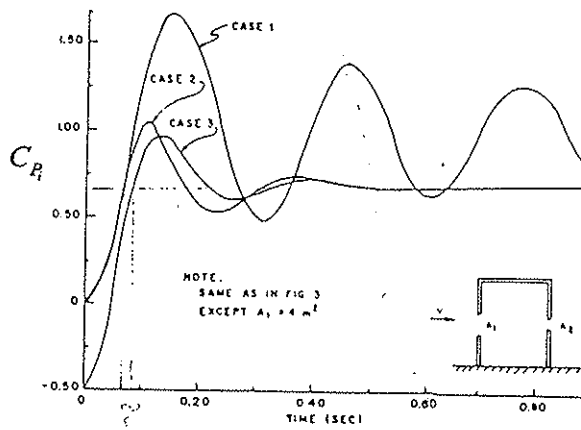


Figure 2.5. : Notations

Cette étude a montré le grand amortissement induit par l'existence de la deuxième ouverture (cf. figure 2.6.).



(a) $s_1 = 2 \text{ m}$, $s_1 / s_2 = 1$



(b) $s_1 = 4 \text{ m}$, $s_1 / s_2 = 2$

Figure 2.6. : Evolution de la pression interne dans un volume ($V_0 = 600 \text{ m}^3$) ayant deux ouvertures s_1, s_2 ($C_{pe1} = 1$, $C_{pe2} = -0.5$) suite à une rupture (casse) de la fenêtre au vent (s_1) pour trois cas :

cas 1 : la fenêtre sous le vent (s_2) est toujours fermée

cas 2 : rupture dans la fenêtre sous le vent à $\Delta P = 960 \text{ Pascal}$

cas 3 : la fenêtre sous le vent (s_2) est toujours ouverte [47]

Rôle de la flexibilité des parois.

Pour un modèle simple [28] :

- 2 ouvertures : s_1 en surpression

s_2 en dépression

- 1 paroi flexible et imperméable à l'air (cf.

figure 2.7.)

les deux équations (II.22) et (II.23) restent valables. Un autre terme s'ajoute à l'équation (II.24) qui tient compte du déplacement de la paroi flexible :

$$\frac{K_a}{V_0}(s_1 d_1 + s_2 d_2 + s_3 d_3) = P_i \quad (\text{II.25})$$

avec

$$s_3 d_3 = \Delta V_0 = (P_{e3} - P_i) \frac{V_0}{K_v}$$

où d_1, d_2 : les déplacements d'air aux ouvertures 1 et 2 ; ($u_{01} = \dot{d}_1, u_{02} = \dot{d}_2$)

et d_3 : le déplacement moyen de la paroi flexible (3) ;

les sens des axes portant d_1, d_2, d_3 sont dirigés vers l'intérieur du volume (figure 2.7.)

$\frac{1}{K_v}$: indice de flexibilité (variation volumique relative, liée à la flexibilité des parois, par l'unité de pression)

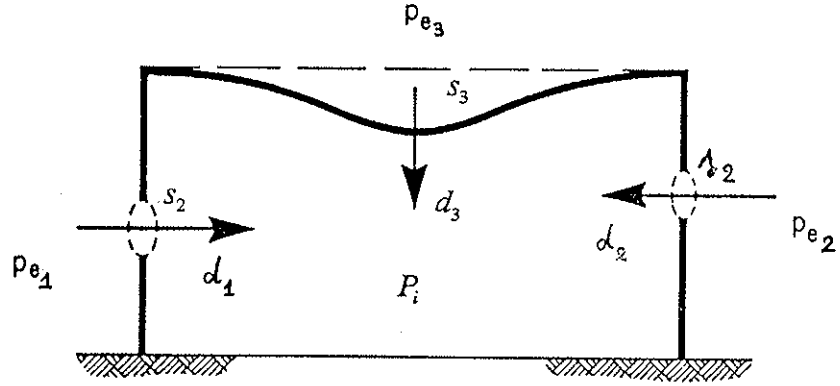


Figure 2.7. : Notations [28]

D'où on peut écrire :

$$\frac{K_a}{V_0}(s_1 d_1 + s_2 d_2) + \frac{K_a}{K_v}(P_{e3} - P_i) = P_i \quad (\text{II.26})$$

Dans une approche empirique [48], les modèles établis sur l'hypothèse des parois parfaitement rigides restent valables, en remplaçant le coefficient de compressibilité de l'air $\left(\frac{1}{K_a}\right)$ par un autre "équivalent" $\left(\frac{1}{K_a'}\right)$. Ce dernier prend en compte la compressibilité de l'air et la flexibilité des parois :

$$\frac{1}{K_a'} = \frac{1}{K_a} + \frac{1}{K_v} \quad (\text{II.27})$$

Discussion :

Les deux équations (II.28) et (II.29) montrent que lorsque :

$\frac{K_a}{K_v} \ll 1$, l'effet de flexibilité des parois est négligeable. K_a' tend vers K_a .

$\frac{K_a}{K_v} \gg 1$, l'effet de compressibilité de l'air est négligeable. K_a' tend vers K_v .

Dans le 2ème cas ($K_a' < K_a$) le temps de réponse est plus long et l'amortissement plus grand que dans le 1er cas : l'hypothèse de quasi-stationnarité est justifiée même si le facteur d'amortissement F_A calculé par (II.19) est faible.

2.3.3. Pression interne dans une lame d'air.

Introduction.

La technique utilisée pour limiter la pénétration de la pluie à travers les éléments d'une toiture, consiste à placer un écran en sous-face. Ceci favorise l'équilibre de pression entre l'extérieur et la lame d'air, séparant les éléments de la couverture de l'écran. La diminution du volume interne (ici, le volume de la lame d'air) réduit énormément le temps de réponse. Il est de l'ordre de 2/100 de seconde pour une couverture en tuile avec écran rigide en sous-face [33] (cf. figure 2.8.). L'équilibre se fait donc presque instantanément.

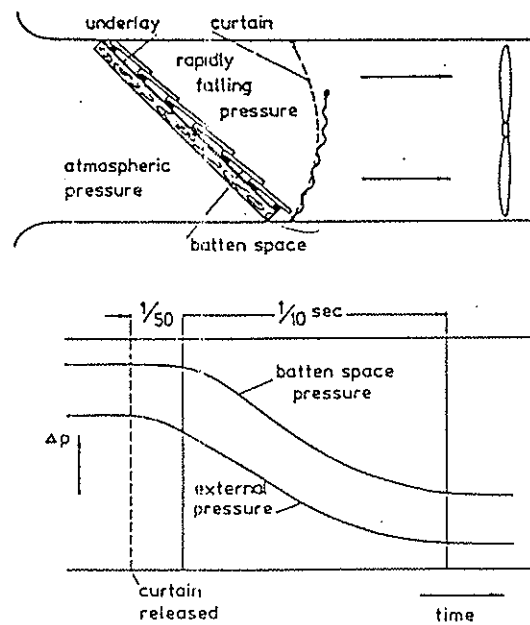


Figure 2.8. : Détermination expérimentale du temps de réponse [33].

Pour les façades, la réduction du temps de réponse est obtenue en augmentant la perméabilité de la paroi externe (les bardages). Différents cas sont retenus :

Cas 1 : parois rigides et imperméables à l'air, une grande et seule ouverture de ventilation [50] (figure 2.9a).

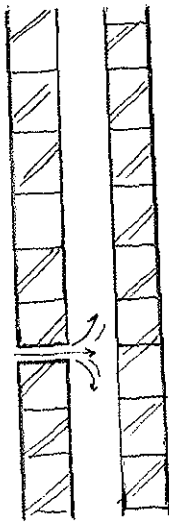
Cas 2 : parois rigides à faible perméabilité à l'air, plusieurs ouvertures de ventilation réparties sur toute la surface de la paroi externe [51] (figure 2.9b).

Cas 3 : paroi externe fortement perméable à l'air, paroi interne flexible et imperméable à l'air, pas d'ouverture de ventilation [52] (figure 2.9c).

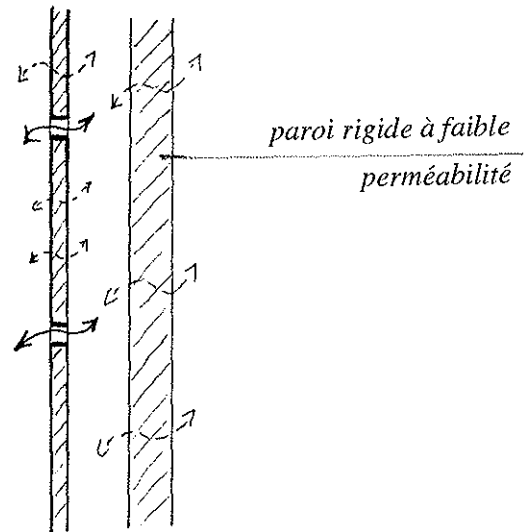
Cas 4 : paroi externe considérée comme rigide et perméable à l'air, paroi interne rigide et imperméable à l'air. Les deux parois étant liées par des éléments de fixations, la lame d'air est découpée en plusieurs volumes [53, 54, 55] (figure 2.9d).

Les modèles théoriques, s'adaptant à chacun des cas, peuvent être classés en deux catégories principales :

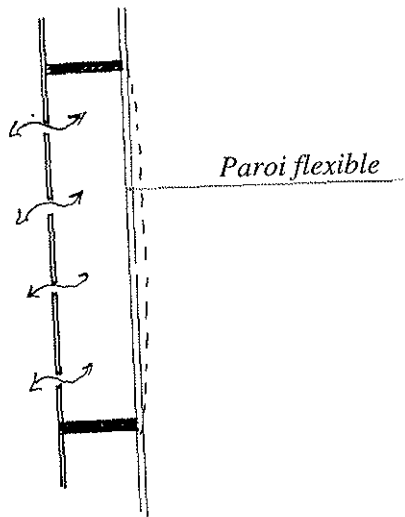
- 1) lame d'air à faible perte de charge (cas 1, 2, 3),
- 2) lame d'air à forte perte de charge (cas 4)



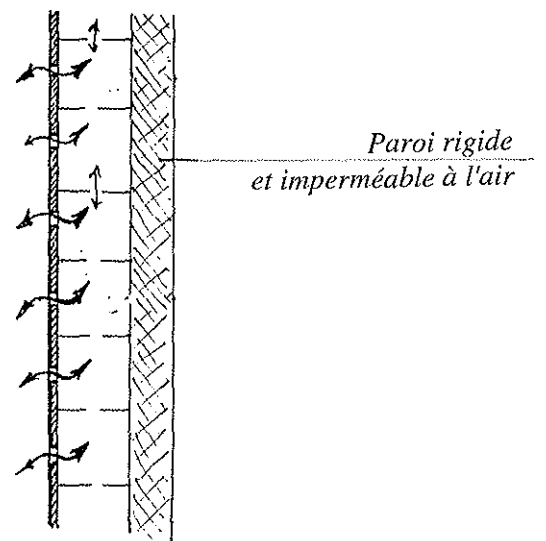
(a) Cas 1



(b) Cas 2



(c) Cas 3



(d) Cas 4

Figure 2.9. : Différents types de lame d'air.

Lame d'air continue (à faible perte de charge) :

A l'exception du cas d'une ouverture de ventilation unique (figure 2.10.), les variations spatiales de la pression interne sont négligeables [51, 52]. Dans le cas particulier d'une seule grande ouverture, les variations de pression sont liées à l'important gradient de vitesse dans la lame d'air.

Le modèle est basé sur le principe de conservation de masse et de quantité de mouvement. La solution numérique des équations différentielles, obtenue par différence finie, nécessite un maillage fin et une reproduction très poussée des caractéristiques géométriques (cf. figure 2.11.). Ce modèle est exploitable dans le cas d'un nombre limité d'ouvertures à géométrie simple mais devient lourd dans le cas d'une paroi dotée d'un grand nombre d'ouvertures (cas des couvertures à petits éléments).

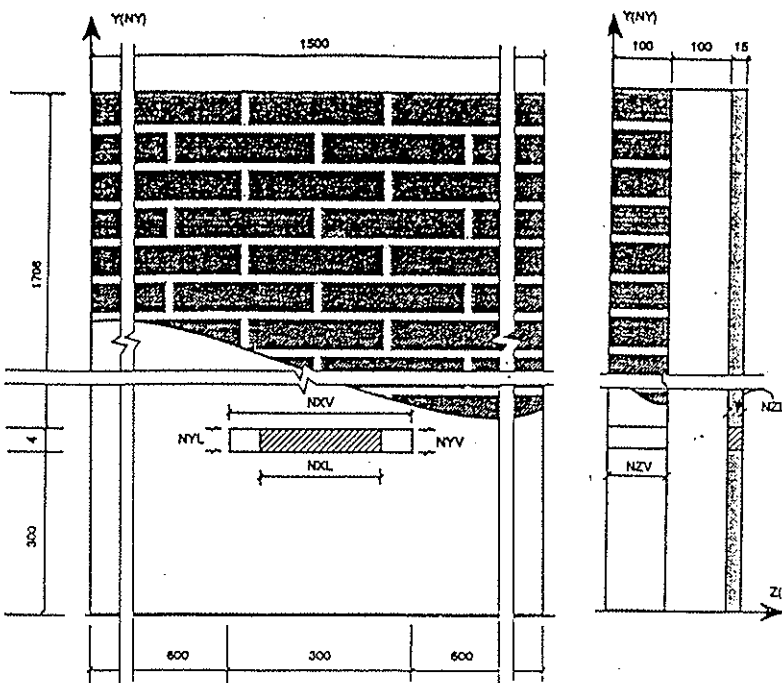


Figure 2.10. : Lame d'air à une ouverture ventilation [50]

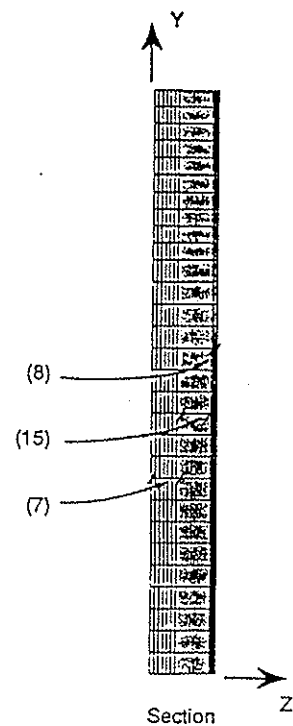


Figure 2.11. : Maillage de l'ensemble : 2 parois + lame d'air [50]

D'autre part si l'on fait l'hypothèse d'une pression homogène, d'autres paramètres influençant les fluctuations de la pression dans la lame d'air pourraient être pris en compte comme par exemple la flexibilité des parois. Ceci a fait l'objet d'une étude appliquée à l'estimation de la

pression interne pour les bardages (cas 3) ou les double-vitrages (cf. figure 2.12.). Pour cette application, la paroi interne est considérée comme flexible et imperméable à l'air.

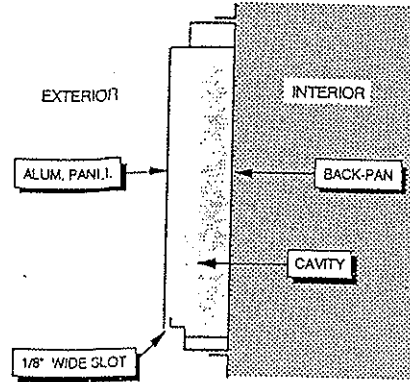


Figure 2.12. : Schéma du modèle testé [52].

La paroi externe contient une ouverture de ventilation à travers laquelle l'écoulement est considéré comme turbulent [52]. En supposant une évolution quasi-stationnaire de la pression interne et en négligeant la compressibilité de l'air, l'analyse conduit à :

$$P_i = \frac{P_e - P_i}{\sqrt{\xi} K_p \sqrt{P_e - P_i}} \frac{s}{S} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (\text{II.28})$$

avec K_p : le coefficient de flexibilité de la paroi

$$K_p = \frac{d(\Delta V_0)}{d(\Delta P)} \frac{1}{S}$$

ΔV_0 : la variation volumique induite par la flexibilité de la paroi

S : la surface de la paroi ;

ΔP : l'écart de pression qui impose cette déformation.

Ce coefficient est calculé à partir des mesures expérimentales de la flèche maximale δ_c dans le point central de la paroi (cf. figure 2.13.) et ne dépend que des caractéristiques de la paroi ; il est lié à l'indice de flexibilité $\left(\frac{1}{K_v}\right)$ par :

$$\frac{1}{K_v} = \frac{K_p \cdot S}{V_0}$$

où : V_0 : le volume de la lame d'air

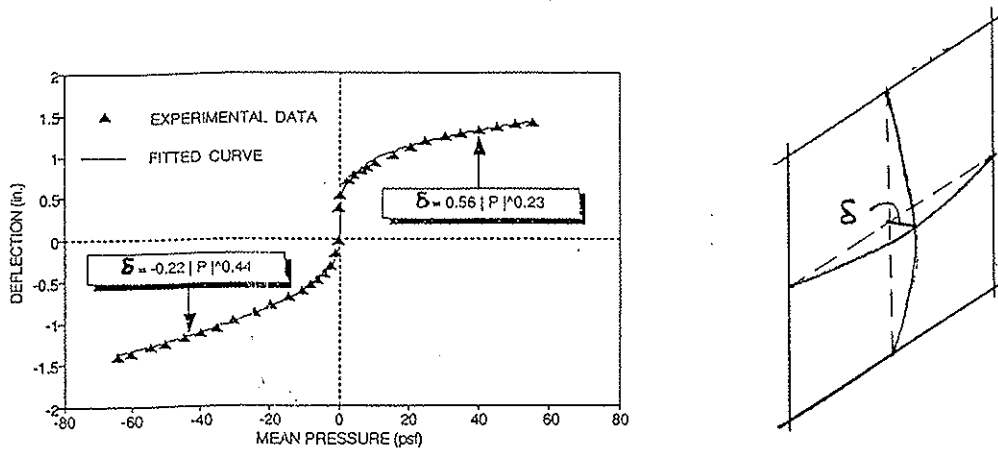


Figure 2.13. : Fonction de rigidité de la paroi interne [52].

La comparaison entre le calcul et la mesure en terme de différence de pression ($P_e - P_i$) instantanée montre une cohérence assez bonne avec un certain déphasage (cf. figure 2.14.).

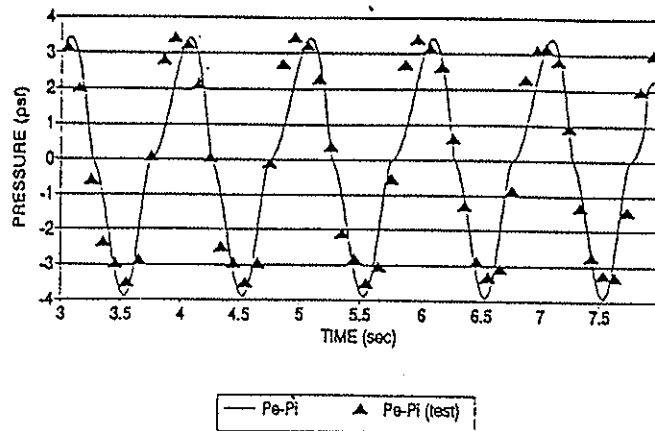


Figure 2.14. : Différence de pression calculée par rapport à celle mesurée [52].

Remarque : De l'équation (II.28), on peut déduire l'expression du temps de réponse relative à ce cas :

$$T_r = \frac{\sqrt{2\rho}K_p\sqrt{\xi}}{s/S} \sqrt{|P_e - P_i|} \quad (II.29)$$

Pour comparer avec celui calculé pour le cas des parois rigides (équation II.21), on peut reformuler l'équation (II.29) en écrivant les termes $(P_e - P_i)K_p\sqrt{\xi}$ de façon identique.

$$(II.29) \text{ devient : } T_r = \frac{\rho \bar{U} V_0}{K_v C_d s} \sqrt{\Delta C_p} \quad (\text{paroi flexible})$$

$$(II.21) \text{ est : } T_r = \frac{\rho \bar{U} V_0}{K_a C_d s} \sqrt{\Delta C_p} \quad (\text{paroi rigide})$$

Nous notons qu'un simple remplacement de K_a par une valeur équivalente K_v permet de passer d'un cas à un autre ; d'où l'intérêt de la formule (II.27) qui définit la compressibilité de l'air équivalente.

Lame d'air avec perte de charge.

Souvent la lame d'air ne constitue pas un volume unique. Elle est découpée en cellules par les éléments de fixation (linteaux, contre-linteaux ...). Dans ce cas, la lame d'air peut être modélisée par un ensemble de petits volumes en communication par des ouvertures (figures 2.15. et 2.16.).

En supposant une pression homogène dans chaque volume et en appliquant l'équation de Bernoulli instationnaire à chaque ouverture, le modèle obtenu [54, 55] reproduit correctement le champ de pression interne mesuré (en terme des valeurs moyennes, écart-types et spectre) Le faible écart peut être expliqué par l'utilisation de coefficients de perte de charge théoriques.

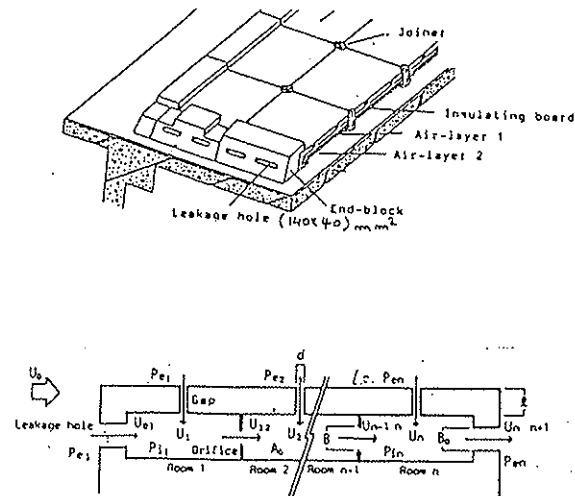


Figure 2.15. : *Lame d'air avec perte de charge.*
Cas d'une toiture avec terrasse - isolation externe [55].

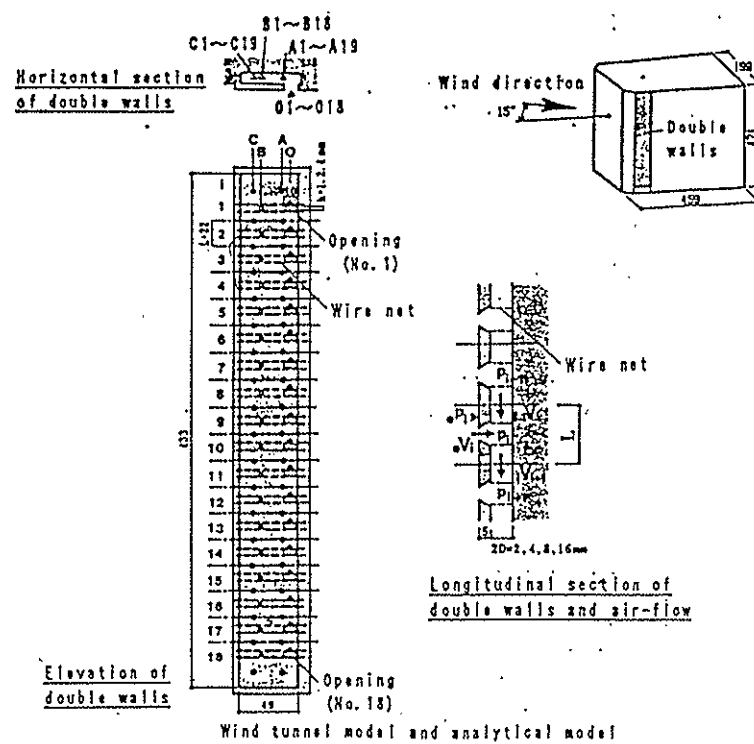


Figure 2.16. : *Lame d'air avec perte de charge - Cas des bardages [54].*

Dans une étude concernant le champ de pression interne derrière les bardages, la même approche est utilisée [53]. La petite taille des ouvertures affaiblit le terme d'inertie, l'évolution de la pression interne est donc prise quasi-stationnaire.

Les coefficients de perte de charges sont tous déterminés par mesure. La comparaison mesure/calcul ne représente pas un écart important (cf. figure 2.17.).

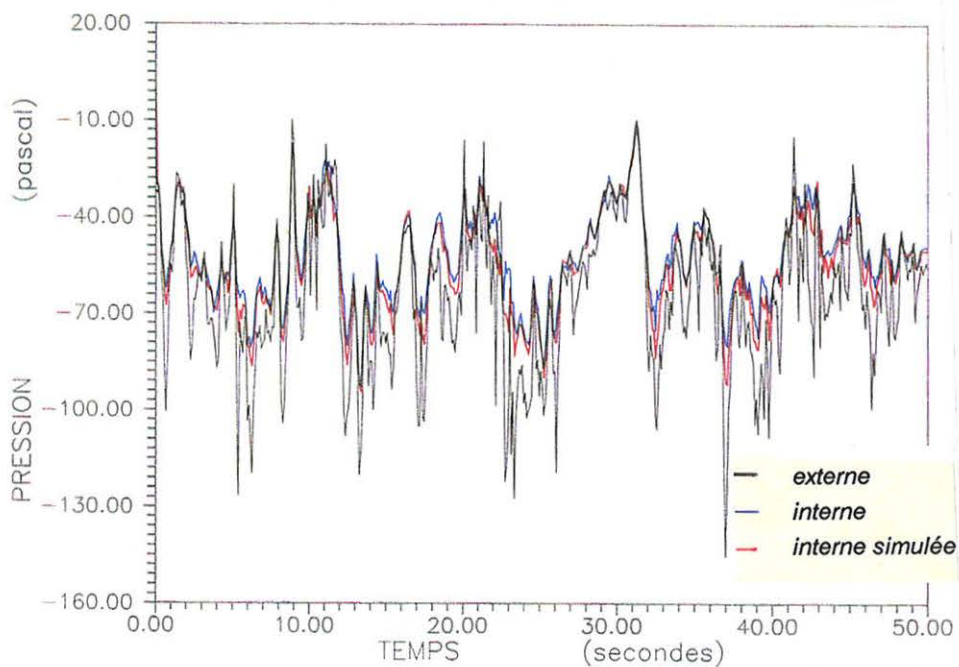


Figure 2.17. : Pression interne simulée comparée aux pressions externe et interne mesurées en vraie grandeur [53].

Il est à noter que dans les deux études [54, 55], les ouvertures sont localisées et d'une taille assez importante, ce qui rend le terme d'inertie non négligeable. Pour ces études, la solution instationnaire est mieux adaptée, contrairement au cas des bardages [53] où la solution quasi-stationnaire est plus appropriée.

2.3.4. Densité spectrale de la pression interne - Fonction de transfert.

Introduction.

La pression interne, étant un signal aléatoire, peut être décrite par sa valeur moyenne et sa densité spectrale.

Cette approche consiste à séparer les deux composantes moyenne et fluctuante de la pression interne. La valeur moyenne est calculée en supposant un régime stationnaire.

Le calcul de la densité spectrale de la composante fluctuante de la pression interne à partir de celle de la pression externe nécessite une relation linéaire entre les deux composantes fluctuantes p_i et p_e .

Cette relation n'étant linéaire que pour un écoulement laminaire, des hypothèses simplificatrices sont indispensables dans le cas d'écoulements mixtes ou turbulents.

En effectuant une transformée de Fourier sur la relation p_i / p_e , on obtient la fonction de transfert entre les fluctuations de pression interne et celles de la pression externe. ($H(\omega)$) :

L'écart type σ_{p_i} est par conséquent accessible au calcul :

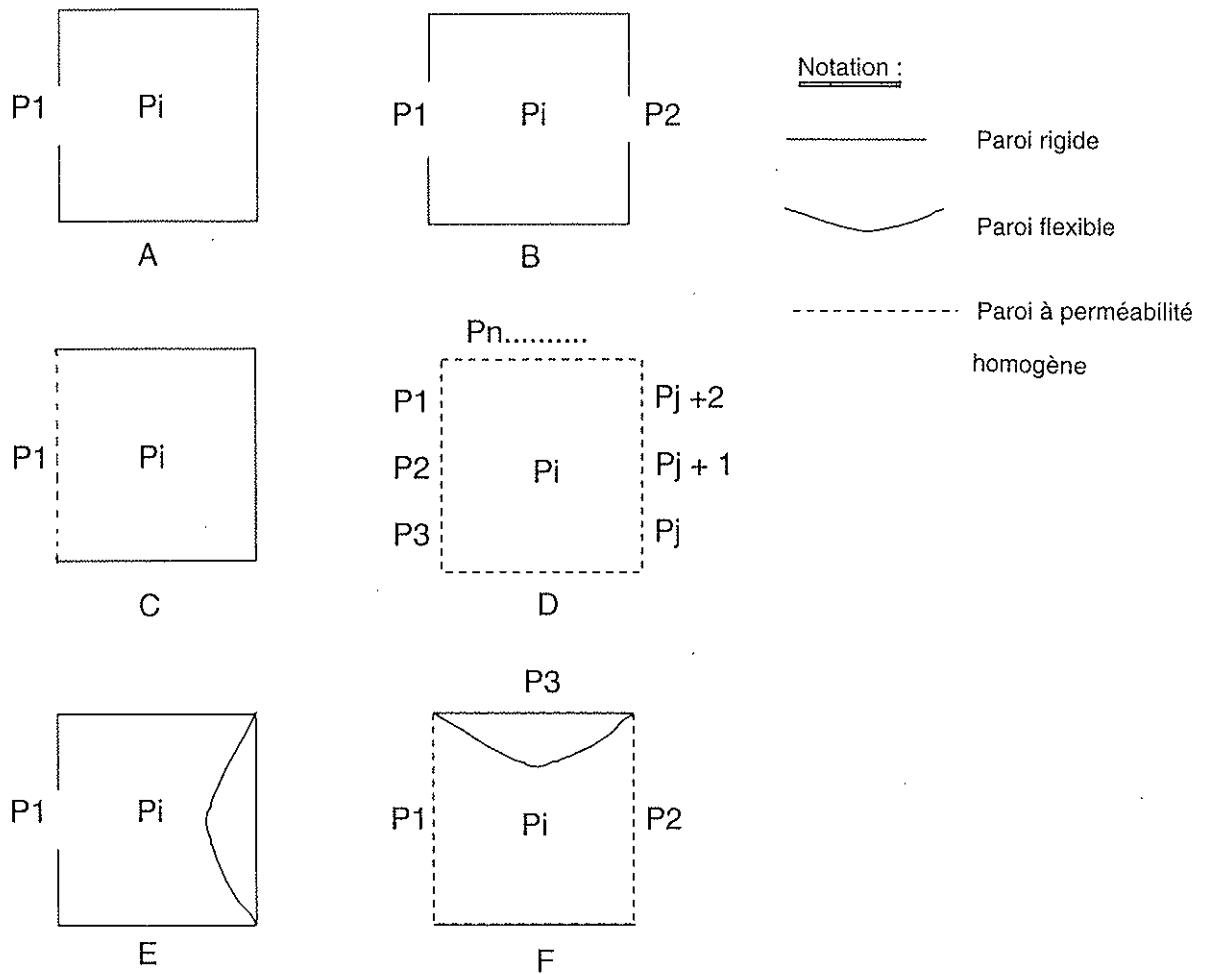
$$S_{p_i}(\omega) = \|H(\omega)\|^2 \cdot S_{p_e}(\omega)$$

$$\sigma_{p_i}^2 = \int_0^\infty S_{p_i}(\omega) d\omega$$

La figure 2.18. illustre quelques cas-type étudiés par cette approche. Nous les classons en deux catégories :

- cas des ouvertures localisées (A, B et E)
- cas d'une paroi perméable (C, D et F)

Dans cette étude, nous nous intéressons au deuxième cas (paroi perméable).



Hypothèses sur l'évolution de P_i	Hypothèses sur l'écoulement à travers l'ouverture		
	Turbulent	Mixte	Laminaire
Stationnaire	D[56]	--	D[56]
Quasi-stationnaire	F[28]	--	--
Instationnaire	A[44]	B[57]	
	B[44]	C[29]	--
	E[28]		

Figure 2.18. : Cas type étudiés et références associées selon les hypothèses adoptées.

. Cas d'une paroi perméable :

Il existe quelques études sur le thème [28, 29, 56], que l'on va passer en revue.

Dans une approche simple, où le calcul ne tient pas compte de la compressibilité de l'air et concerne le cas d'une répartition homogène des trous sur toutes les faces de l'obstacle (cf. figure 2.19.) ; deux solutions ont été proposées [56] :

- écoulement laminaire ($N = 1$) ;
- écoulement turbulent ($N = 0.5$).

La comparaison entre le spectre mesuré et calculé paraît satisfaisante (cf. figure 2.20.). Le calcul effectué pour un écoulement turbulent donne une meilleure approximation aussi bien pour les valeurs moyennes que pour les valeurs de l'écart type de la pression interne (cf. figures 2.21., 2.22.).

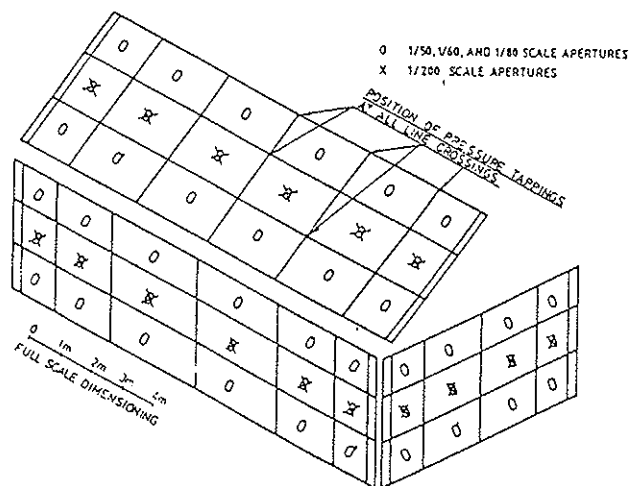


Figure 2.19 : Position des ouvertures et des prises de pression sur le modèle. Les prises de pression sont localisées aux croisements des lignes.[56]

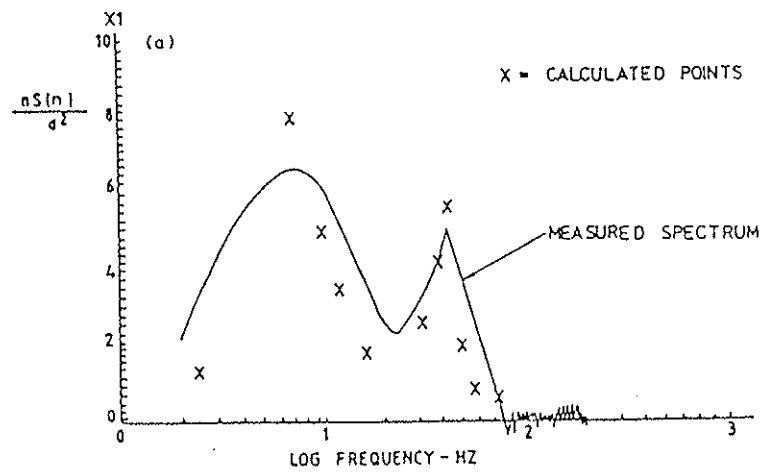


Figure 2.20. : Comparaison entre les spectres des fluctuations de pression interne calculées et mesurées : perméabilité des parois 0.2 %. [56]

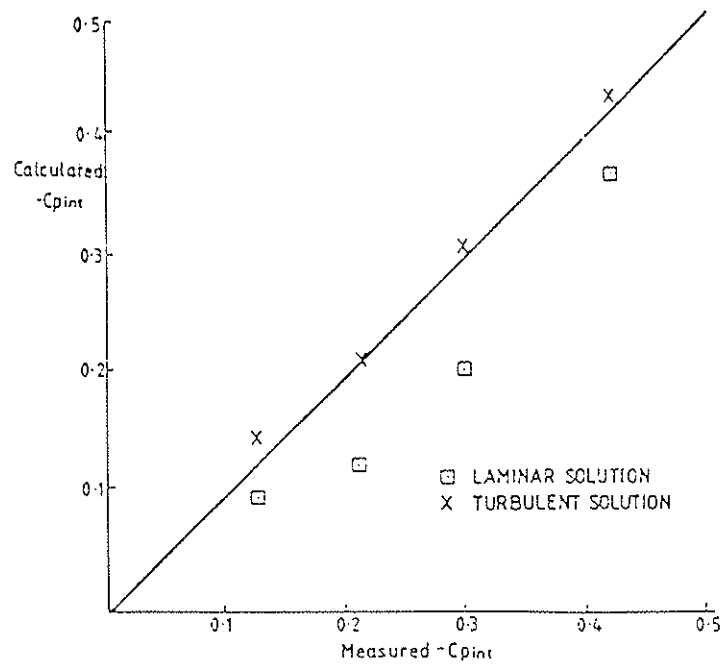


Figure 2.21. : Comparaison entre les valeurs moyennes de pression interne calculées et mesurées : perméabilité des parois 0.05 %. [56]

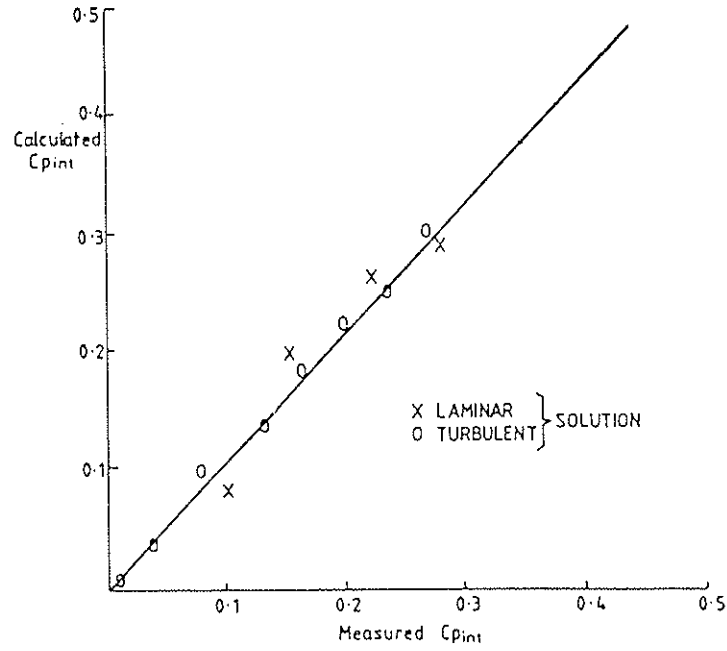


Figure 2.22. : Comparaison entre les écart types de la pression interne calculée et mesurée.[56]

La deuxième étude a des applications plus générales [29]. L'écoulement à travers les parois perméables s'exprime par l'équation (II.5). La relation entre la composante fluctuante de débit (q) et celle de la différence de pression (Δp) est rendue linéaire :

$$q' = \left(\frac{dQ}{d\Delta P} \right)_{\Delta P = \overline{\Delta P}_0} \Delta p' \quad (\text{II.32})$$

$$q' = \Delta_0 \Delta p' \quad (\text{II.33})$$

$$\text{avec } \Delta_0 = C \cdot N \cdot S (\overline{\Delta P}_0)^{N-1} \quad (\text{II.34})$$

Où : C, N : les coefficients caractéristiques de la perméabilité de la paroi (cf. II.5) ;

S : la surface totale de la paroi ;

$\overline{\Delta P}_0$: une valeur fictive de la différence de pression moyenne $\neq 0$.

A partir de l'équation (II.32) et en considérant une évolution instationnaire de la pression interne dans le volume Davenport et Surry [29] obtiennent :

$$p_i + \frac{1}{\omega_c} \dot{p}_i + \frac{1}{\omega_0^2} \ddot{p} = p_i \quad (\text{II.35})$$

avec
$$\omega_c = \Delta_0 \rho C_a^2 / V_0$$

$$\omega_0 \propto 2\pi C_a / V_0^{1/3}$$

où : V_0 : le volume [m^3] ;

C_a : la célérité (vitesse du son dans l'air) [m/s].

Du couplage de l'effet de volume et de la paroi perméable résulte un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure $f_c = \frac{\omega_c}{2\pi}$. Plus la perméabilité de la paroi est faible ou le volume interne est grand, plus la fréquence de coupure est faible. Néanmoins la pression interne est davantage filtrée par les corrélations spatiales des pressions externes lorsque la fréquence de coupure f_c est grande.

En appliquant cette approche aux volumes assez grands et pour une valeur $\Delta_0 = 0.1 m^3 \cdot s^{-1} K P_a^{-1}$, Davenport et Surry [29] concluent que en absence de grande ouverture, l'amortissement induit par la faible perméabilité des parois anéantit tout effet de résonance.

Vickery [28] s'intéresse aux cas des parois flexibles et perméables (cas F, cf. figure 2.19.). L'analyse menée en régime quasi-stationnaire et pour un écoulement turbulent à travers les orifices conduit à :

$$p_i = H_1(\omega) p_1 + H_2(\omega) p_2 + H_3(\omega) p_3$$

$$H_1(\omega) = R_1 / (1 + i(\omega / \omega_c))$$

$$H_2(\omega) = R_2 / (1 + i(\omega / \omega_c))$$

$$H_3(\omega) = \frac{i R_3 (\omega / \omega_c)}{1 + i(\omega / \omega_c)}$$

avec
$$i^2 = -1$$

$$R_1 = \frac{s_1^2}{s_1^2 + s_2^2}, R_2 = \frac{s_2^2}{s_1^2 + s_2^2}, R_3 = \frac{K_a}{K_a + K_v}$$

$$\omega_c = \left(\frac{1}{(1 + K_a / K_v)} \right) \left(\frac{C_a}{\bar{U}} \right)^2 \left(\frac{\bar{U}}{L_c \sqrt{\bar{\xi} \Delta C_p}} \right) \quad (\text{II.36})$$

où :

$$\Delta C_p = \overline{C_{P_1}} - \overline{C_{P_2}}$$

$\bar{\xi}$: coefficient de perte de charge moyen. Le même pour tous les orifices.

$$L_c = \frac{V_0 s_1 s_2}{(s_1^2 + s_2^2)^{3/2}} \text{ longueur caractéristique.}$$

L'interprétation physique de ces équations est la suivante :

Les fluctuations de p_1 et p_2 ne modifient la pression interne que si leur fréquence est inférieure à la fréquence de coupure ω_c . Par contre pour p_3 , même si la fréquence est inférieure à f_c , si la paroi est rigide $\left(\frac{K_v}{K_a} \text{ grand} \right)$, les fluctuations sont amorties et ne sont pas transmises à la pression interne.

Discussion.

Bien que l'approche spectrale soit très utile pour comprendre le comportement des parois perméables, elle ne donne des résultats corrects que si le terme fluctuant est petit devant la moyenne (condition de linéarisation), ce qui n'est pas toujours le cas.

D'autre part, elle ne peut nous fournir des informations sur les valeurs des pics et leur durée. Ces deux dernières jouent un rôle primordial sur le phénomène de perte d'étanchéité à la pluie des toitures. Pour cela nous adoptons la méthode temporelle.

2.3.5. Conclusion.

L'évolution de la pression interne suit un régime quasi-stationnaire lorsque au moins l'une des conditions suivantes est vérifiée :

- la force d'inertie est faible devant celle de l'amortissement du volume (cas d'un grand volume avec petite ouverture),
- la force d'inertie est faible devant celle de la viscosité de l'écoulement à travers l'ouverture (la profondeur de l'ouverture est importante devant les dimensions de la section),

- les ouvertures en surpression sont sensiblement de même taille que celles en dépression,
- les parois ne sont pas parfaitement rigides.

Dans les cas courants des combles à toiture constituée de petits éléments sans écran en sous face, la somme des forces d'amortissement et de viscosité est deux à trois fois plus importante que la force d'inertie. Dans le cas d'une couverture à petits éléments avec écran en sous face, la 2ème et la 4ème condition sont vérifiées. Ceci conduit à considérer comme quasi-stationnaire l'évolution temporelle de la pression interne, dans les deux cas.

Le système [volume + parois perméables] représente un filtre passe-bas, dont la fréquence de coupure augmente avec :

- la diminution de volume ;
- l'augmentation de la rigidité des parois ;
- l'augmentation de la perméabilité des parois.

L'efficacité d'un écran placé en sous face, dans le but, entre autre, de limiter la pénétration de la pluie, augmente avec la fréquence de coupure du système et la perte de charge dans la lame d'air.

Dans les cas des grands volumes ou des grandes ouvertures, l'effet de flexibilité des parois sur la pression interne est négligeable.

Les modèles qui étudient l'effet sur la pression interne d'une paroi flexible sont limités aux hypothèses suivantes :

- le volume interne est unique
- la paroi flexible est imperméable à l'air

Le modèle des multi-volumes à parois flexibles et perméables est par conséquent à développer.

2.4. Démarches pratiques.

2.4.1. Les hypothèses de base.

Dans le cas d'une couverture sans écran en sous face, les hypothèses sont les suivantes :

- 1) homogénéité de la pression interne dans le comble ;

- 2) effet non négligeable de la compressibilité de l'air ;
- 3) quasi-stationnarité de l'évolution temporelle de la pression interne ;
- 4) effet insignifiant de déformation des parois.

Dans le cas d'une couverture avec écran en sous face, on distingue :

- le cas d'un écran rigide ;
- celui d'un écran souple.

Les hypothèses qui concernent le premier cas sont identiques à celle d'une couverture sans écran. Par contre, il s'agit ici d'un cas de multi-volumes, l'hypothèse d'homogénéité de pression concerne seulement chacun de ces volumes.

En revanche, dans le cas d'un écran souple, nous gardons les hypothèses 1 et 3 et nous considérons l'effet de compressibilité de l'air négligeable devant celui de la déformation des parois.

2.4.2. La méthode de travail.

L'analyse théorique précédente nous a permis de formuler les hypothèses de base d'un modèle décrivant l'évolution de la pression interne. Elle a mis en évidence le rôle primordial de la perméabilité à l'air de la couverture dans la détermination de la pression dans les combles. Les hypothèses utilisées ont été justifiées par l'expérimentation en vraie grandeur. Ceci nous a conduit à élaborer un modèle mathématique des phénomènes de transmission de pression externe à l'intérieur des combles.

L'approche expérimentale, qui constitue une grande partie de notre travail a eu également un double objectifs :

- valider le modèle mathématique ;
- étudier les paramètres d'influences sur la perméabilité à l'air d'une couverture.

La validation du modèle nécessite les mesures d'une part des coefficients de perméabilité de la couverture et d'autre part des champs de pression internes et externes.

3. MODELISATION DU CHAMP DE PRESSION INTERNE DANS LES COMBLES

3.1. Introduction

La bibliographie relative à l'évolution de la pression interne (cf. chapitre 2) traite souvent de cas particuliers, la plupart du temps éloignés de nos préoccupations.

Ce chapitre développe un modèle général de calcul de la pression interne dans une cavité, en régime quasi-stationnaire qui prend en compte la flexibilité et la perméabilité à l'air des parois ainsi que la compressibilité de l'air. Les autres hypothèses de base de ce modèle sont celles exposées au chapitre 2 :

- pression homogène à l'intérieur du volume,
- écoulement mixte et incompressible à travers la couverture.

Le modèle est ensuite adapté au cas des combles avec et sans écran en sous-face de la couverture.

3.2. Modélisation de la pression interne - Cas général.

Prenons le cas d'un volume V_0 , limité par des parois flexibles et perméables à l'air. L'équation d'état du gaz parfait nous permet d'écrire :

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{K_a}{\rho_0} \frac{d\rho_i}{dt} \quad (\text{III.1})$$

où : P_i : la pression dans le volume V_0

$\frac{1}{K_a}$: coefficient de compressibilité de l'air ; il est égal à $\frac{1}{P_0}$ pour une transformation isotherme et à $\frac{1}{\gamma P_0}$ pour une transformation adiabatique.

ρ_i : la masse volumique de l'air dans le volume V_0 qui s'écrit :

$$\rho_i = \frac{M_0 + \Delta M_0}{V_0 + \Delta V_0} \quad (\text{III.2})$$

ΔM_0 est la variation massique liée à la différence entre les débits massiques entrant et sortant :

$$M_0 + \Delta M_0 = V_0 \rho_0 + \rho_0 \int Q(t) dt \quad (\text{III.3})^1$$

A partir des équations (III.1), (III.2) et (III.3) on obtient :

$$\frac{dP_i}{dt} = K_a \frac{d}{dt} \left(\frac{V_0 + \int Q(t) dt}{V_0 + \Delta V_0} \right) \quad (\text{III.4})$$

En utilisant la notation ci-dessous, on simplifie l'écriture et l'interprétation physique de l'équation (III.4).

$\psi(t)$: le taux de variation volumique lié à la différence des débits entrant et sortant

$$\psi(t) = \frac{\int Q(t) dt}{V_0} \quad (\text{III.5})$$

$\varphi(t)$: le taux de variation volumique lié à la flexibilité des parois

$$\varphi(t) = \frac{\Delta V_0}{V_0} \quad (\text{III.6})$$

¹Nous négligeons dans ce développement la différence qui peut exister entre la masse volumique de l'air entrant ρ_e et celle de l'air sortant ρ_i , en considérant que $\rho_i \approx \rho_e \approx \rho_0$.

$$\frac{1}{K_v} = \frac{d\varphi(t)}{d(\Delta P)} \quad (\text{III.7})^2$$

avec ΔP : différence de pression de part et d'autre de la paroi flexible. Plus la valeur de l'indice de flexibilité $\left(\frac{1}{K_v}\right)$ est importante, plus l'influence de la flexibilité des parois sur la pression interne devient importante.

L'équation III.4 s'écrit alors sous la forme :

$$\frac{dP_i}{dt} = K_a \frac{Q(t)}{V_0} \left[\frac{1}{(1 + \varphi(t)) + \frac{K_a}{K_v} \left(\frac{1 + \psi(t)}{1 + \varphi(t)} \right)} \right] \quad (\text{III.8})$$

Nous distinguons trois cas particuliers :

$$1) \frac{K_a}{K_v} \ll 1$$

Dans ce cas de figure, la compressibilité de l'air dans le volume joue un rôle plus important que la déformabilité des parois. Par conséquent, cette dernière peut être négligée ($\varphi(t)$ tend vers zéro). L'équation III.8 devient alors :

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{K_a}{V_0} Q(t) \quad (\text{III.9})$$

C'est le cas des parois considérées comme parfaitement rigides.

$$2) \frac{K_a}{K_v} \gg 1$$

²L'indice $\frac{1}{K_v} = \frac{\Delta V_0}{V_0 \cdot \Delta P}$, utilisé par VICKERY [28,48], rejoint notre définition dans le cas particulier d'une relation $\Delta V_0 / \Delta P$ linéaire

La flexibilité des parois joue alors un rôle plus important. La compressibilité de l'air peut, dans ce cas, être négligée. L'incompressibilité de l'air implique :

$$\varphi(t) = \psi(t)$$

L'équation (III.8) devient alors :

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{K_v}{V_0} Q(t) \quad (\text{III.10})$$

3) Pour un volume important $\varphi(t)$ et $\psi(t)$ tendent vers zéro. L'équation (III.8) se simplifie en l'écrivant :

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{K'_a}{V_0} Q(t)$$

avec

$$\frac{1}{K'_a} = \frac{1}{K_a} + \frac{1}{K_v}$$

Si $\frac{K_a}{K_v}$ est proche de l'unité, on ne peut négliger ni la compressibilité de l'air ni la déformabilité des parois, et l'équation III.8 doit être utilisée.

Remarque : Il est à noter que dans certains cas K_v dépend $P_i(t)$ et par conséquent du temps t .

3.3. Cas d'un comble avec couverture sans écran en sous face.

L'absence de l'écran représente un risque plus important du point de vue de la qualité de l'étanchéité à l'eau de la toiture.

3.3.1. Hypothèses et notations.

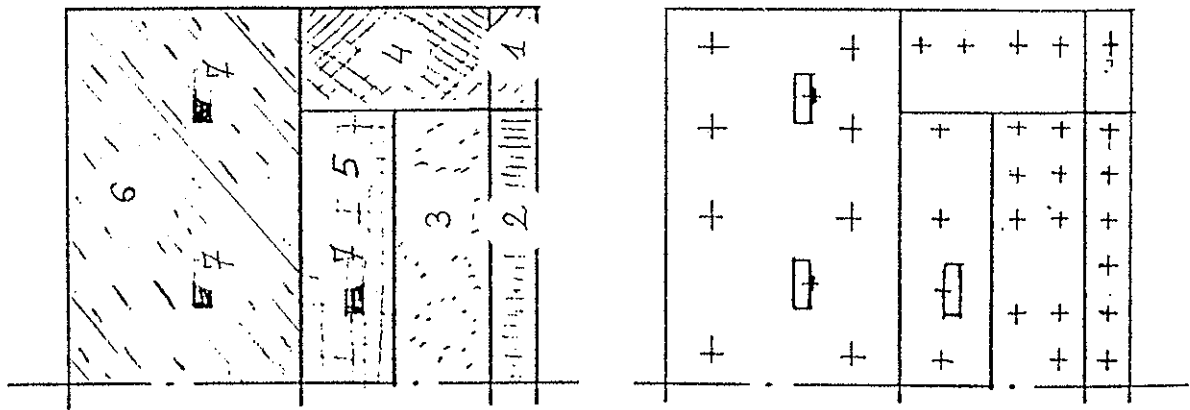
Le comble constitue un seul volume limité par des parois perméables à l'air.

L'effet de flexibilité des parois sur l'évolution de la pression interne est négligeable; la justification étant la suivante :

- absence de parois facilement déformables ;
- en présence d'un grand volume, la valeur de $\frac{1}{K_v}$ est petite.

Pour tenir compte d'une perméabilité à l'air spécifique à chaque zone de l'enveloppe du comble (en contact avec l'extérieur) et de la variation spatiale du champ de pression externe, nous avons été amenés à :

- découper l'enveloppe en N_e éléments à perméabilité uniforme, dont les coefficients sont $C(i)$ et $N(i)$;
- découper chaque élément (i) , à son tour, en N_x surface élémentaires $S(i, j)$, sur laquelle la pression externe $P_e(i, j)$ est quasi-homogène (cf. figure 3.1)



$$[NS] = [1, 6, 9, 4, 3, 8, 3]$$

a) Principe de découpage en zones à perméabilité uniforme ($N_e = 7$)

(b) Principe de découpage de chacune des zones en petite surface à pression externe uniforme

Figure 3.1. : Notations

Le débit volumique traversant la surface perméable $S(i, j)$ est exprimé par :

$$Q(i, j) = C(i)S(i, j) \frac{P_e(i, j) - PI}{|P_e(i, j) - PI|^{(1-N(i))}} \quad (\text{III.11})$$

où PI est la pression interne dans le volume du comble.

Note : L'existence de chatières dans une paroi peut être prise en compte en retirant la surface de la chatière (ou des chatières) de celle de la paroi et en la définissant comme un élément de paroi de coefficients de perméabilité spécifiques (théoriquement $C(i) = 0.65$, $N(i) = 0.5$) (cf. figure 3.1. élément 7).

3.3.2. Mise en équations.

L'évolution de la pression interne pour les conditions de rigidité, données par hypothèse, est :

$$\frac{dPI}{dt} = \frac{K_a}{V_0} \sum_i^{N_e} \sum_j^{N_e} Q(i, j) \quad (\text{III.12})$$

$Q(i, j)$ définie dans l'équation (III.11).

La valeur de $PI(t)$ est obtenue par la résolution numérique de l'équation différentielle non linéaire (III.12) et en tenant compte des conditions aux limites.

3.3.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites portent d'une part sur les valeurs des pressions externes $P_e(i, j)$ appliquées aux parois externes à chaque instant t et d'autre part sur la valeur de la pression interne initiale au temps $t = t_0$.

Nous supposons qu'au temps initial t_0 , l'écoulement est stationnaire. Ceci s'exprime mathématiquement par :

$$\left(\frac{dPI}{dt} \right)_{t=t_0} = 0 \quad (\text{III.13})$$

Ce qui revient à écrire :

$$\sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_s} C(i)S(i,j) \frac{P_e(i,j,t_0) - PI(t_0)}{|P_e(i,j,t_0) - PI(t_0)|^{(1-N(i))}} = 0 \quad (\text{III.14})$$

3.3.4. Résolution numérique.

La pression initiale $PI(t_0)$ est obtenue en résolvant l'équation algébrique III.14 non linéaire en PI par la méthode de Newton.

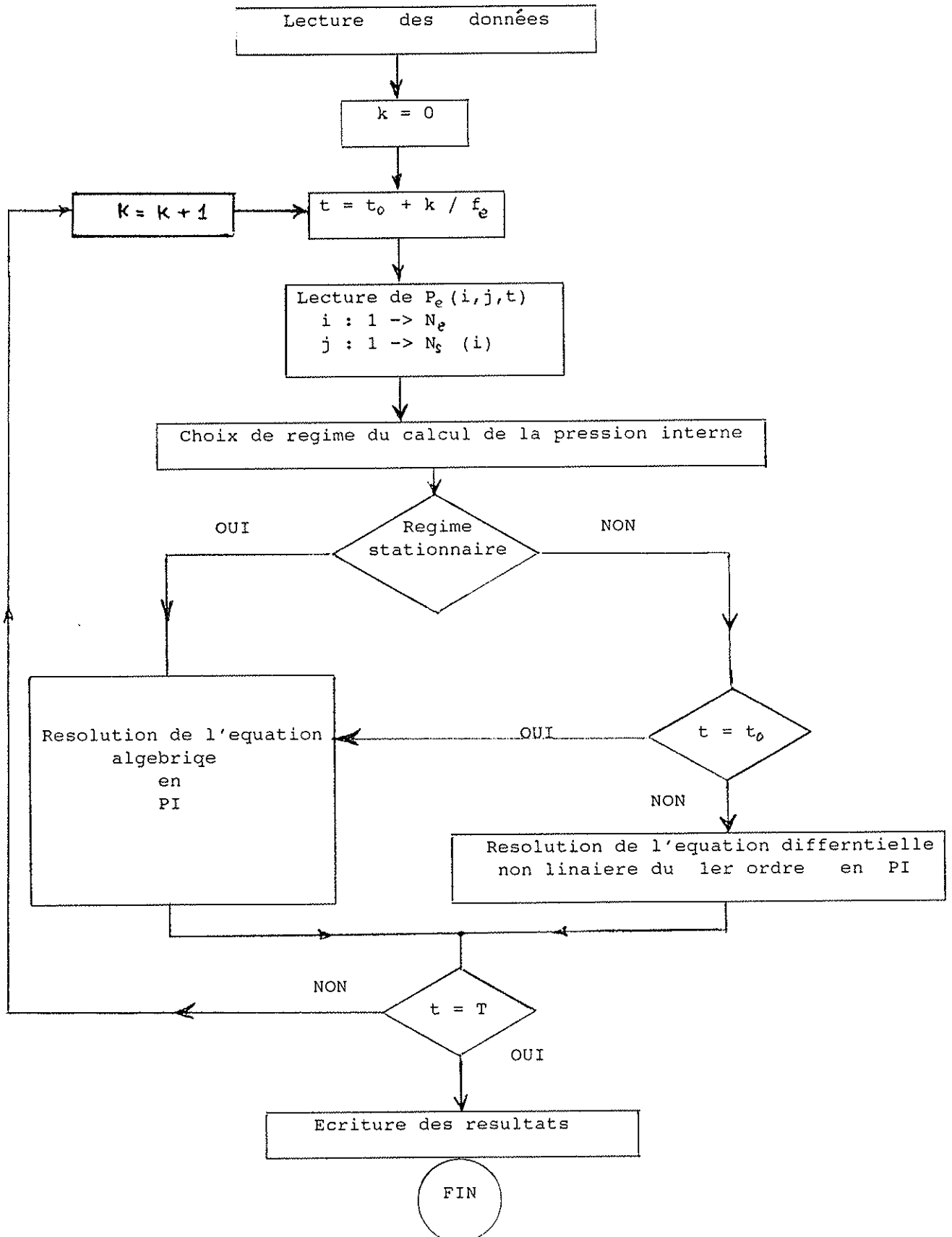
La pression interne $PI(t)$ est obtenue en résolvant l'équation III.12 qui peut s'écrire pour un intervalle de temps infiniment petit :

$$\frac{dPI(t)}{dt} = \frac{PI(t_2) - PI(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (\text{III.15})$$

$$PI(t_2) = PI(t_1) + (t_2 - t_1) \frac{K_a}{V_0} \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_s} C(i)S(i,j) \frac{P_e(i,j,t_1)}{|P_e(i,j,t_1) - PI(t_1)|^{(1-N(i))}} \quad (\text{III.16})$$

3.3.5. Procédure du calcul

Organigramme du programme principal PICOMBLE.



3.4. Cas d'un écran en sous face de la couverture

3.4.1. Introduction

Dans le cas d'une couverture constituée de petits éléments, l'écran est fixé sur des chevrons à l'aide des contre-liteaux (figure 3.2.). Les éléments de fixation découpent la lame d'air en petites cavités. L'écran peut être rigide ou souple. Dans les deux configurations, il est perméable à l'air (annexe 1).

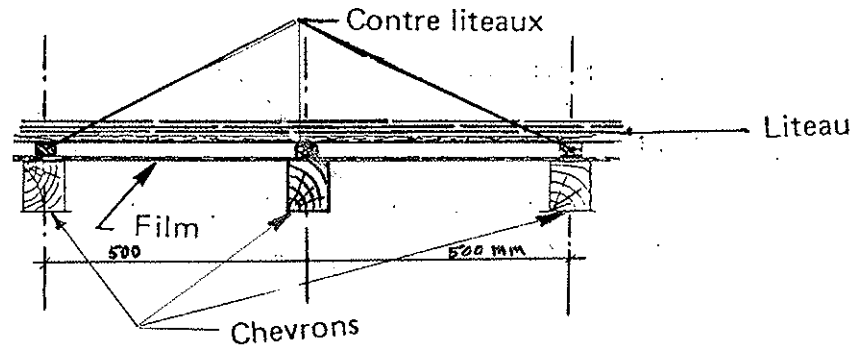
3.4.2. Hypothèses et notations

Hypothèses théoriques

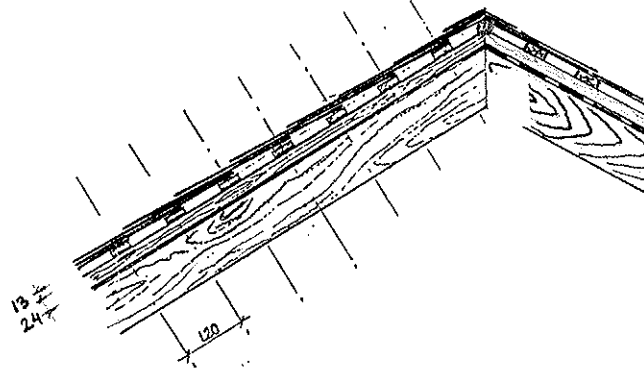
L'approche théorique consiste à considérer une pression, homogène à l'intérieur de chaque cellule, différente de celle du cellule voisin et à négliger pour un écran souple la compressibilité de l'air et pour un écran rigide la déformation volumique.

Hypothèses pratiques

Le paragraphe fait référence à la figure 3.2. qui représente une configuration type. Dans l'exemple, la pression établie dans la lame d'air s'équilibre rapidement dans la direction parallèle aux contre-liteaux car les sections ouvertes sont grandes et les pertes de charge faibles. Ceci n'est pas le cas dans la direction transversale. La pression dans le volume limité par deux contre-liteaux successifs peut être en conséquence considérée comme homogène.



a) coupe transversale aux contre-liteaux



b) coupe parallèle aux contre-liteaux

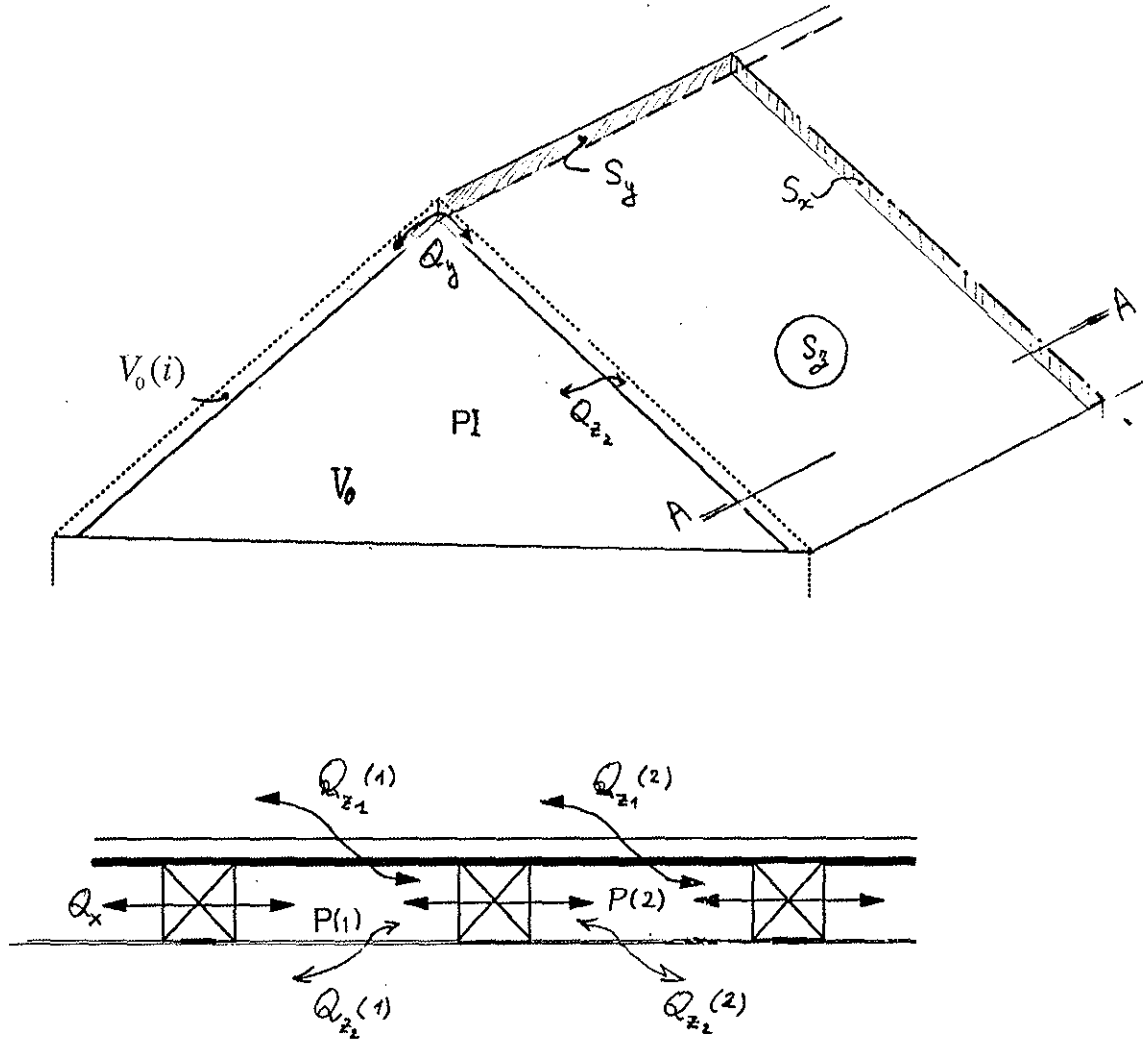
Figure 3.2. : Montage type de l'écran

Notations

La figure 3.3. montre les notations utilisées.

Le volume interne est composé de deux volumes principaux : celui du comble V_0 , et celui de la lame d'air. Ce dernier est découpé, à son tour, en N_m mailles (deux rangés de N_{mx} mailles). Le volume d'une maille $V_0(i)$ est délimité par deux contre-liteaux (S_x : la surface de contact entre les deux mailles voisines suivant la longueur), la fermeture au faîtage (S_y : la surface de contact entre les deux mailles de pentes opposées suivant y), l'écran (S_z : la surface de contact entre la maille et le comble) et la couverture ($S(i) = S_z$).

Pour tenir compte de l'évolution spatiale de la pression externe, la surface $S(i)$ est découpée en petites surfaces, sur lesquelles la pression externe peut être considérée uniforme.



Coupe A-A

V_0 : volume du comble

$V_0(i)$: volume de la maille (i)

V_{Tot} : le volume total

$$V_{Tot} = V_0 + \sum_{i=1}^{N_m} V_0(i)$$

N_m = nombre de mailles

Figure 3.3. : Notations.

3.4.3. Equations de base

Cas d'un écran souple :

A partir de l'équation de conservation de masse et en tenant compte de l'hypothèse d'incompressibilité de l'air et de la déformation volumique, nous écrivons pour chaque volume i :

$$Q(i) = \frac{d(\Delta V_0(i))}{dt} \quad (\text{III.18})$$

où $Q(i)$ est la somme algébrique des débits volumiques traversant les parois du volume (i) (donné dans l'équation III.20).

(+) pour un débit entrant le volume

(-) pour un débit sortant du volume

L'application de l'équation III.18 sur le volume du comble revient à écrire :

$$\sum_{i=1}^{N_m} Q_{z_1}(i) = 0 \quad (\text{III.19})$$

où $Q_{z_1}(i)$ est le débit volumique traversant la couverture, entre l'extérieur et la maille i (cf. figure 3.3.)

Cas d'un écran rigide :

L'évolution de la pression interne dans chaque volume (i) est obtenue par la résolution de (III.9) appliquée à chacun des volumes (le terme $Q(t)$ est remplacé par $Q(i, t)$ qui est donné par l'équation III.20 (voir paragraphe suivant)).

3.4.4. Calcul de $Q(i,t)$

Les circulations d'air à l'intérieur de la lame d'air s'effectuent selon les 3 axes x , y et z (cf. figure 3.3.).

$$Q(i) = Q_{z_1}(i) + Q_{z_2}(i) + Q_x(i) + Q_y(i) \quad (\text{III.20})$$

$Q_{z_1}(i)$: écoulement à travers la couverture. Il s'écrit de la même façon qu'au cas précédent (équation III.11) en remplaçant PI (la pression dans le comble) par $P(i)$ la pression dans la maille (i) .

$Q_{z_2}(i)$: écoulement à travers l'écran de la maille i vers le comble. Il s'écrit sous la forme :

$$Q_{z_2}(i) = \frac{C_o S_z [PI(t) - P(i,t)]}{|PI(t) - P(i,t)|^{(1-N_o)}} \quad (\text{III.21})$$

où : C_o, N_o : coefficients de perméabilité à l'air de l'écran.

$Q_x(i)$: écoulement transversal aux contre-liteaux.

$$Q_x(i) = C_x S_x \frac{\Delta P_x}{|\Delta P_x|^{(1-N_x)}} \quad (\text{III.22})$$

où ΔP_x est la différence de pression entre deux mailles voisines selon l'axe x , le sens de débit étant pris en compte ; C_x, N_x sont les coefficients de perméabilité à l'air entre les mailles selon l'axe x .

$C_x = 0.3, N_x = 0.5$ (écoulement turbulent) dans l'exemple de la figure 3.2.

$Q_y(i)$: écoulement entre les deux versants.

$$Q_y(i) = C_y S_y \frac{\Delta P_y}{|\Delta P_y|^{(1-N_y)}} \quad (\text{III.23})$$

où ΔP_y : la différence de pression entre deux mailles voisines selon l'axe y, le sens de débit étant pris en compte ;

C_y, N_y : coefficients de perméabilité à l'air entre les mailles selon l'axe y (au niveau du faîtage).

Dans la suite nous nous intéresserons au développement des équations (III.18) et (III.19) (correspondant au cas d'écran souple) jusqu'à la résolution numérique.

3.4.5. Calcul de la variation volumique de la maille (i) $[\Delta V_0(i)]$

Dans une première approche nous considérons :

- la vitesse et l'accélération de l'écran comme étant négligeables ;
- la pose de l'écran est tendu : absence de flèche au repos sous l'action de la gravité.

L'écran est soumis à une charge uniformément répartie compte tenu de l'homogénéité de pression dans la lame d'air au niveau d'une maille et dans le volume du comble. Cette charge (pression statique) est perpendiculaire à la surface de l'écran à chaque instant t . Si l'on néglige la rigidité de l'écran aux efforts tranchants et celle de flexion nous concluons que :

- la déformée de l'écran au temps t est un arc de cercle de rayon $R(t)$ et de mesure $2\Phi(t)$ où $\Phi(t)$ est la tangente de la déformée à l'appui (cf. figure 3.4.).

$$R(t) = \frac{L_0}{2\Phi(t)} \left(1 + \frac{\Phi^2(t)}{6} \right)$$

$$\text{avec : } \Phi(t) = \left(\frac{3 \cdot \Delta P(t) \cdot L_0}{E \cdot e_0} \right)^{1/3} \text{ [radian] ;}$$

où : $\Delta P(t) = P(i, t) - P_I(t)$;

L_0 : la distance entre chevrons [m] ;

E : module d'Young du matériau constituant l'écran [Pa] ;

e_0 : l'épaisseur de l'écran [m].

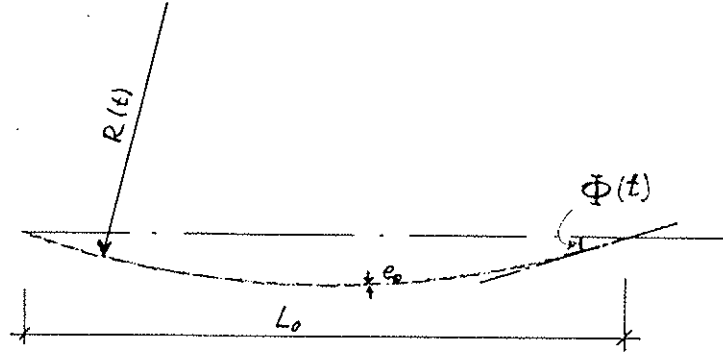


Figure 3.4. : Déformée de l'écran.

- le volume $\Delta V_0(i, t)$, entre la surface de la déformée de l'écran et sa position initiale s'exprime par :

$$\Delta V_0(i, t) = A[P(i, t) - PI(t)]^{1/3} \quad (\text{III.24})$$

avec :

$$A = \frac{BL_0^2}{6} \left(\frac{3L_0}{E \cdot e_0} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Où B est la longueur du versant

$$\frac{1}{K_v(i, t)} = \frac{A}{3V_0(i)} [P(i, t) - PI(t)]^{\frac{2}{3}} \quad (\text{III.25})$$

L'indice de flexibilité $\frac{1}{K_v}$ augmente avec la distance entre chevrons (L_0) et diminue lorsque l'épaisseur de l'écran (e_0) ou le module d'Young (E) de son matériau ou l'épaisseur de la lame d'air augmente.

3.4.6. Formulation du système d'équation

De l'équation (III.24) et (III.25) la dérivée de $\Delta V_0(i, t)$ par rapport au temps s'écrit :

$$\frac{d\Delta V_0(i, t)}{dt} = \frac{V_0(i)}{K_v(i, t)} \left(\frac{dP(i, t)}{dt} - \frac{dPI(t)}{dt} \right) \quad (\text{III.26})$$

L'équation III.18 devient alors :

$$\frac{dP(i,t)}{dt} - \frac{dPI(t)}{dt} = \frac{Q(i,t)}{V_0(i)} K_v(i,t) \quad (\text{III.27})$$

En remplaçant les expressions $Q(i, t)$ et $K_v(i, t)$ par leurs valeurs nous obtenons :

$$\dot{P}(i) - \dot{P}I = F_1(P(i), PI, P(i_1), P(i_2)...) \quad (\text{III.28})$$

où $P(i_1), P(i_2)...$: les pressions dans les mailles voisines à la maille i selon les deux directions x et y .

La formule de base (III.19) $\left(\sum_{i=1}^{N_m} Q_{z_i} = 0 \right)$ s'écrit par une fonction F_2 qui dépend des pressions internes dans toutes les mailles et du champ de pression externe (conditions aux limites).

$$F_2(P(1), P(2), \dots, P(N_m)) = 0 \quad (\text{III.29})$$

3.4.7. Conditions aux limites

Les conditions aux limites concernant d'une part le champ de pression externe à chaque instant t (données expérimentales par exemple) et d'autre part les valeurs initiales du champ de pression interne au temps $t = t_0$

Nous supposons qu'au temps initial t_0 , la déformation de l'écran n'est pas en évolution. D'où :

$$\left(\frac{d(\Delta V_o(i))}{dt} \right)_{t=t_0} = 0 \quad (\text{III.30})$$

Le système de $(N_m + 1)$ équations algébriques non linéaires s'écrit alors :

$$Q(i, t_o) = 0 \quad (\text{III.31})$$

$$i : 1 \text{ à } N_m$$

$$\sum_{i=1}^{N_m} Q_{z_i}(i, t_o) = 0 \quad (\text{III.32})$$

3.4.8. Adaptation informatique

Reformulation des équations.

Le système d'équations à résoudre présenté dans le paragraphe 3.4.6. est constitué de (N_m) équations différentielles du 1er ordre (III.28) et d'une équation algébrique (III.29).

Pour pouvoir résoudre ce système à l'aide d'un sous programme de la bibliothèque mathématique, il est plus commode d'exprimer l'équation (III.29) sous forme différentielle :

$$\sum_{i=1}^{N_m} Q_{z_i}(i, t) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_m} Q_{z_i}(i, t_0) = 0 & \text{(III.33A)} \\ \sum_{i=1}^{N_m} \frac{\partial Q_{z_i}(i, t)}{\partial P(i)} \dot{P}(i) = 0 & \text{(III.33B)} \end{cases}$$

L'équation (III.33A) est prise en compte dans les conditions aux limites (paragraphe 3.4.7). L'équation (III.33B) est donc équivalente à (III.29) au temps $t > t_0$.

En remplaçant $\dot{P}(i)$ dans l'équation (III.33B) par sa valeur donnée dans (III.27), $\dot{P}I$ s'écrit sous la forme :

$$\dot{P}I = \frac{\sum_{i=1}^{N_m} \frac{K_v(i).Q(i)}{V_0(i)} \frac{\partial Q_{z_i}}{\partial P(i)}}{\sum_{i=1}^{N_m} \frac{\partial Q_{z_i}}{\partial P(i)}} \quad \text{(III.34)}$$

Changement de variables.

En effectuant le changement de variables suivant :

$$Y(i) = PI - P(i) \Rightarrow \dot{P}(i) - \dot{P}I = -\dot{Y}(i) ;$$

$$i : 1 \rightarrow N_m$$

$$Y(N_m + 1) = PI \Rightarrow \dot{P}I = \dot{Y}(N_m + 1) ;$$

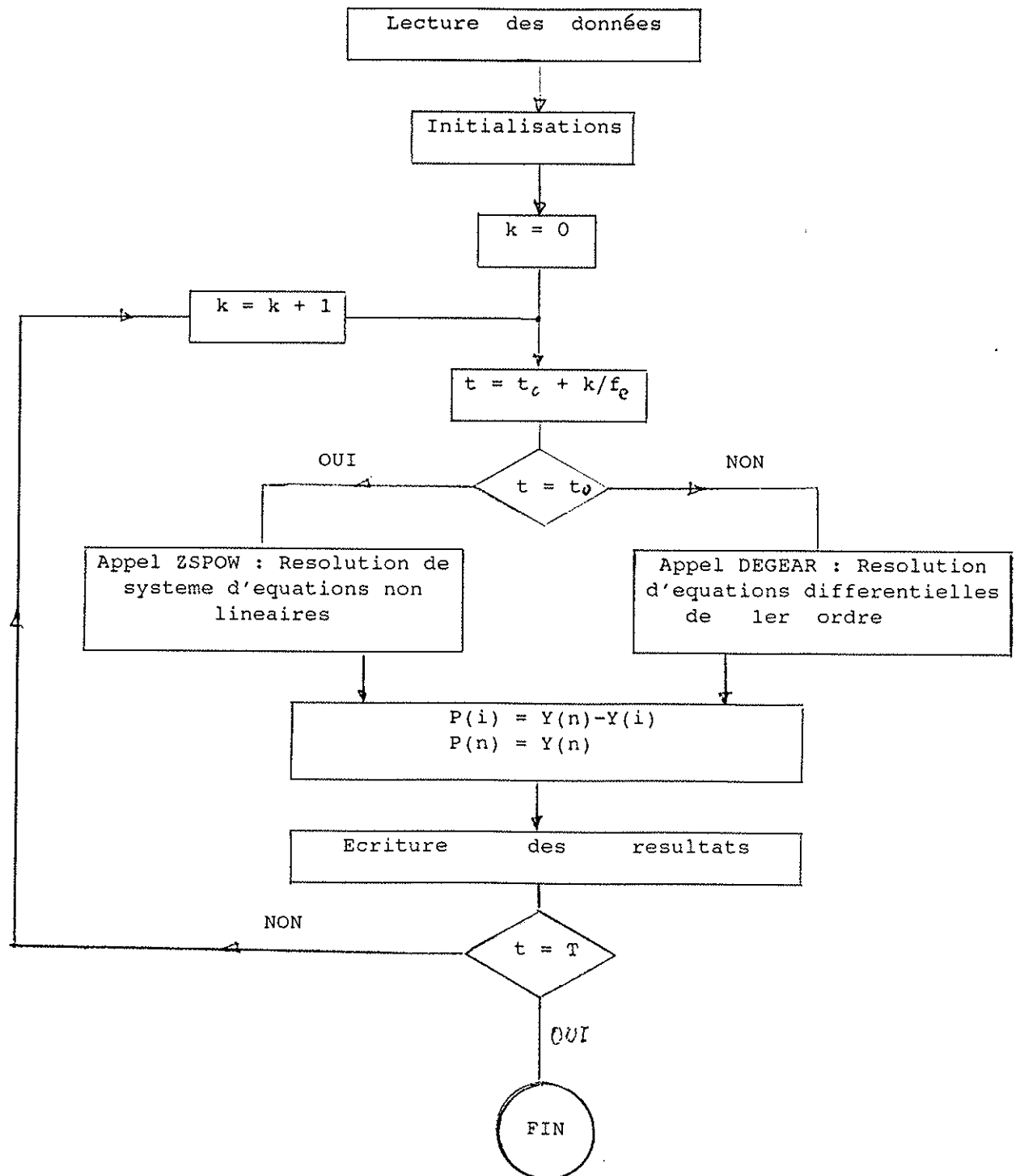
le système d'équations différentielles devient d'une résolution plus facile.

3.4.9. Procédure de résolution

1. Lecture et stockage des données.
2. $t = t_0$
3. Calcul des valeurs initiales de $Y(i)$. Ensuite nous passons à la procédure 5.
4. Calcul de $Y(i)$ au temps t .
5. $P(i) = Y(N_m + 1) - Y(i) \quad i = I \rightarrow N_m$
 $PI = Y(N_m + 1)$
6. Stockage des résultats.
7. $t = t + \Delta t$
8. Si t est inférieur à la durée totale de calcul T , répéter les opérations (4) à (8).

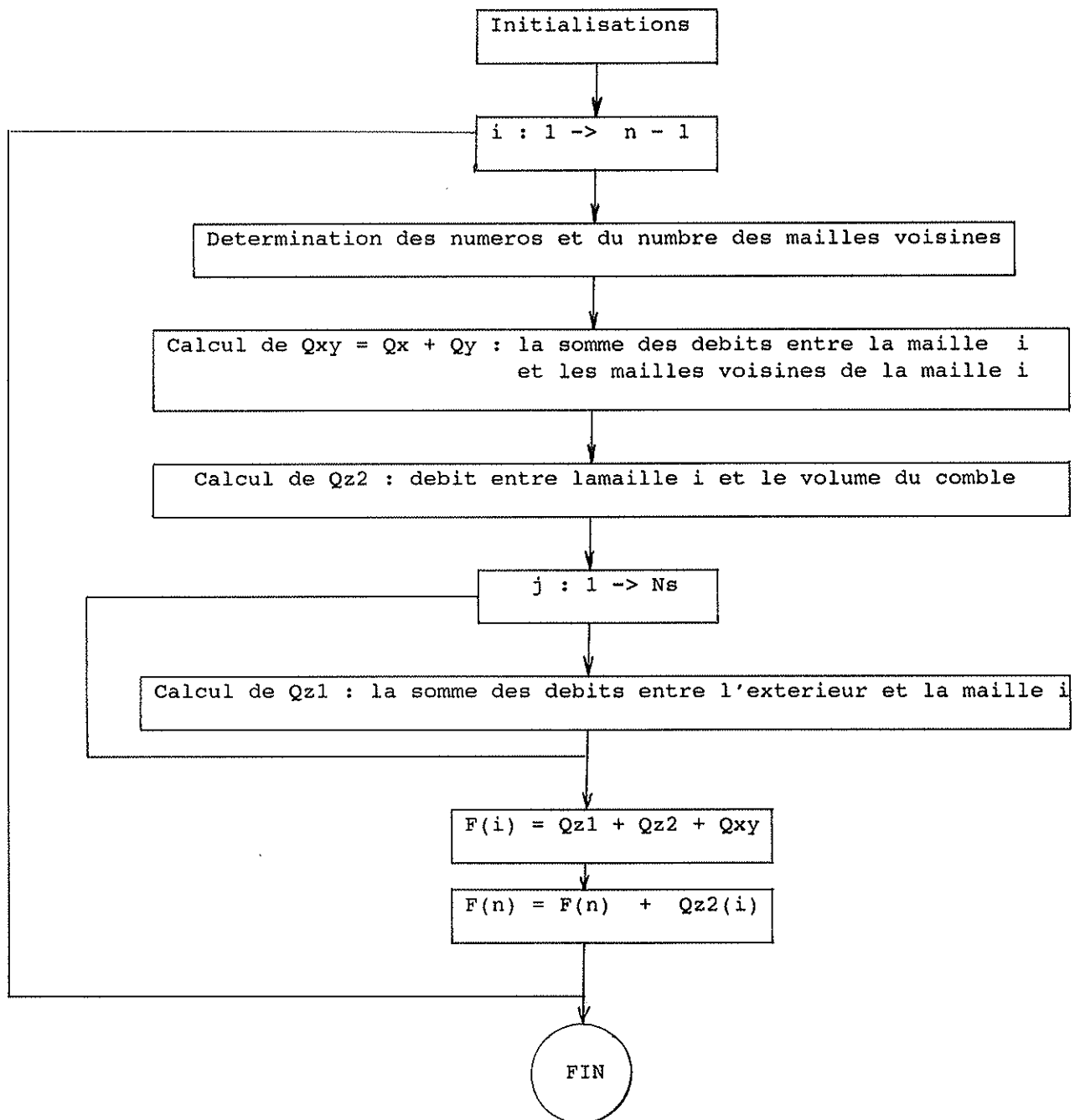
Organigrammes

Organigramme du programme principal : ECRANS



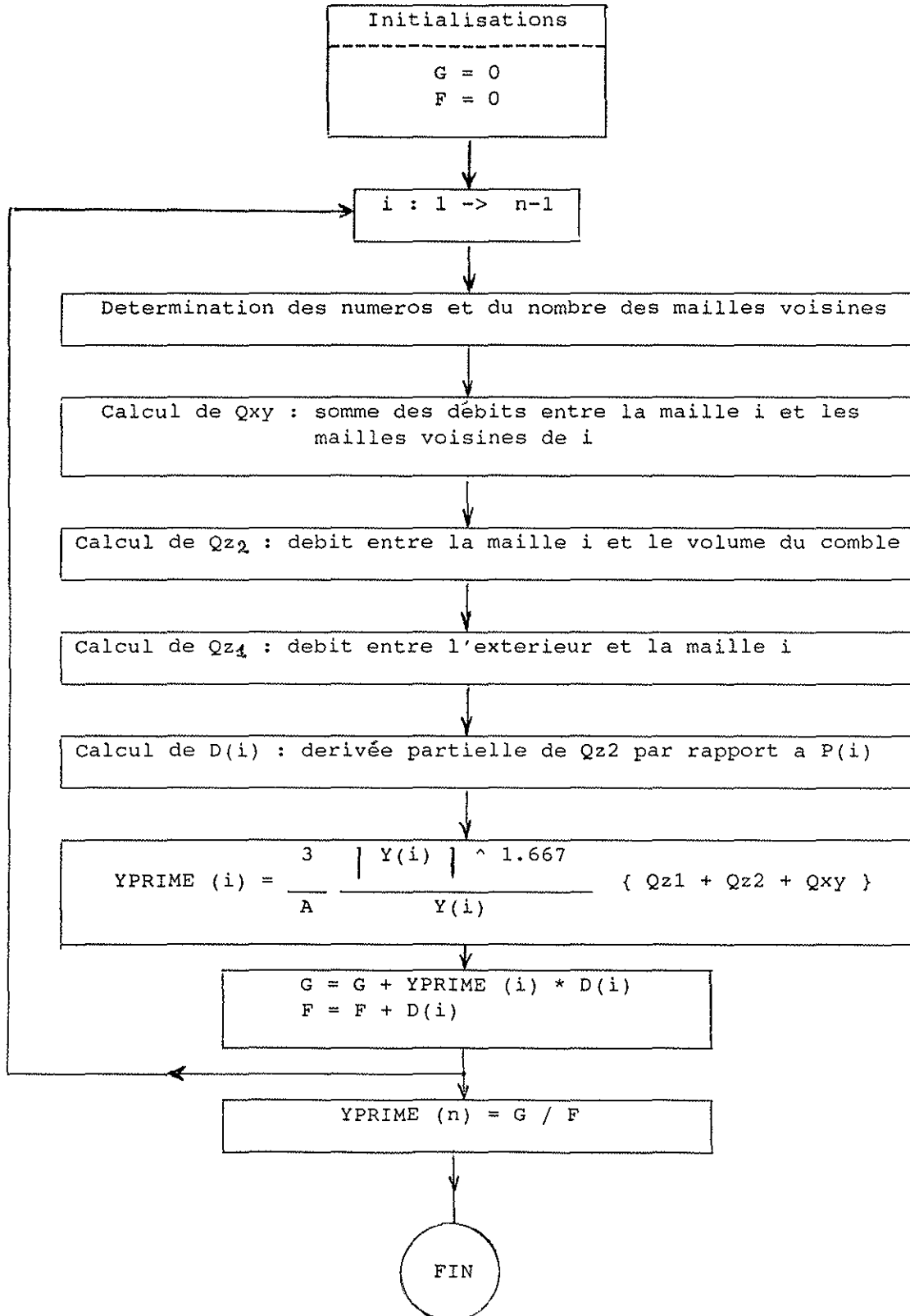
Organigramme de DEBIT.

Le sous programme DEBIT calcul $Q(i, t)$ et $\sum_{i=1}^{N_m} Q_{z_i}(i, t)$ au temps (t) . Il est utilisé comme sous programme pour la résolution numérique des équations (III.31) et (III.32).



Organigramme de FPRIME

Le sous programme FPRIME calcul au temps t les valeurs de $\dot{Y}(i,t)$ [où $i = 1 \rightarrow N_m + 1$]. Il est utilisé comme sous programme dans la résolution numérique des équations (III.28) et (III.34).



3.5. Conclusion

Nous avons développé au cours de ce chapitre une équation générale qui prend en compte à la fois la compressibilité de l'air et la déformabilité des parois. Cette équation tend vers la solution proposée par VICKERY et BLOXHAM [48] dans le cas particulier d'un grand volume et d'une déformation linéaire de volume avec la pression (cf. paragraphe 2.3.2). Elle tend également vers la solution proposée en [52] dans le cas particulier d'une paroi flexible imperméable à l'air (cf. paragraphe 2.3.3).

De cette analyse découle deux modèles mathématiques. L'un [PICOMBLE] concerne le calcul de la pression interne dans les combles en absence d'un écran en sous-face de la couverture. L'autre [ECRANS] concerne le calcul des pressions internes dans les cellules créées par la présence d'un écran (souple ou rigide) en sous-face de la couverture.

Le modèle [PICOMBLE] est basé principalement sur les hypothèses d'homogénéité de la pression interne fluctuante, et de rigidité des parois limitant le volume. La dernière hypothèse nous apparaît très justifiée tenant compte du volume important des combles et de la faible portée des poutres principales de soutien de la couverture. L'hypothèse d'homogénéité est validée expérimentalement dans le chapitre 4.

Une évaluation de ces deux modèles est nécessaire, ce qui fait le sujet des chapitres suivants.

4. ASPECT METROLOGIQUE.

4.1. Introduction

Une validation expérimentale du code de calcul des pressions internes dans le comble est indispensable. Celle ci sera réalisée en plusieurs étapes :

- vérification expérimentale des hypothèses de base, et des intervalles où elles sont valides,
- mesure des coefficients de perméabilité à l'air de la couverture,
- mesure des champs de pression externe et interne.

Les coefficients de perméabilité à l'air et le champ de pression externe constituent les données d'entrée.

La mesure de la pression interne est nécessaire pour effectuer la comparaison avec la pression calculée.

Le phénomène de transmission de la pression à travers les couvertures ne peut être modélisé qu'à l'échelle 1 (influence du nombre de Reynolds). Par conséquent toutes nos mesures ont été effectuées en vraie grandeur (site réel, soufflerie climatique et banc d'essai). L'essentiel de nos travaux expérimentaux ont été effectués en veine environnement de la soufflerie climatique, dont les caractéristiques sont exposées dans l'annexe 2.

Ce chapitre est consacré aux précautions métrologiques et plus particulièrement au choix de la chaîne de mesure de pression. Nous exposerons ensuite le type d'expérimentations effectuées avec pour objectif la vérification expérimentale des hypothèses.

Les mesures qui concernent la perméabilité à l'air de la couverture et les champs de pression externe et interne sont exposées au chapitre 5.

4.2. Les mesures

Quel que soit le lieu d'essai (soufflerie ou site réel) les mesures effectuées concerneront les mêmes variables temporelles :

- la vitesse et la direction du vent,
- les pressions externes et internes

Les figures 4.1. et 4.2. visualisent respectivement les outils de mesures et leur organisation.

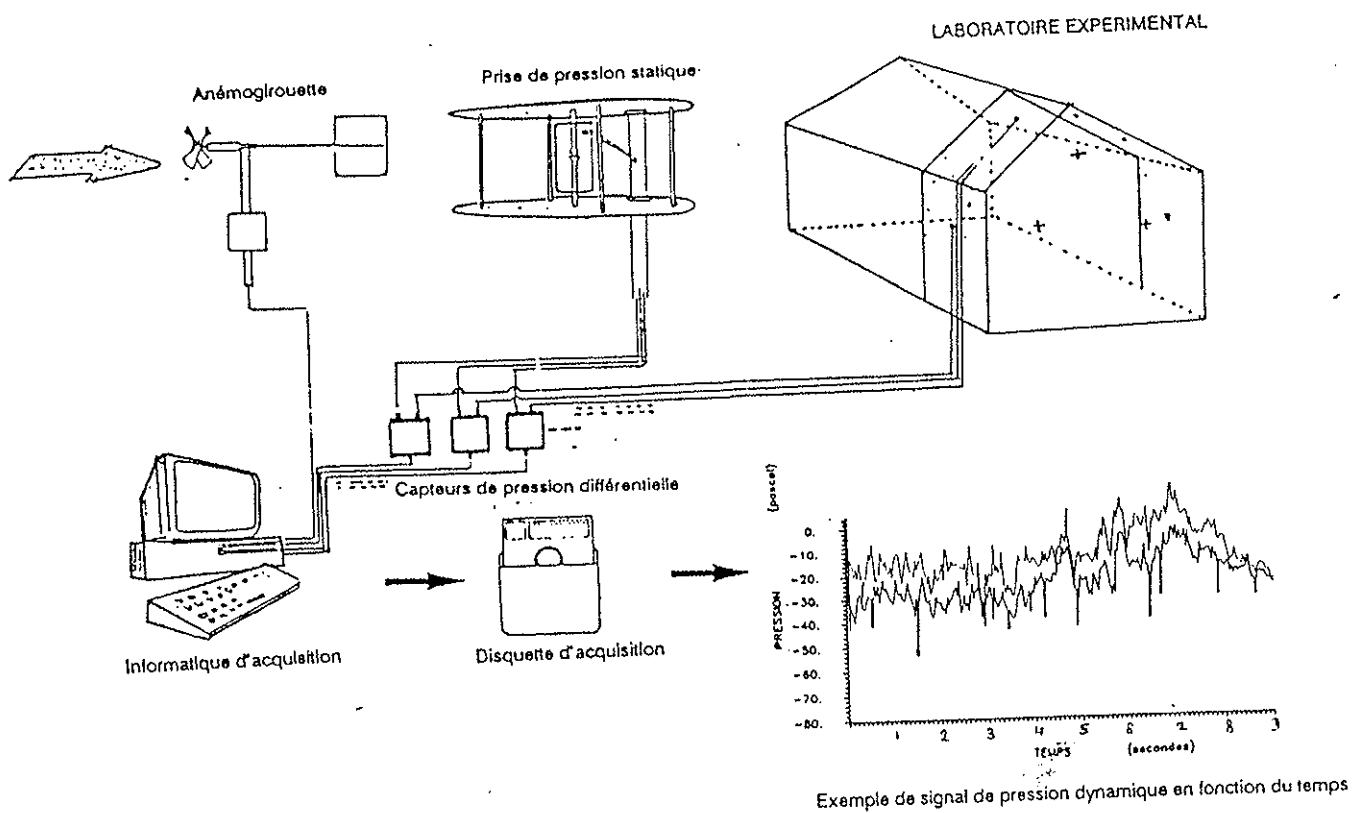


Figure 4.1. : Schéma expérimental d'acquisition en vraie grandeur

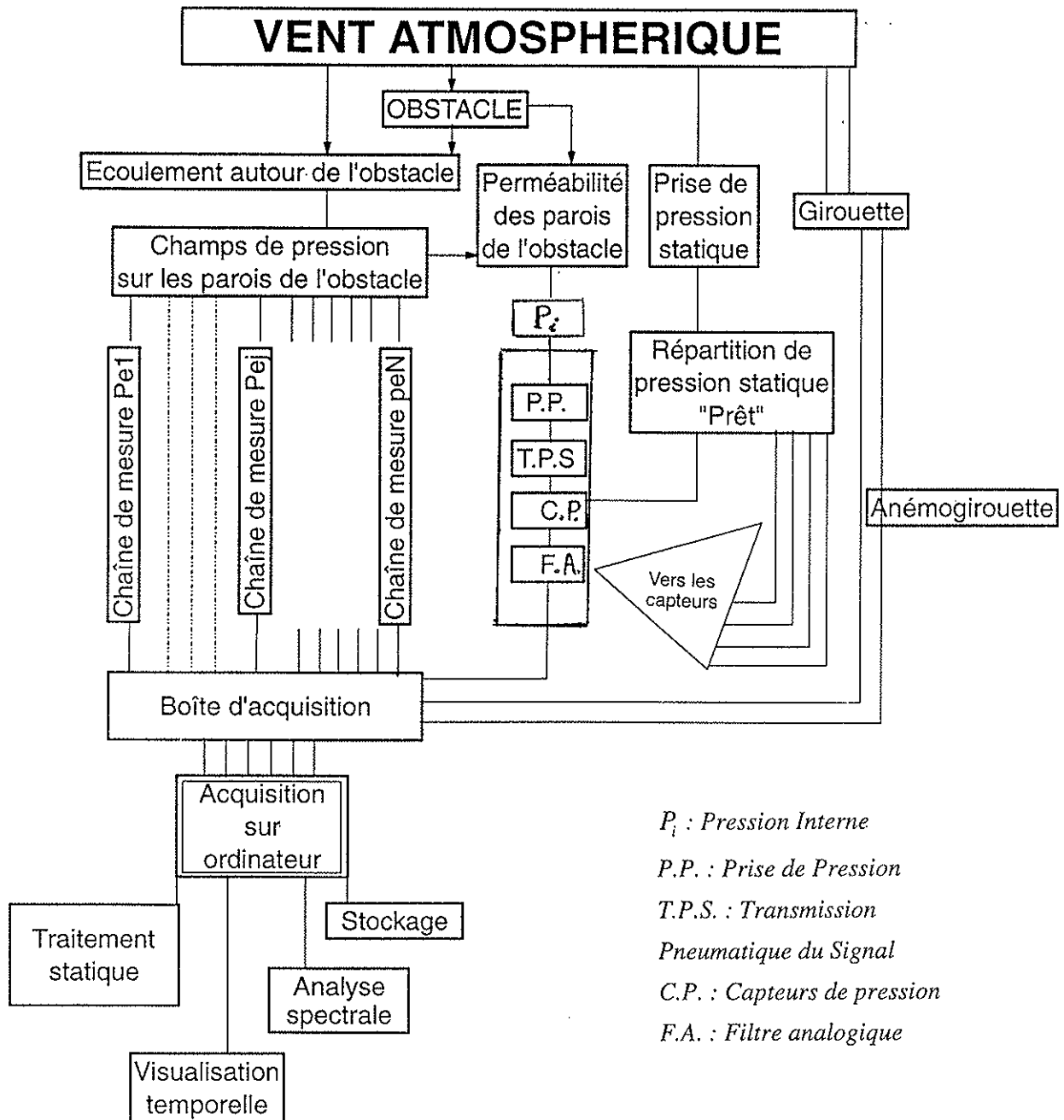


Figure 4.2. : Organigramme de mesure.

Notre objectif est de minimiser l'erreur de mesure de pression. Cela peut être réalisé par le bon choix de chacun des éléments de la chaîne de mesures : prise de pression, transmission pneumatique, capteur et filtre analogique (figure 4.3.). Ce choix suppose une connaissance préalable du signal à mesurer, en particulier vis à vis des gammes de fréquence et d'amplitude.

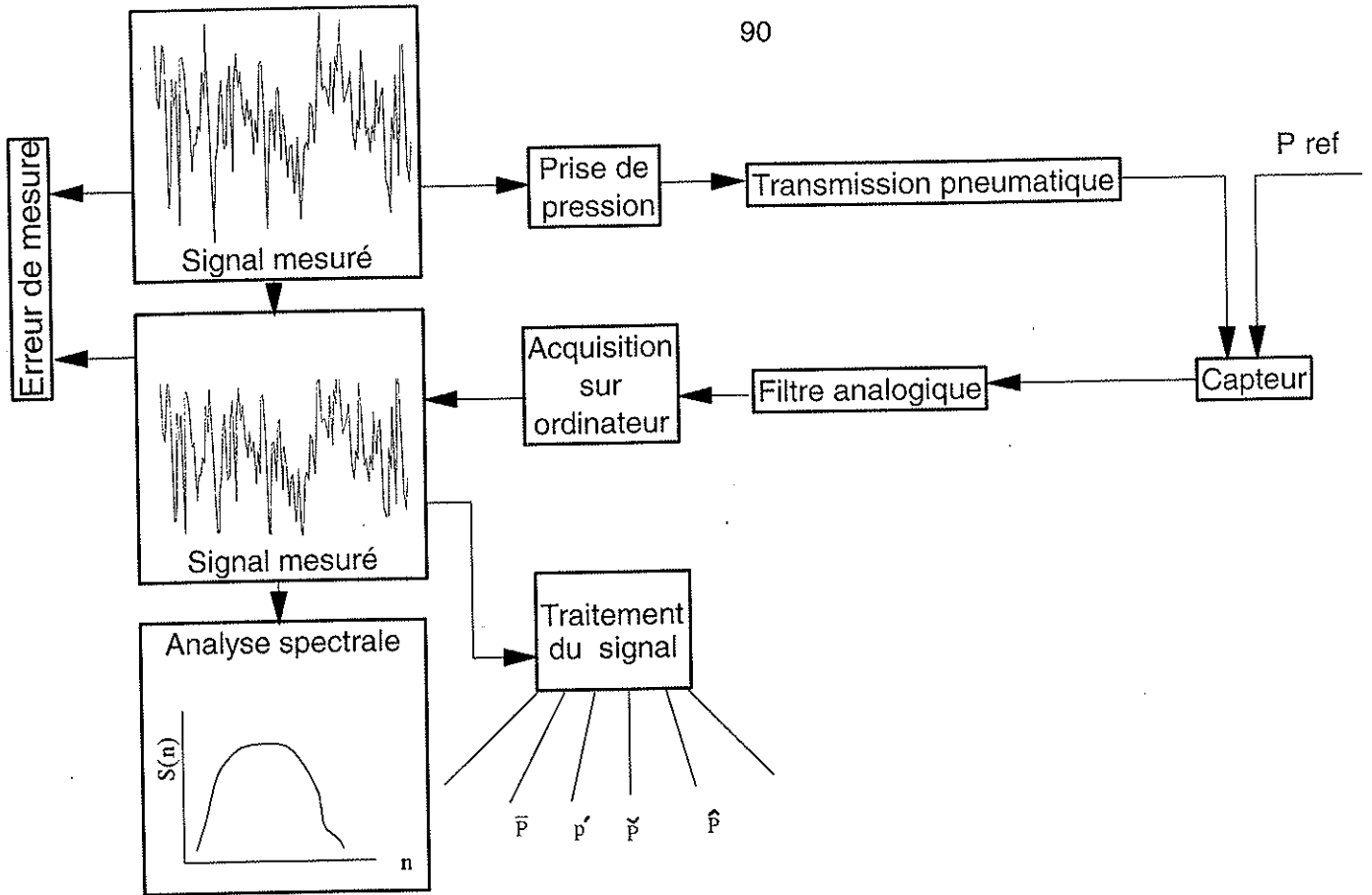


Figure 4.3. : Chaîne de mesure de pression.

Au cours du 1er chapitre, nous avons exposé quelques notions théoriques et expérimentales du champ de pression externe se développant sur un toit. On a pu mettre en évidence que la gamme des fréquences s'étendait des hautes fréquences dans les zones de décollement et de recollement (paragraphe 1.2.1.). Ceci ne nous permet pas pour autant de définir la fréquence limite f_M (où $S(f_M)$ tend vers zéro), une analyse expérimentale étant indispensable.

Dans ce but nous avons mené une campagne de mesures en vraie grandeur (exposée en annexe 3). L'analyse de ces mesures préliminaires montre que la gamme des fluctuations des pressions sur le toit de la maison expérimentale, dans la zone de décollement et de recollement, est de $[0, 15]$ Hz, et que les valeurs de pics peuvent atteindre 625 Pa pour une vitesse moyenne de vent de 20m/s (cf. annexe 3).

4.3. Chaîne de mesure de pression - Aspects métrologiques

4.3.1. Prises de pression

- Prise de pression externe :

Pour éviter la déformation du signal au niveau de la prise de pression, celle-ci doit être fixée sur la surface sans perturber l'écoulement externe.

La figure 4.4. montre quelques exemples de prises de pression ; uniquement (b) et (c) sont conseillées [58, 59], la prise (a) perturbe l'écoulement externe et (d) par son inclinaison induit une gamme d'erreur supérieur à (b) (cf. figure 4.5.). Notre choix s'est porté sur le type (c) vu sa facilité de fixation.

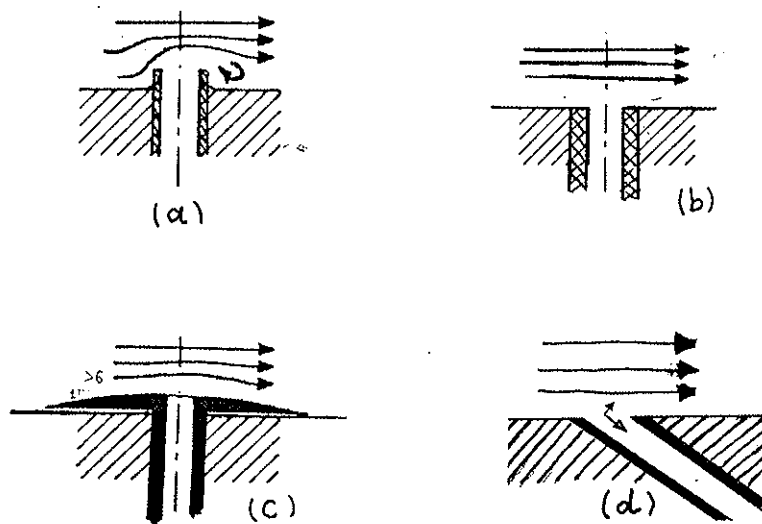


Figure 4.4. : Différentes formes de prise de pression.

Le choix du diamètre interne est contraignant à double titre :

- plus le diamètre est grand moins il y a de risque que la prise soit bouchée par les poussières ou par l'eau de pluie ,
- plus le diamètre est petit plus l'erreur de mesure de pression est faible (figure 4.5.).

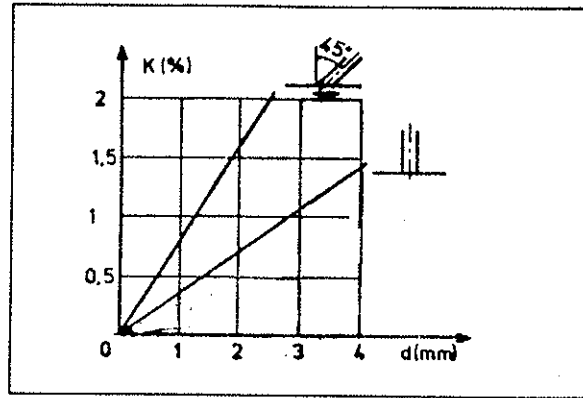


Figure 4.5. : Erreur due au diamètre de la prise de pression [59]
(diamètre de référence : 0.1 mm).

Notre choix ne peut par conséquent être qu'un compromis. Un diamètre de 5 mm donne d'une part une erreur de mesure relative sur la pression inférieure à 2 % (cf. figure 4.5.) et d'autre part une garantie pour que l'orifice ne soit pas bouché par l'eau ou la poussière durant l'acquisition.

- Prise de pression statique.

Elle est constituée, comme le montre la figure 4.6. de deux disques placés horizontalement de façon à ne pas perturber l'écoulement.

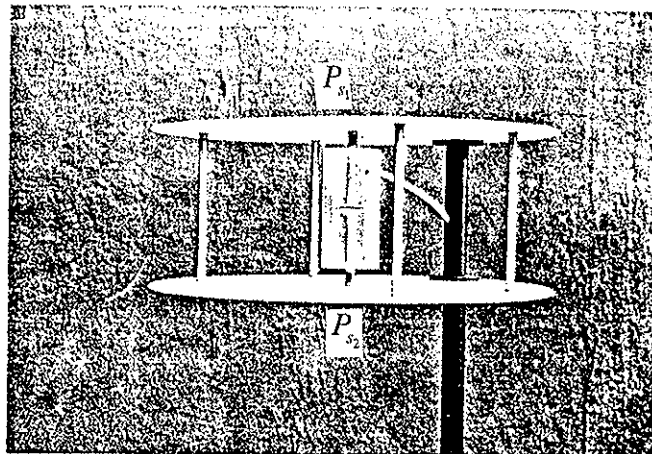


Figure 4.6. : Prise de pression statique.

Les deux pressions mesurées P_{s_1}, P_{s_2} sont moyennées et ramenées dans une chambre de stabilisation isolée thermiquement. La prise statique est associée à une perte de charge constituée par un tuyau de 1 mm de diamètre et 1 m de longueur suivi par une grande longueur de tuyau de 3 mm de diamètre. La pression obtenue est peu sensible aux fluctuations de la vitesse de vent et à sa composante verticale [60]. La figure 4.7. montre la faible fluctuation de la pression statique mesurée.

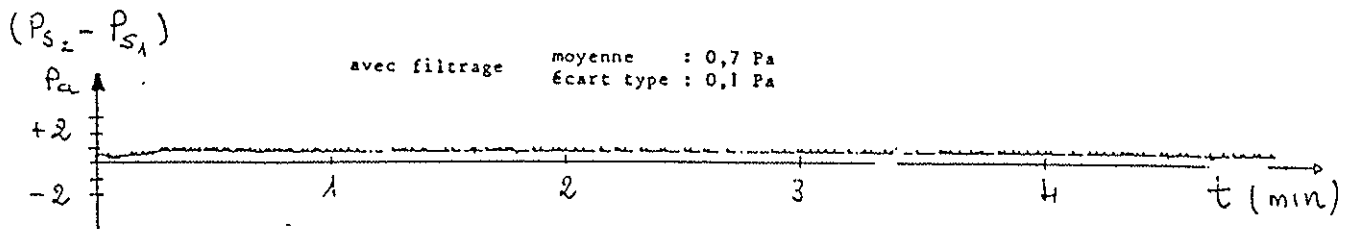


Figure 4.7. : Pression statique stabilisée par filtrage pneumatique [60].

4.3.2. Transmission pneumatique du signal - Réponse dynamique.

Pour assurer une bonne reproduction du signal source, il faut des réponses dynamiques plates en amplitude, un déphasage linéaire et identique pour toutes les voies, dans la gamme des fréquences intéressantes pour les mesures [58, 61, 62].

Choix optimal du diamètre et de la longueur du tuyau.

Plusieurs facteurs interviennent pour orienter notre choix :

- 1/ les grandes dimensions de la maison, nécessitent l'utilisation de longueurs supérieures à 4 m.
- 2/ la présence éventuelle de pluie en cours de mesures impose un diamètre minimal de 3 mm.
- 3/ les pertes de charge (fonction de $\frac{L}{D}$) et l'amortissement du signal (fonction de $\frac{L}{D^4}$) associent une longueur maximale au diamètre minimal.

L'étalonnage dynamique du tuyau (diamètres intérieur 3 mm, extérieur 5 mm) de longueur 10 m effectué au CSTB [60], montre une fréquence de coupure (- 3 dB) à 6 Hz. Nous avons utilisé le même type de tuyau avec différentes longueurs, comprises dans la gamme [4 , 8] m, pour effectuer cet étalonnage dont un exemple des résultats est présenté sur la figure 4.8.

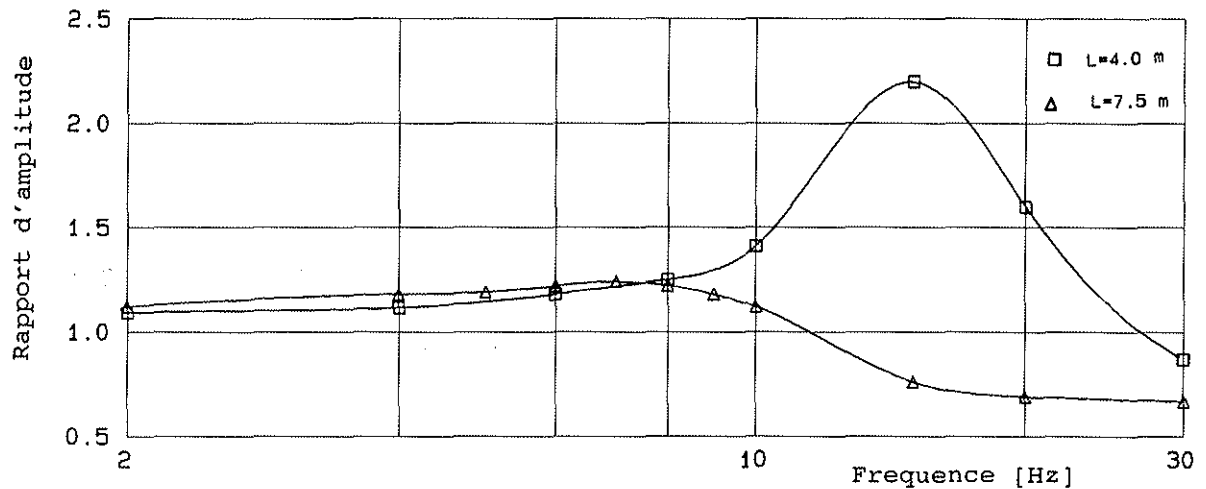


Figure 4.8. : Exemples de résultats de l'étalonnage dynamique des tuyaux.

En se basant sur la gamme [0 , 15] Hz, retenue pour nos mesures, nous choisissons $L = 4$ m. Une telle longueur de tuyau amplifie le signal entre 8 et 25 Hz, c'est pourquoi on utilise des restricteurs, solution proposé par plusieurs études [58, 62, 63, 64, 65, 66, 67], qui corrigent le signal entre 8 et 15 Hz et éliminent toute résonance acoustique.

La longueur, le diamètre et la position du restricteur sont des facteurs déterminants dans la réponse dynamique de l'ensemble [63]. La figure 4.9. montre la position optimale du restricteur en fonction de sa longueur.

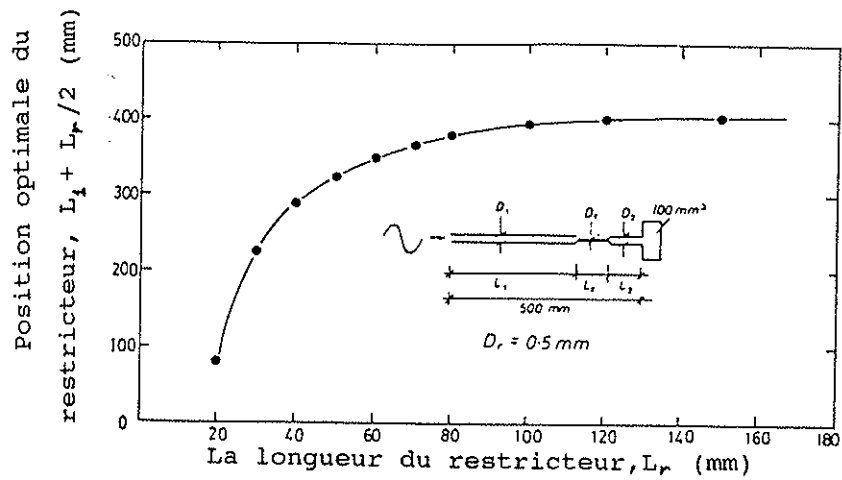


Figure 4.9. : La position optimale du restricteur en fonction de sa longueur
 ($D_r = 0.5 \text{ mm}$, $D_1 = D_2 = 1.5 \text{ mm}$) [63].

Nous avons utilisé un restricteur en laiton de diamètre interne 1 mm, en testant différentes longueurs L_r , le choix définitif a été pour une longueur de 35 mm.

Dans notre cas la longueur totale du système pneumatique est comme dit de l'ordre de 4 m. Vu la faible longueur du restricteur par rapport à la longueur totale ($L_1 + L_r + L_2$), la position optimale de restricteur est à proximité de l'entrée du signal ($L_1 \ll L_2$) (cf. figure 4.9.). La figure 4.10. montre les résultats d'étalonnage de ce système comparé aux autres choix.

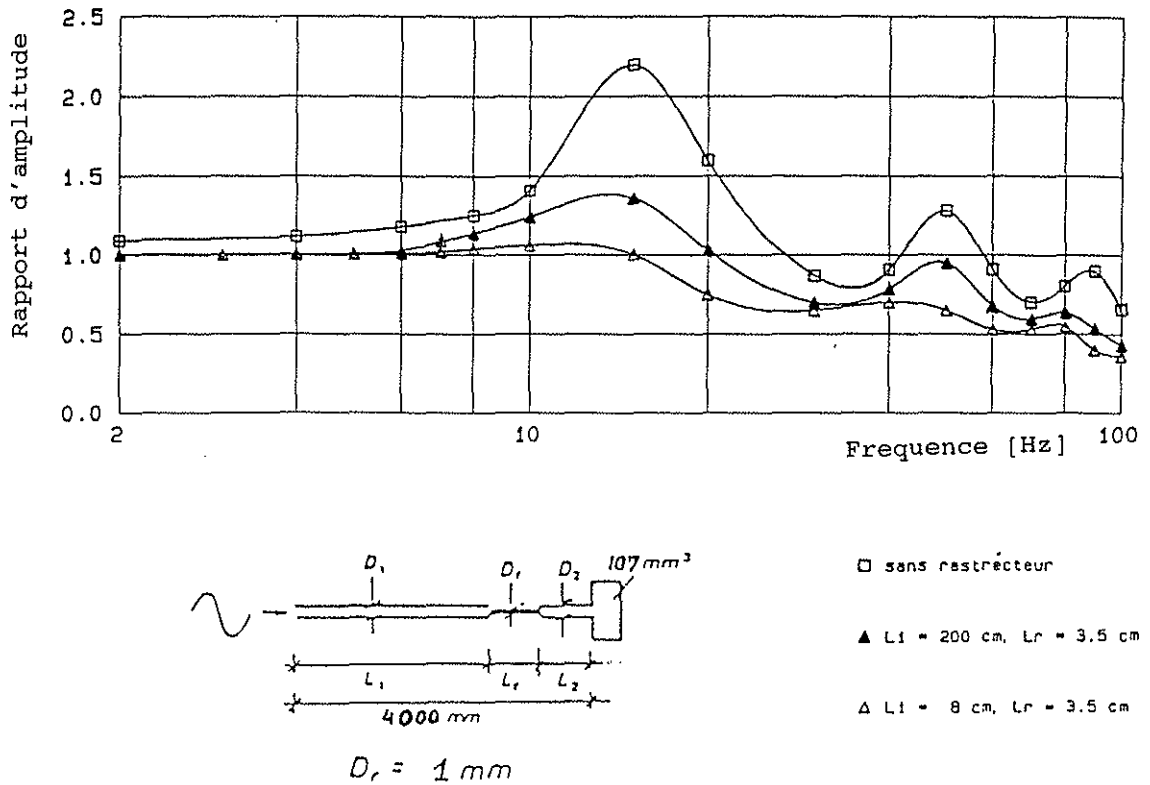


Figure 4.10. : L'effet de la position du restricteur sur la réponse dynamique du système pneumatique.

4.3.3. Capteurs de pression

- Choix du type de capteur

Le capteur devra répondre aux impératifs suivants :

- passer la composante continue de la pression,
- avoir une bonne linéarité et une réponse en fréquence supérieure à celle du tuyau,
- avoir une gamme de $\pm 700 \text{ Pa}$ pour la pression externe et $\pm 60 \text{ Pa}$ pour la pression interne.

Dans le choix des capteurs existants (transformateur différentiel, piézo-électrique, capacitifs ...), seuls les capteurs capacitifs à fréquence porteuse répondent à tous nos impératifs [60]. Ils permettent en particulier les mesures en continu. Nous avons donc utilisé des capteurs Setra 239 et Furness FCO 40. Leurs caractéristiques principales sont indiquées au tableau 4.1.

	Mesure de la pression externe		Pour le mesure de pression interne
CAPTEURS	SETRA 239	FURNESS FCO 40	SETRA 239
gamme de pression	± 700 Pa	± 1000 Pa	± 70 Pa
tension de sortie	± 7 V	± 10 V	± 3.5 V
dérive thermique	< 0.01 %/K	0.04 %/K	< 0.01 %/K
bande passante	réponse rapide ($< 10^{-3}$ s)	$[0, 40]$ Hz	réponse rapide
précision de la mesure	mieux que 1 % P.E.	mieux que 1 % P.E.	mieux que 1 % P.E.
coefficient de transfert volt $\rightarrow$ Pa	100	100	20

Tableau 4.1. : Caractéristiques des capteurs

Étalonnage statique

L'étalonnage statique est effectué au moyen d'un étalon de pression Texas Instrument, modèle 156, utilisé en générateur. La courbe d'étalonnage est donnée sur la figure 4.11.

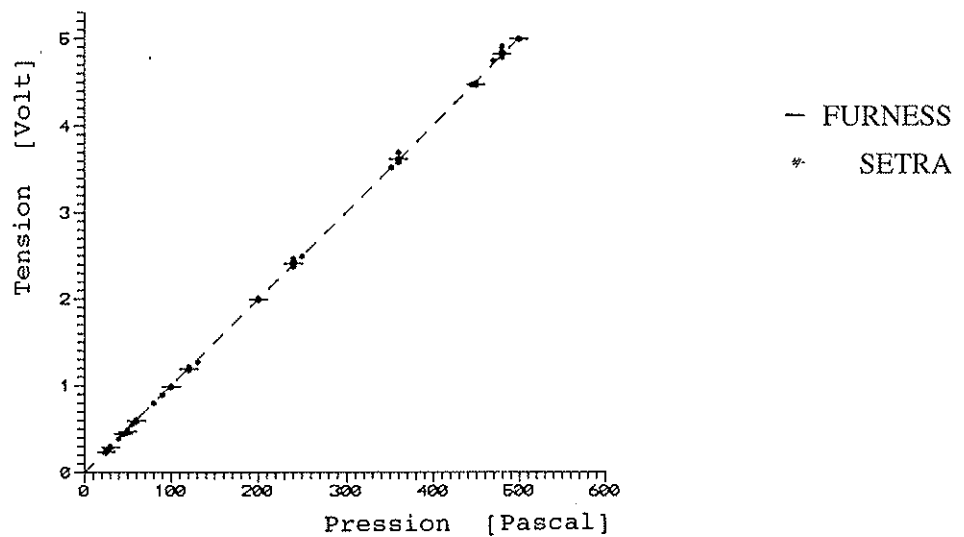


Figure 4.11. : Réponse statique des différents capteurs et FURNESS et SETRA:
Coefficient de transfert Volt $\rightarrow$ Pascal égal à 100.

4.3.4. Les filtres

Un certain nombre de phénomènes physiques d'origines diverses peut venir interférer avec le phénomène aérodynamique étudié. C'est pourquoi, il est impératif de filtrer le signal mesuré avant de le traiter. Des filtres passe-bas sont utilisés dans ce but. La fréquence de coupure f_c doit être égale ou supérieure à la fréquence limite f_M , pour laquelle le signal à mesurer n'a plus d'énergie (dans notre cas $f_M \in [10, 20]$ Hz, f_c est fixé à 15 Hz) (cf. annexe 3).

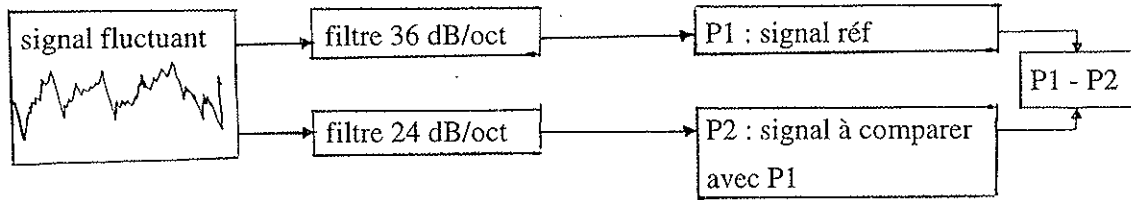
Les filtres, dont le CSTB dispose, sont de type Butterworth $\left(|H(f)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2N}} \right)$. Le

tableau 4.2. donne les valeurs de f_c , N et les nombres de filtres.

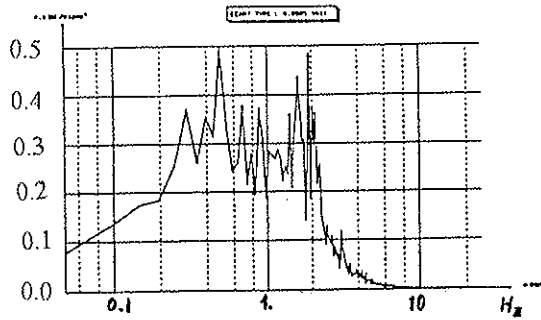
	f_c [Hz]	l'exposant N	Pente de la coupure [dB/oct]	nombre	type
série 1	réglable [1 - 256]	8	48	8	filtres passe-bas Butterworth $ H(f) ^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2N}}$
série 2	réglable [1 - 256]	4	24	10	
série 3	15	6	36	12	

Tableau 4.2. : Caractéristiques des filtres dont le CSTB dispose.

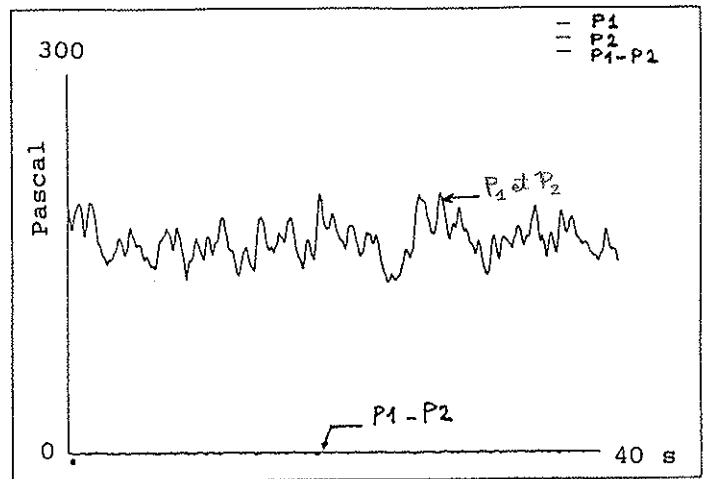
L'utilisation de deux filtres à pentes de coupure différentes induit un déphasage de la fréquence. Nous avons étudié l'effet de ce déphasage sur le signal mesuré tel que le schématise la figure 4.12.



(a) : Schéma de test des filtres 24 dB/oct et 48 dB/oct par rapport à 36 dB/oct.



(b) : Spectre du signal mesuré P1



(c) : Visualisation des signaux P_1 , P_2 et $P_1 - P_2$ (P_1 , P_2 apparaissent confondus à l'échelle de la figure)

Figure 4.12. : Test des filtres 48 dB/oct et 24 dB/oct.

Le signal $[P1 - P2]$ est dans la gamme $[- 1.5, + 1.5]$ Pa tandis que P1 fluctue dans la gamme $[130, 200]$ Pa, cela nous permet d'estimer à $\pm 1 \%$ l'erreur de mesure induite par l'utilisation des filtres ayant des pentes de coupures différentes.

4.3.5. Etalonnage de la chaîne

Après avoir choisi tous les éléments de la chaîne de mesure, nous avons effectué un étalonnage dont les résultats sont présentés dans la figure 4.13.

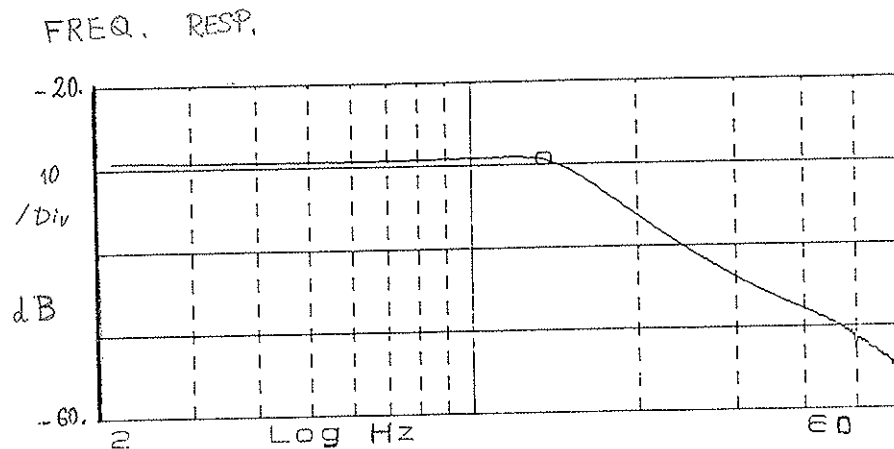


Figure 4.13. : La réponse dynamique de la chaîne (en amplitude).

4.3.6. Conclusions opérationnelles

Erreur de mesure.

L'erreur maximum de mesure peut être estimée en sommant les erreurs dues à chacun des éléments de la chaîne de mesure, soit 5 %. Vu que l'erreur de mesure induite par les capteurs est un pourcentage de sa gamme (pleine échelle), il est bien évident que l'erreur relative augmente lorsque la pression mesurée diminue. C'est pour cela que les mesures effectuées en présence de vent fort sont plus correctes que celles faites par vent faible.

Précautions à prendre

Dans le but de faciliter l'interprétation des résultats, une fiche a été établie pour chaque essai. Dans ces fiches, ils y figurent les croquis des branchements, l'état des capteurs et des tuyaux, ainsi que toutes remarques concernant les incidents éventuellement détectés, par exemple: perturbations électriques, oscillations des tuyaux, tuyau pincé, voie bouchée...

4.4. Définition des paramètres d'acquisition

L'acquisition s'est faite à l'aide du logiciel ASYST. Les mesures sont stockées par blocs ; chaque bloc représente 256 enregistrements.

Choix de la fréquence et de la durée de l'acquisition.

Le signal réel à mesurer $P(t)$ est d'énergie finie dans la bande $[0, f_M]$ où $f_M \approx 15$ Hz. Pour que la reconstitution du signal puisse être possible sans perte d'information il faut que la fréquence d'échantillonnage f_e soit supérieure ou égale à la fréquence de Nyquist (ou de Shannon) soit $2f_M$:

$$f_e \geq 2f_M$$

La durée d'acquisition T doit être au minimum d'environ 300 secondes (paragraphe 1.2.1 page 4). D'autre part la durée T et la fréquence f_e subissent la contrainte de taille du fichier qui ne doit pas dépasser la capacité maximum de stockage d'une disquette (actuellement de 1.3 MO).

Le tableau 4.3. donne, selon le nombre des voies, la fréquence d'échantillonnage maximale et le nombre de blocs pour avoir une durée d'acquisition de 600 s, au titre d'exemple, et une possibilité de stockage sur une disquette de 1.3 MO.

nombre des voies	10	16	20	24	28	32
nombre des blocs	284	158	140	110	100	76
[Hz] fréquence d'échantillonnage	120	66	60	46	40	32

Tableau 4.3. : Le nombre de blocs et la fréquence d'échantillonnage maximale pour assurer une durée T de 600 s et possibilité de stockage sur disquette 1.3 MO.

4.5. Optimisation du maillage

Lorsque la distance entre les points de mesure est infiniment petite, les mesures obtenues sont parfaitement représentatives des variations spatiales de la pression $P(M,t)$. Dans la pratique, le nombre de points de mesure est limité.

Estimation de la distance optimale entre deux points de mesures :

Prenons deux points espacés par la distance (d) et deux tourbillons de tailles différentes (figure 4.14.). Le tourbillon A, de petite taille, est caractérisé ainsi par une fréquence élevée. La taille du tourbillon B est du même ordre que la distance d .

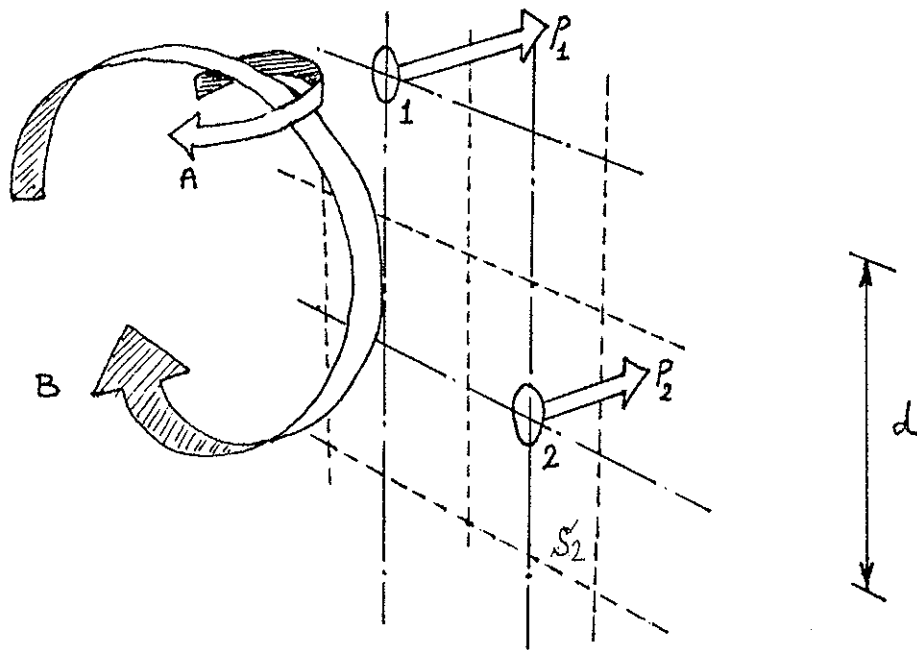


Figure 4.14. : Effet de la taille des tourbillons A et B sur les valeurs $P_1(M_1,t)$ et $P_2(M_2,t)$.

A l'instant (t) le tourbillon A influe sur la valeur P_1 mesurée, tandis qu'il n'a aucune influence sur P_2 . Le tourbillon B influe sur P_1 et P_2 au même instant mais de façon différente (P_1 augmente, P_2 diminue).

La distance d maximale séparant deux prises de pression est conditionnée par la taille λ du plus petit tourbillon, dont l'effet nous intéresse. Entre autre λ est proportionnel à $\frac{\bar{U}}{f_c}$ (où f_c est la fréquence de coupure et $\bar{U}$ est la vitesse moyenne). La taille maximale de la maille est, en conséquence, liée à la fréquence de coupure (f_c) et à la vitesse moyenne de l'écoulement.

Si la maille est trop grande par rapport à la taille des tourbillons, on donne trop d'importance aux fluctuations à hautes fréquences observées aux points de mesure. Or, en réalité leurs effets résultants s'annulent en les moyennant sur toute la surface.

Si la maille est trop petite les informations sont redondantes : le tourbillon agit de la même façon et simultanément sur plusieurs mailles adjacentes.

Par conséquent la taille de maille adaptée est dans la gamme :

$$0.1 \frac{\bar{U}}{f_c} \leq d \leq 0.5 \frac{\bar{U}}{f_c} \quad (\text{IV.1})$$

Exemple :

$$f_c = 15 \text{ Hz}$$

$$\bar{U} \approx 15 \text{ m/s}$$

$$0.1 \text{ m} < d < 0.5 \text{ m}$$

4.6. Vérification expérimentale des hypothèses

Le modèle théorique du calcul de pression interne dans les combles en absence d'écran en sous face de la couverture est basé sur certain nombre d'hypothèses :

- champ de pression interne homogène,
- évolution de la pression interne quasi-stationnaire.

Dans le but de vérifier ces deux hypothèses et déterminer leurs gammes de validation, 2 séries de mesures ont été effectuées en vraie grandeur.

4.6.1. Description des expériences.

Les caractéristiques géométriques du laboratoire utilisé (laboratoire de Bouin) sont décrites en annexe 3.

La première série de mesures est composée de six essais qui portent sur les pressions internes, juste derrière la couverture (pression intrados) et au centre du volume de comble. Les neuf points de mesure se situent dans une section verticale à 1.80 m du pignon. Les mesures sont faites par couple de points ayant la même hauteur pour l'incidence 0° .

La deuxième en contient quatre concernant les pressions externes et internes (intrados - extrados), mesurées aux mêmes points sur la couverture. Les quatre essais se différencient uniquement par l'incidence de vent.

Les caractéristiques de ces deux séries sont données dans le tableau 4.4. La figure 4.15. montre la référence et le positionnement des points de mesures.

Nous avons utilisé pour la mesure de pression intrados de la couverture une prise de pression spéciale (figure 5.16.) avec moyennneur pour éviter la mesure de la partie dynamique de la pression. La figure 4.17. donne les caractéristiques de la chaîne de mesure et la courbe d'étalonnage pour les mesures de deux pressions externe et interne.

	nombre des essais	durée de chaque essais [s]	fréquence d'échantillonnage [Hz]	fréquence de coupure [Hz]	Points de mesure de pression*
série 1	6	256	40	15	1I, 2I, 3I, 4I, 5I, 6I, 7I, 8I, 9
série 2	4	1203			3E, 4E, 6E, 3I, 4I, 9, 6I

Tableau 4.4. : Caractéristiques des deux séries de mesures.

* référence des points de mesure (cf. figure 4.15.)

I : pour intrados

E : pour extrados

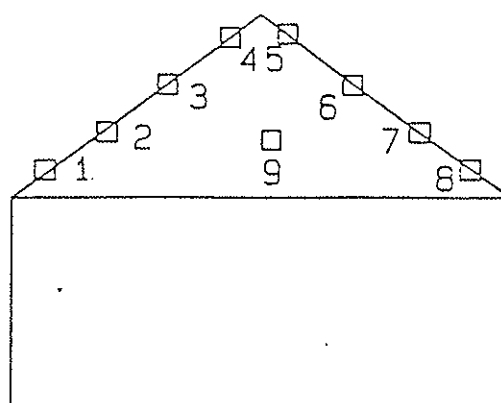


Figure 4.15. : Positionnement des points de mesures.

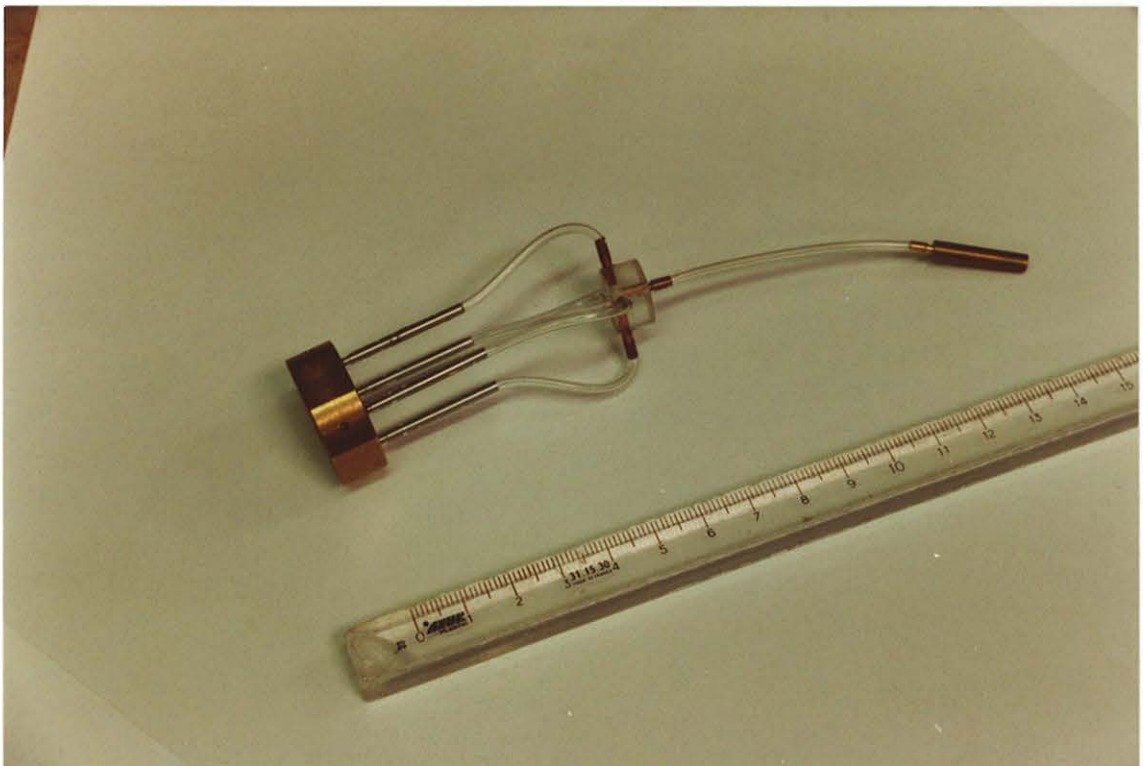
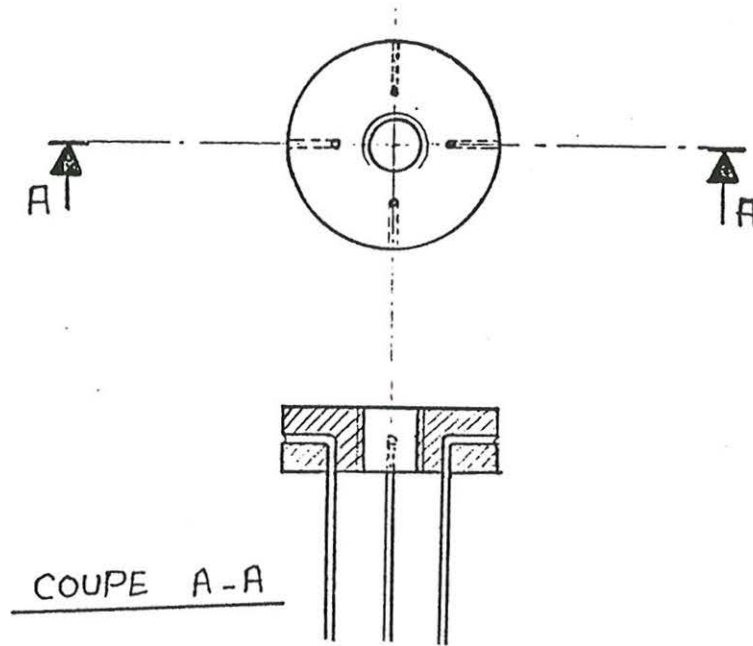
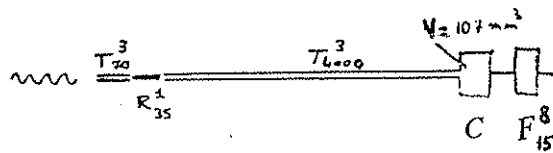
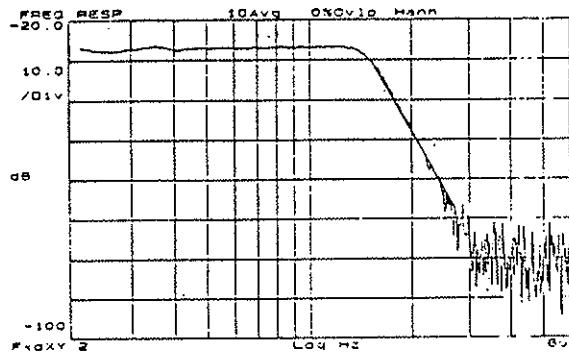
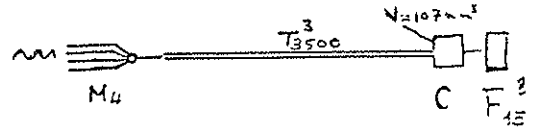
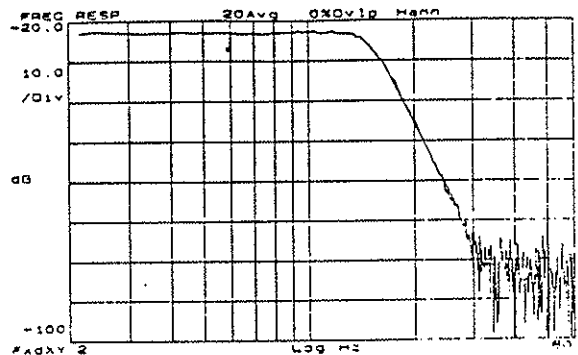


Figure 4.16. : Prise de pression intrados



a) La réponse en fréquence de la chaîne
chaîne de mesure de la pression externe
(série 2)



b) La réponse en fréquence de la
mesure de la pression interne
(série 1 + 2)

Symboles utilisés sur le schéma :

T_L^D : tuyau versilic de longueur L et diamètre D (mm),

R_L^D : restricteur de longueur L et diamètre interne D (mm),

M_j : moyeneur à j entrées,

C : capteur

$F_{f_c}^N$: filtre passe-bas " $|H(f)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2N}}$ "

Figure 4.17. : Caractéristiques des chaînes de mesures utilisées
pour les deux séries de mesures.

4.6.2. Essais et analyse des résultats.

L'homogénéité de la pression interne :

Dans la première série de mesures, les résultats (tableau 4.5.), ne présentent pas d'écarts significatifs.

	$\overline{C_{p_i}}$	Ecart type	$\hat{C}_{p_i}$	$\check{C}_{p_i}$	$\overline{U}(m/s)$ $\sigma(m/s)$
1*	- 0.06	0.07	0.16	- 0.40	10.00
8	- 0.06	0.07	0.16	- 0.40	1.40
2	- 0.06	0.08	0.16	- 0.30	10.10
7	- 0.06	0.08	0.16	- 0.30	1.75
3	- 0.10	0.07	0.08	- 0.44	11.50
6	- 0.10	0.07	0.09	- 0.44	1.15
4	- 0.10	0.09	0.14	- 0.42	10.50
5	- 0.10	0.09	0.17	- 0.42	1.60
3	+ 0.01	0.08	0.24	- 0.21	11.30
9	+ 0.01	0.08	0.24	- 0.21	1.90

Tableau 4.5. : Comparaison des valeurs de coefficient de pression interne C_{p_i} , mesurée en plusieurs points d'une section du comble (comparaison 2 à 2).

* référence des points de mesure (cf. figure 4.15.)

Le tracé temporel des deux voies de mesure nous montre une évolution de la pression interne instantanément homogène (figure 4.18.).

La cohérence entre les spectres de fluctuations est égale à 1 dans la gamme $[0, 3]$ Hz (cf. figure 4.19.). Il est à noter que 99 % d'énergie des fluctuations de la pression interne est dans la gamme des fréquences inférieures à 3 Hz (cf. figure 4.20 et tableau 4.6.).

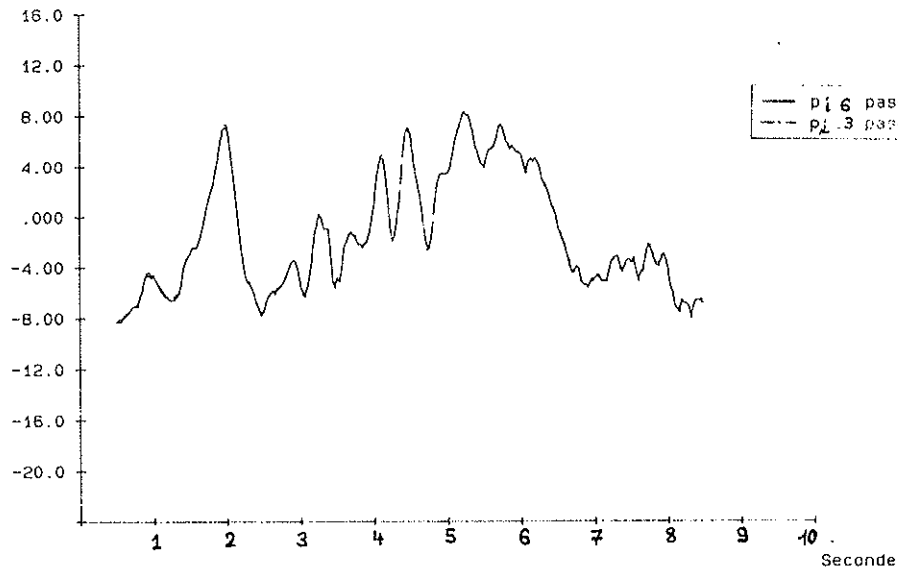


Figure 4.18. : Tracé temporel de deux voies de mesure.

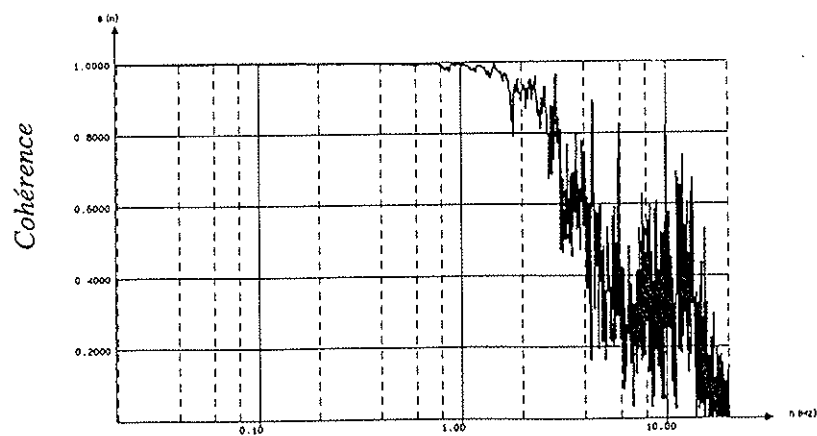


Figure 4.19. : Cohérence entre deux pressions.

	$\overline{P}_1$	P'_1	$\hat{P}_1$	$\check{P}_1$	Rapport d'énergie des fluctuations
avant filtrage	- 5.673	2.282	8.3	- 35.89	0.989
filtrage à 3 Hz	- 5.673	2.256	8.3	- 31.58	

Tableau 4.6. : Comparaison des résultats de traitement statistique
avant et après le filtrage à 3 Hz.

Ceci nous permet de considérer que l'hypothèse d'homogénéité de la pression interne est applicable pour le calcul temporel de cette pression sur toute la gamme des fréquences importantes.

- Quasi-stationnarité de l'évolution temporelle de la pression interne :

Cette hypothèse sera vérifiée s'il n'y a pas de phénomène de résonance dans le comble (cf. paragraphe 2.2.4.).

L'analyse spectrale des pressions internes (figures 4.20. et 4.21.) montre un certain nombre de fréquences caractéristiques. Toutefois, la superposition des spectres de pression interne et externe montre que ces fréquences caractéristiques ne sont pas propres uniquement à la pression interne. On ne constate pas, sur les spectres de nombreux essais réalisés, pour différentes incidences du vent, de phénomènes de résonance marqués.

En conclusion, on peut avancer que l'hypothèse de quasi-stationnarité peut être appliquée à l'évolution temporelle de la pression interne dans le cas présent.

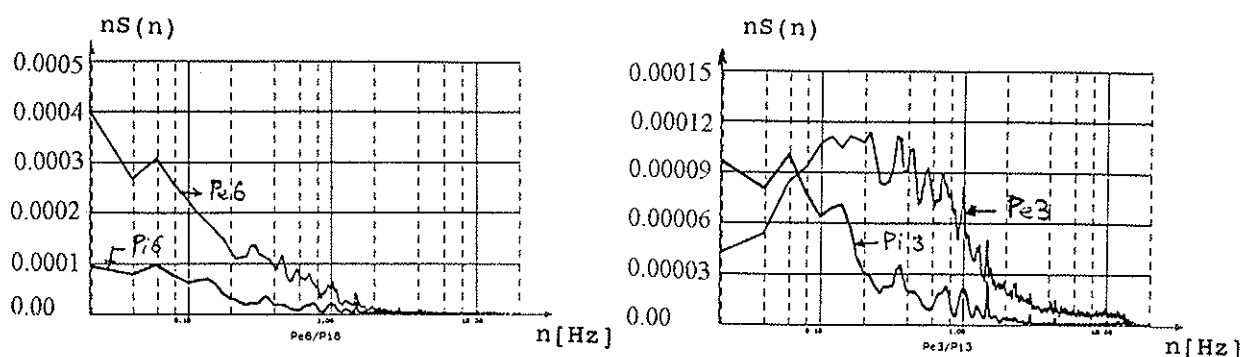


Figure 4.20. : Spectres des fluctuations des pressions internes et externes
en deux points 3 et 6.

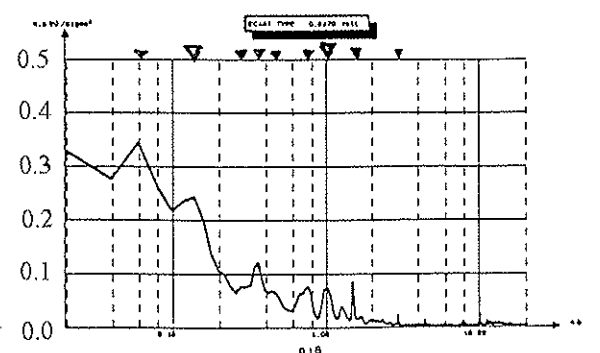
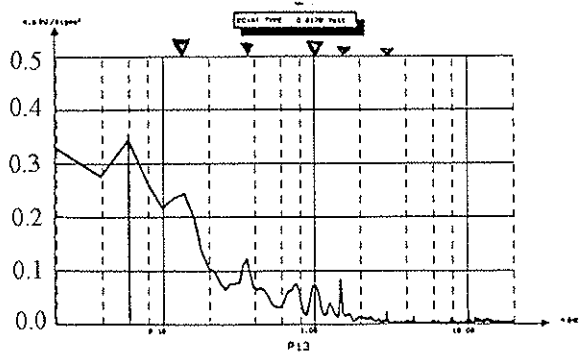
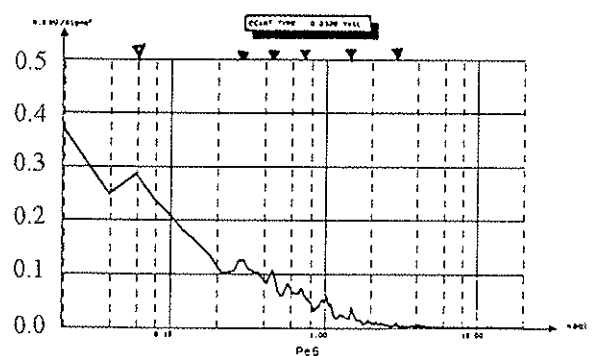
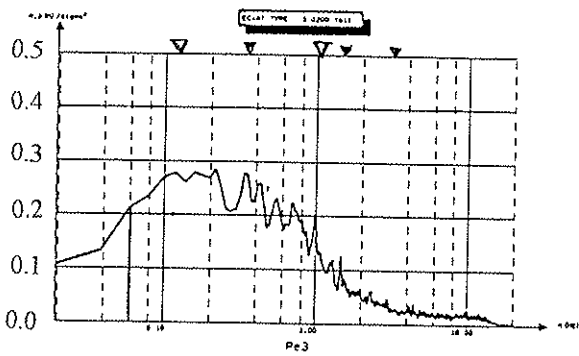
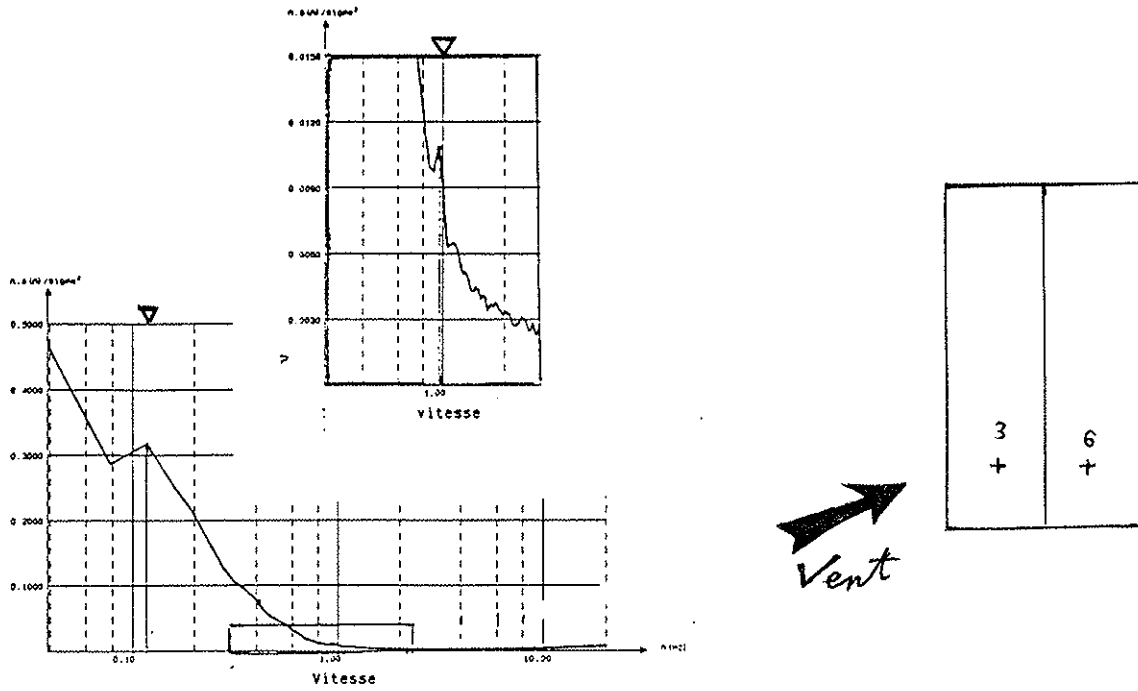


Figure 4.21. Spectres des fluctuations des pressions internes et externes et de la composante horizontale de la vitesse du vent.

4.7. Conclusion

La volonté de minimiser l'erreur de mesure pour la validation du modèle théorique nous a poussé à choisir avec beaucoup d'attention chacun des constituants de la chaîne de mesure de pression. Ceci étant, l'erreur maximum est estimée de l'ordre de 5 %. Notant que l'erreur de mesure de pression augmente lorsque la pression à mesurer est faible, nous n'avons pas grand intérêt d'effectuer des mesures pour des faibles vitesses de vent ($\overline{U} < 8 \text{ m/s}$).

Les mesures effectuées en vraie grandeur (site réel) ont montré que :

- L'énergie des fluctuations de champ de pression externe, pour le cas étudié, est incluse dans la gamme [0 , 15] Hz,
- L'homogénéité de pression interne dans le volume du comble est valable dans la gamme [0 , 3] Hz, qui contient 99 % de son énergie des fluctuations
- Aucun phénomène de résonance dans le volume du comble n'a été observé.

5. MESURES EXPERIMENTALES

5.1. Introduction

Ce chapitre est essentiellement consacré aux travaux expérimentaux. Ils concernent d'une part la mesure sur banc de la perméabilité d'une couverture constituée de petits éléments et d'autre part la mesure des champs de pression externe et interne à l'échelle 1 dans la veine environnement de la soufflerie climatique.

5.2. Mesure de la perméabilité à l'air de la couverture.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, la perméabilité à l'air de la couverture joue un rôle primordial dans l'établissement du champ de pression dans le comble. Par voie de conséquence, nous avons été amenés à caractériser sa valeur dans le cas particulier d'une couverture constituée de petits éléments (ardoises) par des mesures sur un banc.

Le schéma de principe du banc est présenté figure 5.1. Le montage de la couverture est identique à celui de la maison modèle en soufflerie (couverture en ardoises, montage conforme au DTU pour une pente de 30°) (voir paragraphe 5.3.2).

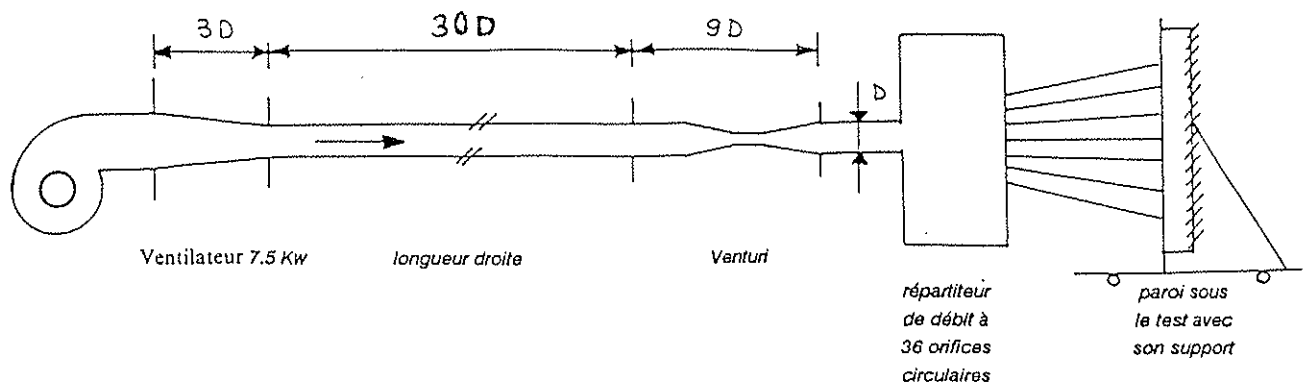


Figure 5.1 : Schéma de principe du banc de mesure de la perméabilité à l'air d'une paroi.

5.2.1. Les mesures

Les mesures concernent :

- le débit traversant la couverture
- la différence de pression de part et d'autre de la couverture.

Mesure de débits.

La mesure de débit est effectuée à l'aide d'un venturi préalablement étalonné, dont les dimensions sont précisées sur le schéma de la figure 5.2.

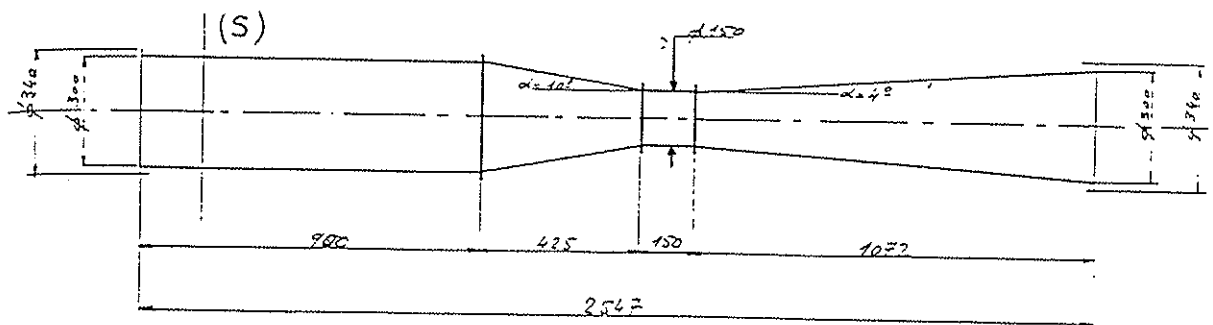


Figure 5.2 : Venturi utilisé pour la mesure de débit.

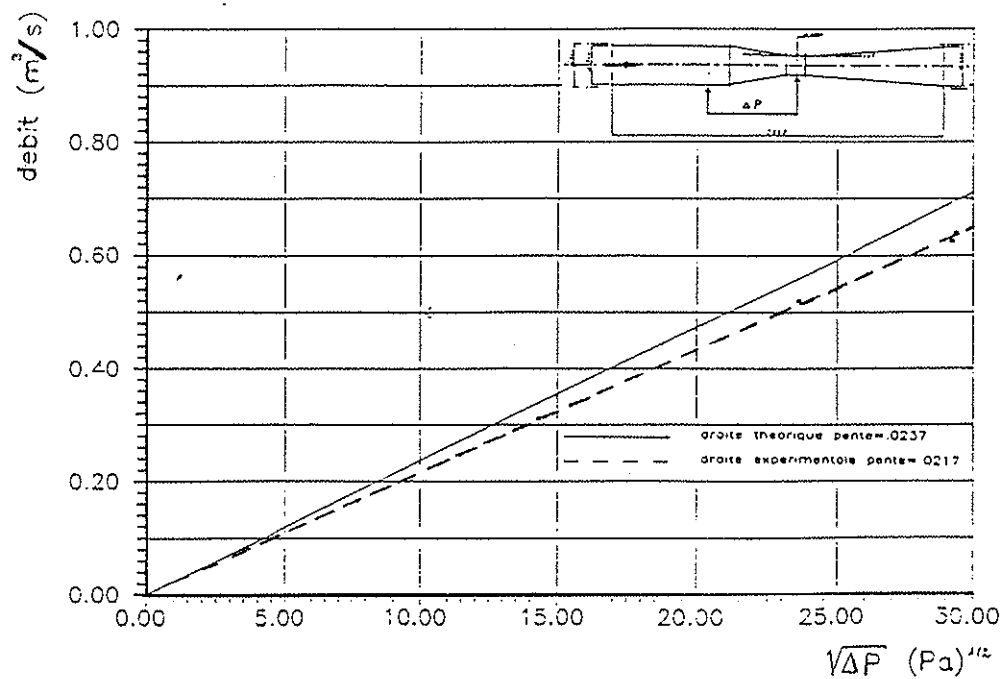


Figure 5.3 : Droite d'étalonnage du Venturi.

Mesure de la différence de pression de part et d'autre de la couverture.

Douze prises de pression ont été réparties sur toute la surface (9 m^2). Les prises de pression sont positionnées en dehors des zones tourbillonnaires de recirculation (figure 5.4.).

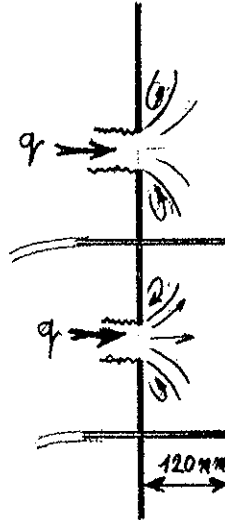


Figure 5.4. : Position des prises de pression par rapport aux jets.

La partie dynamique de la pression inférieure à la sensibilité des capteurs (± 1 Pascal), n'a pas une grande influence sur nos mesures. La vitesse d'écoulement dans le volume de confinement peut atteindre au plus 0.1 m/s ; l'erreur de mesure due au reliquat de pression dynamique est par conséquent négligeable.

5.2.2. Analyses des résultats et commentaires.

Les mesures ont été effectuées en soufflage et en aspiration pour mettre en évidence la non-symétrie éventuelle du comportement de la couverture vis à vis de sa perméabilité à l'air. Le soufflage modélise une dépression extérieure (flux sortant), contrairement à l'aspiration qui simule une surpression extérieure (flux entrant).

Les cinquante mesures, pour chaque cas, sont réparties par séries. Les séries de mesures en soufflage sont plus courtes qu'en aspiration pour minimiser l'erreur de mesure de débit induite par le réchauffement d'air, surtout pour les faibles débits.

La figure 5.5. montre les résultats de mesure en soufflage et en aspiration. La relation débit/pression est obtenue par le lissage des points de mesure (cf. figure 5.6.) :

$$|Q| = C|\Delta P|^N$$

où : $C = 0.00360 \pm 0.00040$, $N = 0.655 \pm 0.005$ (aspiration)

$C = 0.00300 \pm 0.00038$, $N = 0.650 \pm 0.005$ (soufflage)

Nous fixons N pour les deux cas à 0.65. Ceci rend la gamme d'erreur relative $\frac{\delta C}{C}$ à près de $\pm 15\%$.

Coefficient de perte de charge ξ_c :

Le coefficient de perte de charge de la couverture est donné en fonction de ΔP et des deux constantes C et N (cf. formule II.10) :

$$\xi_c = \frac{2\rho}{C^2[\Delta P]^{2N-1}}$$

La figure 5.7. montre le tracé de ξ_c en fonction de ΔP (ξ_c n'a pas de sens physique pour $\Delta P \approx 0$). Pour les valeurs ΔP assez importantes, l'écoulement devient turbulent et ξ_c tend vers une valeur constante ξ_0 :

$$\xi_0 = 29400 \pm 6500 \text{ (aspiration)}$$

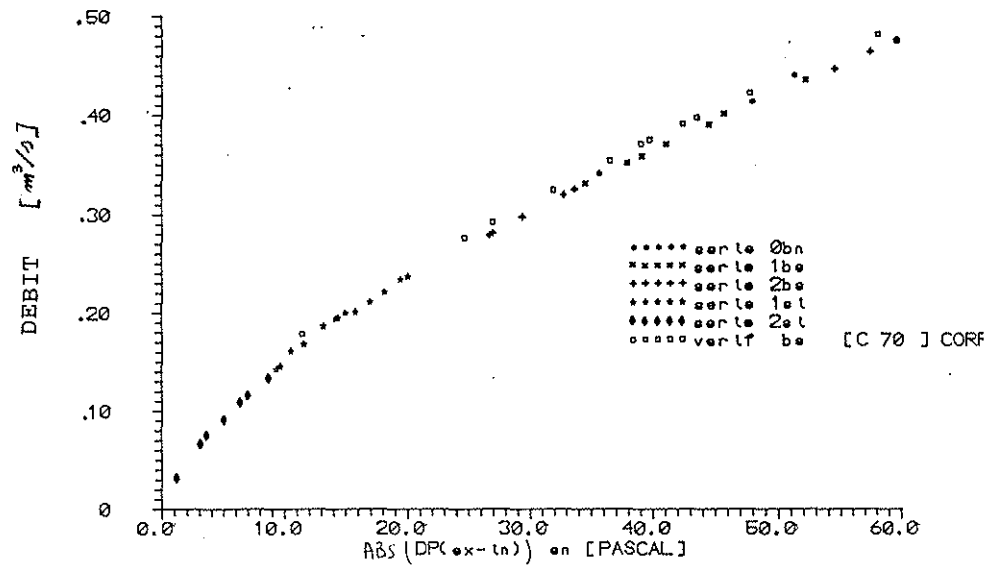
$$\xi_0 = 44000 \pm 11000 \text{ (soufflage)}$$

Dans une étude sur le thème, KRAMER [30] trouve une gamme $\xi_0 \in [4380, 64000]$ qui inclue nos valeurs. Nous notons qu'une couverture en ardoises est moins perméable qu'une couverture en tuiles à l'exception de tuiles type "Doppel-S-pfanne" (cf. tableau 2.1).

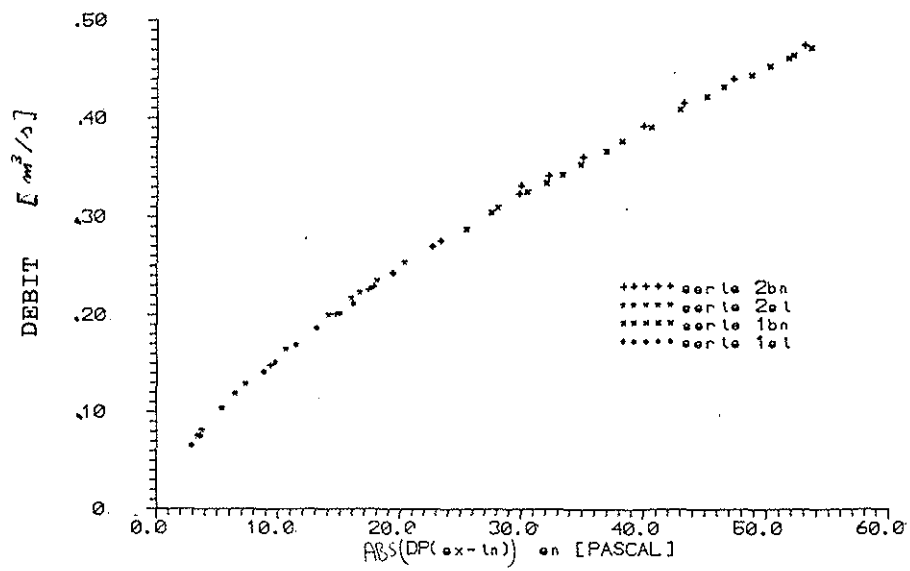
Le rapport section ouverte/section totale $\left(\frac{s_e}{S}\right)$ calculé par la formule (II.11)

$$\frac{s_e}{S} = \sqrt{\frac{1}{\xi_0}}$$

est de l'ordre de 0.0052 ± 0.0006



(a) Mesure en soufflage



(b) Mesure en aspiration.

Figure 5.5 : Les résultats de mesure.

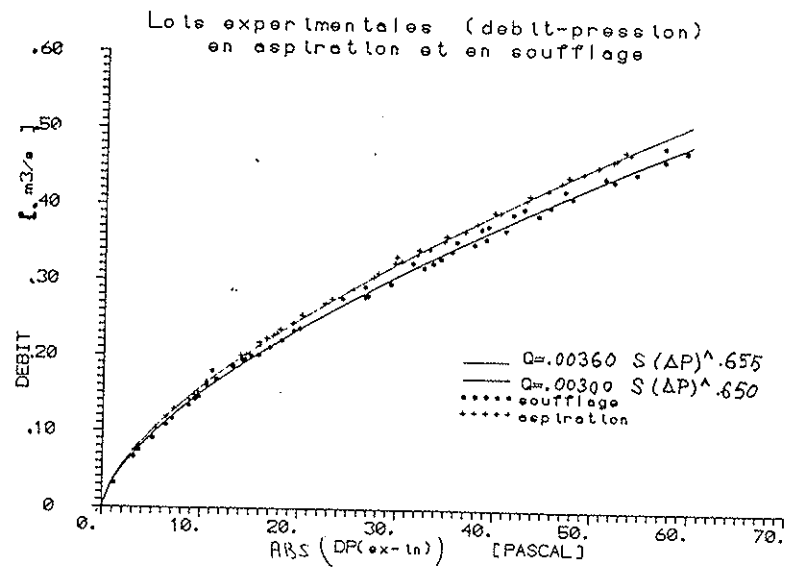
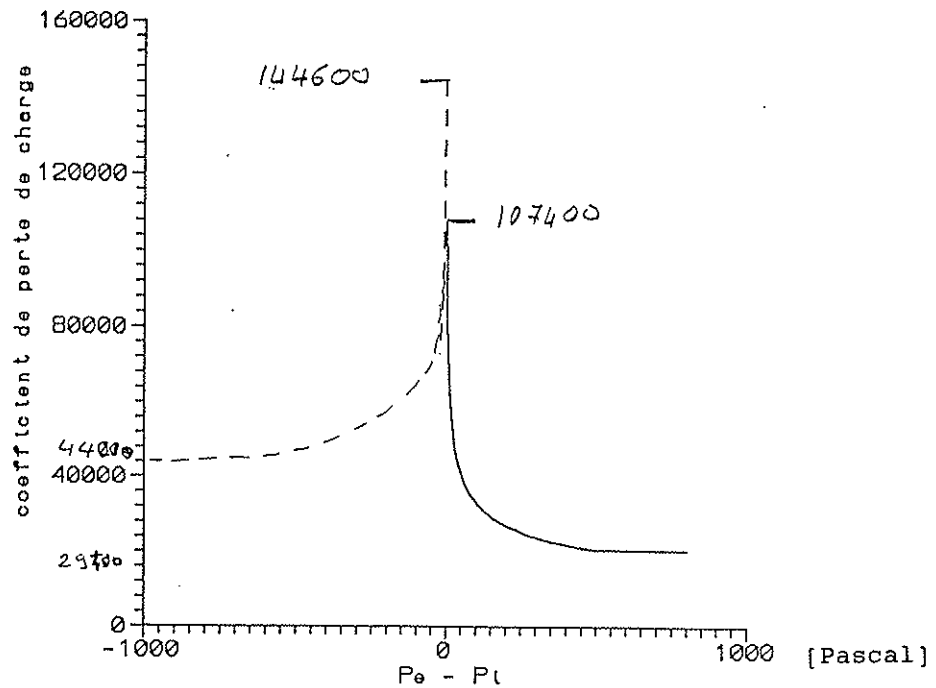


Figure 5.6. : Lissage des points de mesure.

Figure 5.7. : Coefficient de perte de charge ξ_c

5.2.3. Discussion.

La mesure des coefficients C et N caractérisant l'écoulement à travers la couverture, a été effectuée en régime stationnaire sur un revêtement sec. Le caractère instationnaire de la pression différentielle, l'existence d'une vitesse tangentielle comme la présence de la pluie peut influencer ces coefficients.

Il est donc nécessaire d'étudier l'influence de ces paramètres sur la perméabilité à l'air des couvertures, ce qui nous a amené à effectuer une campagne de mesure en soufflerie sur un modèle à l'échelle 1 avec restitution des paramètres climatiques vent et pluie.

5.3. Essais échelle 1 effectués en soufflerie climatique.

5.3.1. Objectifs.

Outre l'étude de sensibilité de la perméabilité à l'air de la couverture aux différents paramètres, l'objectif poursuivi (à titre de rappel) est double :

- étudier les paramètres d'influence sur le champ différentiel de pression intrados/extrados
- se doter de fichiers de référence pour la validation du modèle théorique du calcul de la pression interne développé au chapitre 3.

5.3.2. Description des essais.

- Caractéristiques du modèle expérimental.

Une maison vraie grandeur a été placée dans la veine environnement de la soufflerie climatique (figure 5.8.). Les caractéristiques géométriques de ce modèle sont données sur la figure 5.9. Une partie du comble (20 m^3) a été isolée du reste du volume. Les parois externes ont été étanchéifiées pour que la pression interne ne soit fonction que du champ de pression externe régnant sur le toit et de la perméabilité à l'air de sa couverture.

La surface de chaque versant (9 m^2) a été équipée de 20 prises de pression. La distance entre les points de mesure retenue se situe dans la gamme fixée dans le chapitre précédent (voir

paragraphe 4.5.) et s'appuie sur les résultats des mesures faites à Bouin (annexe 3). Le maillage retenu est par conséquent plus serré dans les zones de décollement et de recollement que dans le sillage (cf. figure 5.10.).



Figure 5.8. : Vue du modèle expérimental en position dans la soufflerie.

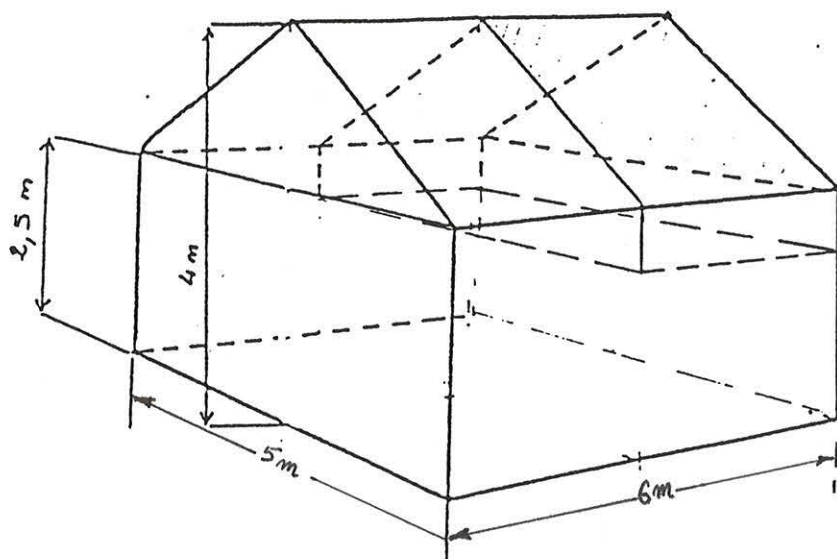


Figure 5.9. : Caractéristiques géométriques du modèle.

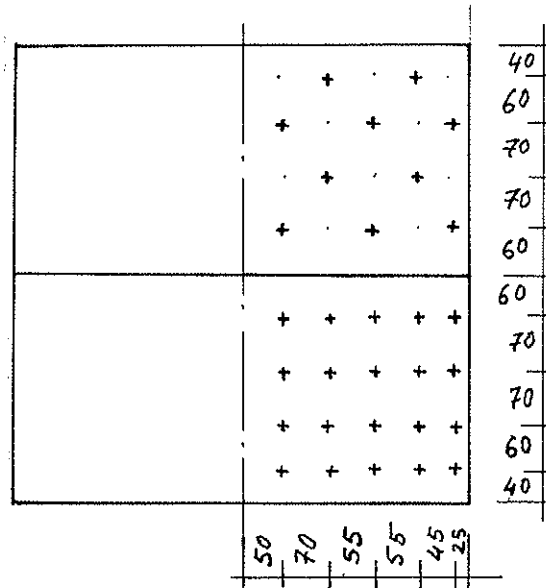


Figure 5.10. : Position des points de mesure de pression.

Les prises de pression ont été équipées de pots de rétention d'eau de pluie (cf. figure 5.11.). Le volume interne de chaque pot ($10^{-4} m^3$) n'amortit pas le signal dans la gamme des fréquences intéressantes pour les mesures. Les essais ont montré que malgré ce dispositif et le grand diamètre intérieur des prises (5 mm), certaines d'entre elles (celles se situant en zone de surpression) étaient souvent obturées. Cela est dû à la formation d'un ménisque d'eau. Un traitement de surface interne de la prise à la graisse silicone a permis d'éliminer le phénomène.

Méthode de mesure.

Les caractéristiques de la chaîne de mesure sont celles retenues dans le chapitre précédent (paragraphe 4.3.). Les paramètres d'acquisition sont décrits dans le tableau 5.1. :

Fréquence d'échantillonnage [Hz]	Fréquence de coupure [Hz]	Durée totale de mesure [s]
30	15	273

Tableau 5.1. : Caractéristiques de mesure.

PRESSION EXTERIEURE

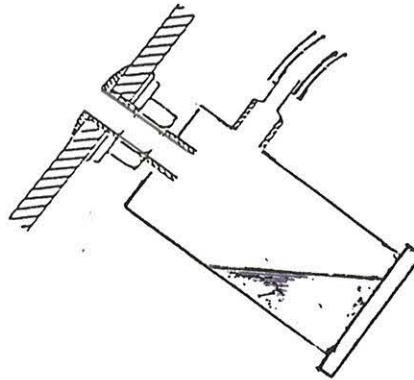


Figure 5.11. : Schéma de prise de pression

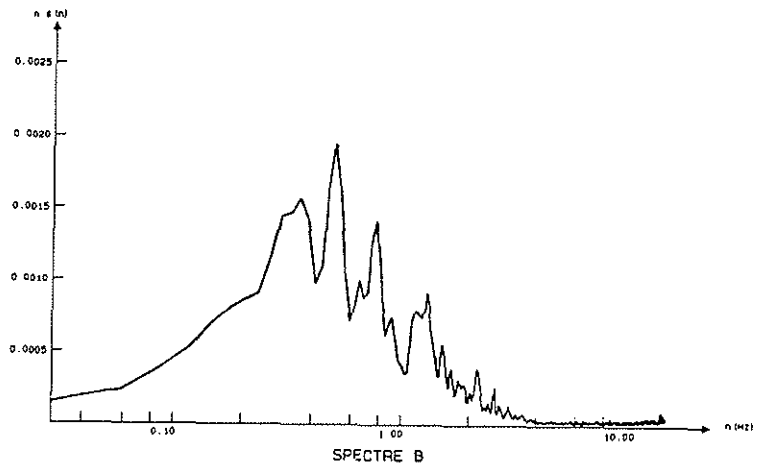


Figure 5.12. : Prise de pression avec pot de rétention.

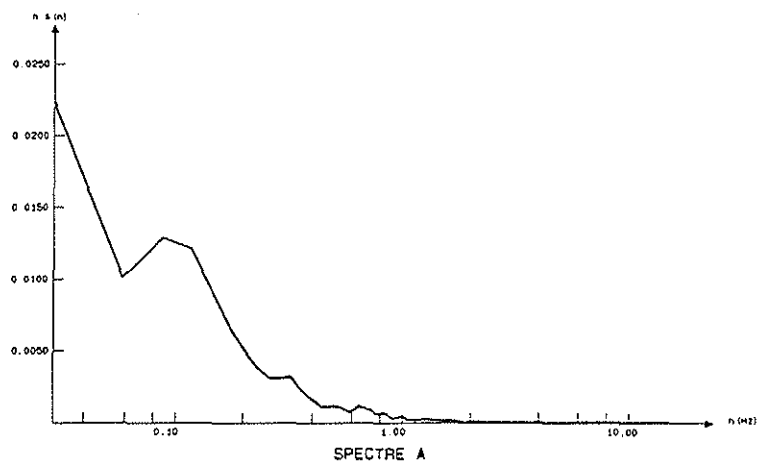
La durée d'acquisition ($T \approx 300s$) est limitée par la capacité de remplissage des pots de rétention sous l'effet de forte pluie ($I_p \approx 200 \text{ mm/h}$).

Domaine de variations des paramètres expérimentaux :

- Intensité de turbulence : 10, 20, 24 et 33 % mesurées à 4.5 m, hauteur du faîtage.
- Distribution spectrale de la composante horizontale de la vitesse du vent simulée
 - spectre A : spectre du vent naturel obtenu par le pilotage automatique
 - spectre B : écoulement peu turbulent (l'intensité de turbulence est comprise entre 6 et 10 %), obtenu en gardant le calage des pales constant. Les fluctuations sont centrées vers les hautes fréquences (figure 5.13.).
- Vitesse moyenne du vent $\bar{U}$: 6, 9 et 15 m/s.
- Intensité de pluie I_p (2 à 4 intensités par cas) : 0, 60, 100, 200 et 240 mm/h.
- Incidence du vent θ : 0° et 45°



(a) : *spectre B*



(b) : *Spectre A.*

Figure 5.13. : Spectres du vent simulé en soufflerie climatique.

Présentation de la méthode d'interprétation des résultats.

L'analyse des essais a porté sur les pressions différentielles $(P_e - P_i)$ sous sa forme adimensionnelle $\left(\frac{P_e - P_i}{\frac{1}{2} \rho \bar{U}_{ref}^2} \right)$. La vitesse de référence $\bar{U}_{ref}$ est mesurée, à la hauteur de faîtage en amont du modèle.

En tenant compte du caractère aléatoire du phénomène étudié, et de l'erreur de mesure, nous avons estimé utile de comparer les résultats de deux essais pour lesquels nous n'avons pas fait varier de paramètres.

Pour une vitesse de référence de 9 m/s, la gamme de dispersion des mesures est de l'ordre de ± 0.15 sur les valeurs de pics maximal et minimal de coefficient de pression $\Delta \hat{C}_p$ et $\Delta \check{C}_p$ ($\Delta \hat{C}_p \in [+0.4, +1.3]$, $\Delta \check{C}_p \in [-2.8, -0.8]$) (figure 5.14.).

Elle est de l'ordre de ± 0.04 sur les valeurs moyennes ($\Delta \bar{C}_p \in [-0.6, +0.6]$) comme le montre la figure 5.15.

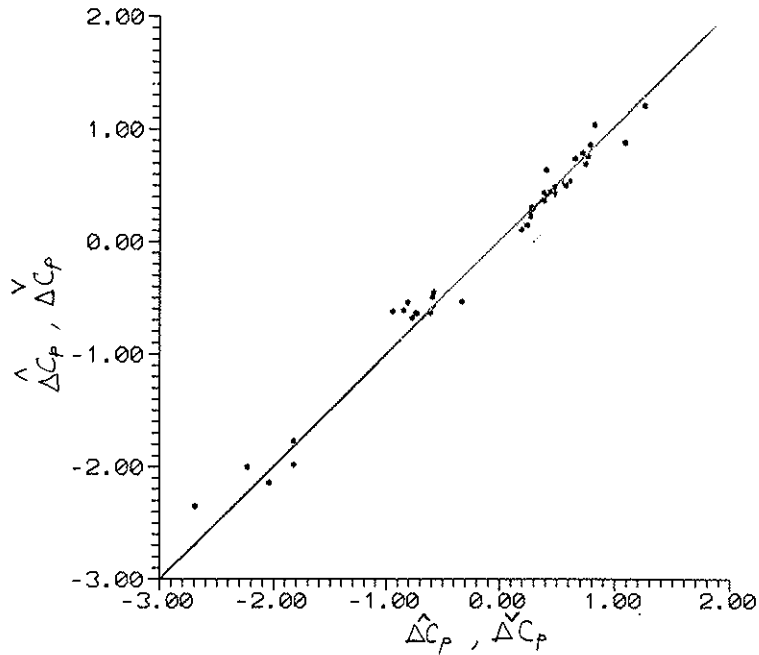


Figure 5.14. : Comparaison entre deux essais effectués dans des conditions identiques ($\bar{U} = 9 \text{ m/s}$, $I_x = 10\%$) en terme des valeurs de pic $\Delta \hat{C}_p$, $\Delta \check{C}_p$.

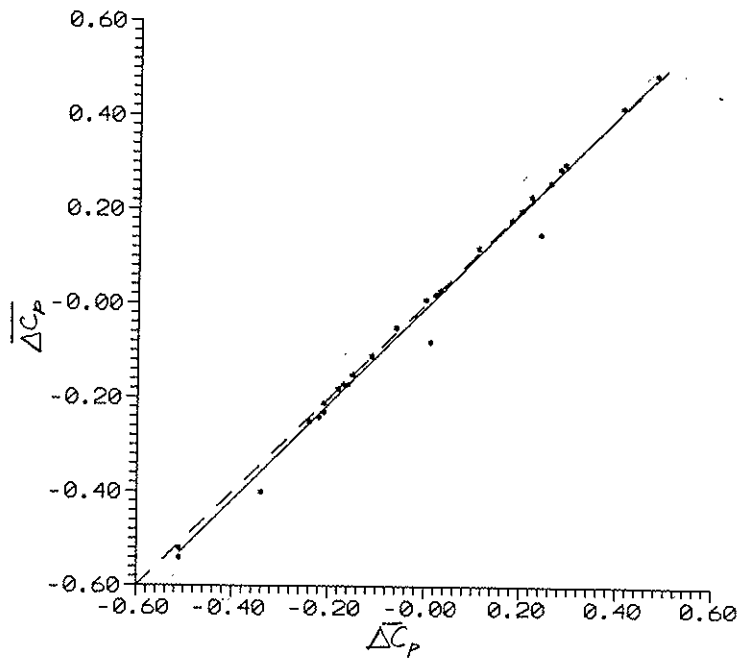


Figure 5.15. : Comparaison entre deux essais effectués
dans des conditions identiques ($\bar{U} = 9 \text{ m/s}$, $I_x = 10\%$)
en terme des valeurs moyennes $\overline{\Delta C_p}$

5.3.3. Paramètres d'influence sur le champ de pression différentielle externe/interne sur le toit.

L'effet de la turbulence du vent.

Le taux de turbulence n'a que peu d'influence sur les valeurs moyennes de ΔC_p (cf. figure 5.16.). Ce n'est pas le cas pour les valeurs de pics $\hat{\Delta C_p}$ (cf. figure 5.17.).

Le risque de perte d'étanchéité à l'eau, très sensible aux différentiels de pointe, augmente avec l'intensité de turbulence pour une vitesse moyenne constante.

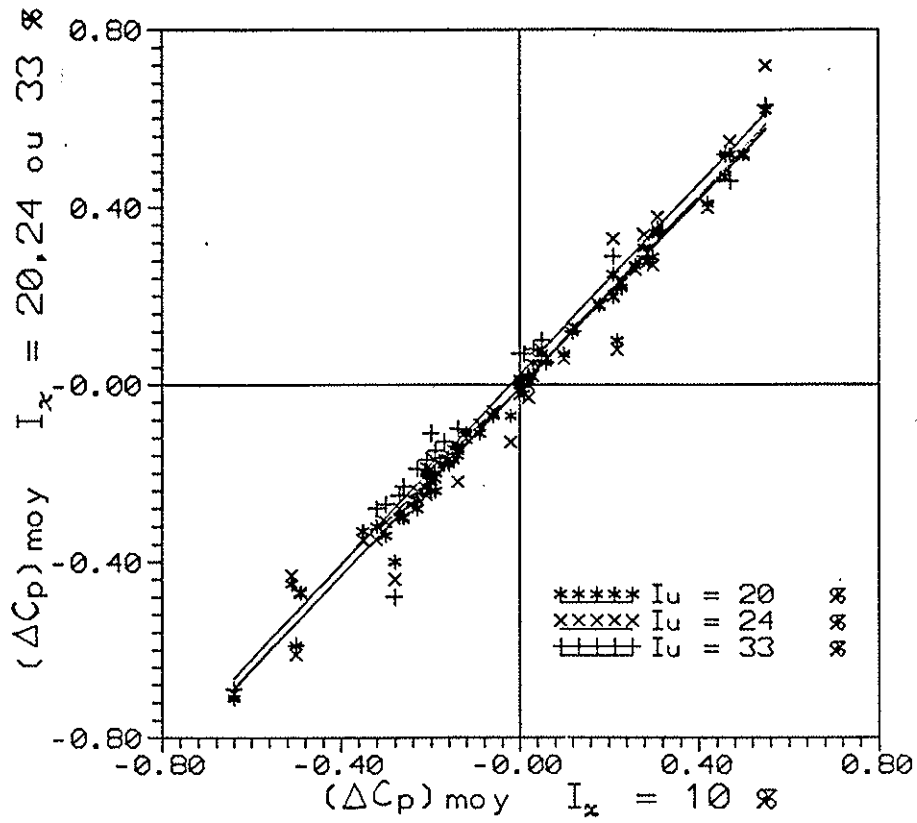


Figure 5.16. : Effet de l'intensité de turbulence sur $\overline{\Delta C_p}$.

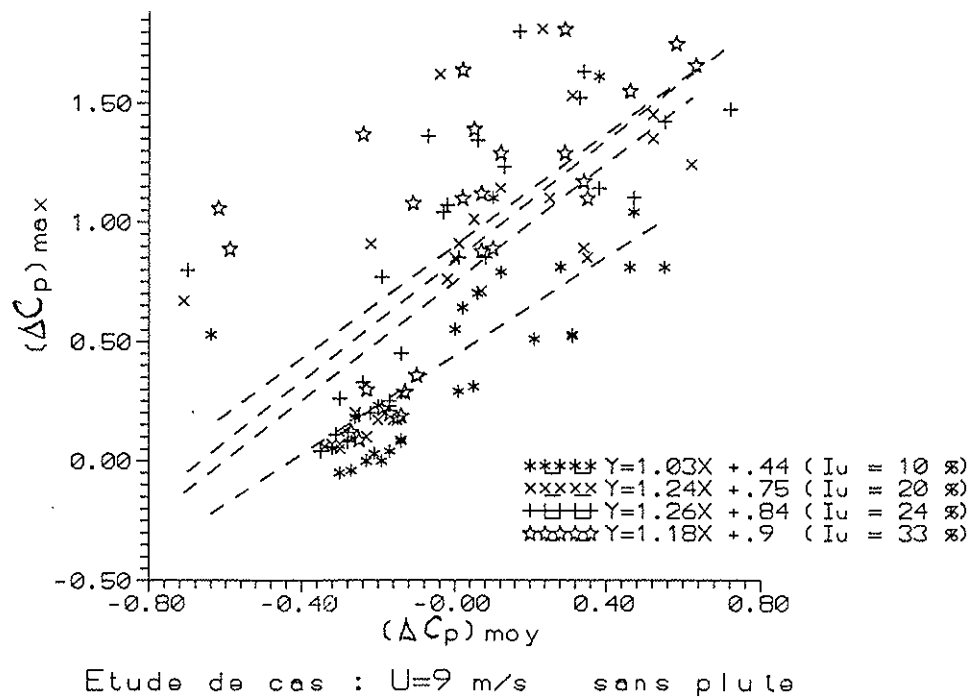


Figure 5.17. : Effet de l'intensité de turbulence sur $\hat{\Delta C_p}$.

L'effet de la pluie.

Le vent simulé a pour spectre le type A (paragraphe 5.3.2. ; vent naturel). Le spectre B de faible fluctuation à fréquences plus élevées a été utilisé pour juger de l'influence de la gamme des fréquences sur le comportement des éléments de toiture.

Cas du vent naturel (spectre A) :

Nous notons une augmentation des $\overline{\Delta C_p}$ pour l'ensemble des points de mesure en présence de pluie par rapport aux $\overline{\Delta C_p}$ mesurés en son absence (cf. figures 5.18.). Ceci peut être interprété par le fait que la lame d'eau bouche les joints entre les éléments de la couverture dans les zones de surpression. Ce n'est pas le cas pour les zones dépressionnaires.

Ce phénomène a été observé quelle que soit la vitesse moyenne $\overline{U}$, l'intensité de turbulence I_x et l'incidence du vent θ (figures 5.18., 5.19., 5.20.).

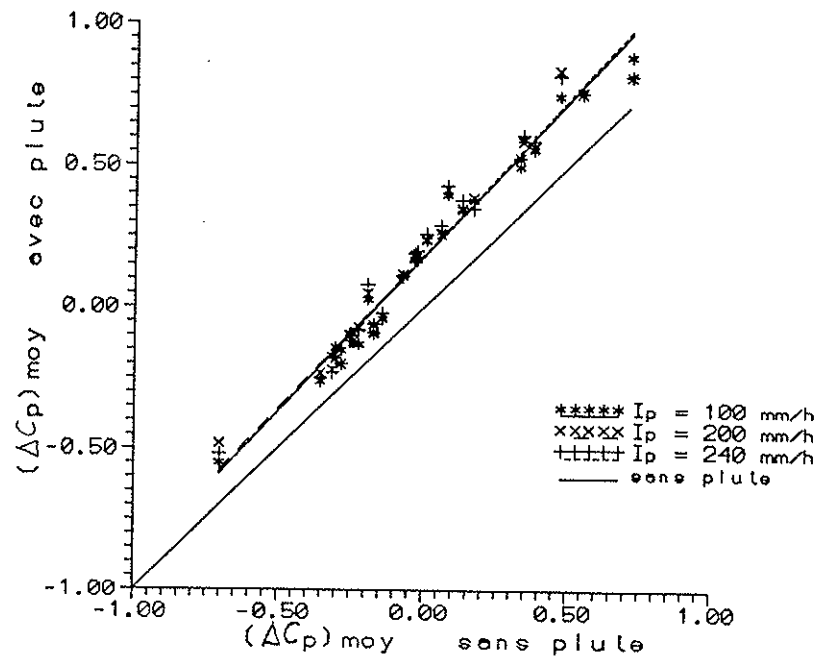


Figure 5.18. : Effet de la pluie sur $\overline{\Delta C_p} = \overline{C_{pe}} - \overline{C_{pi}}$
 $(\overline{U} = 9 \text{ m/s}, I_x = 24\%, \theta = 0^\circ)$.

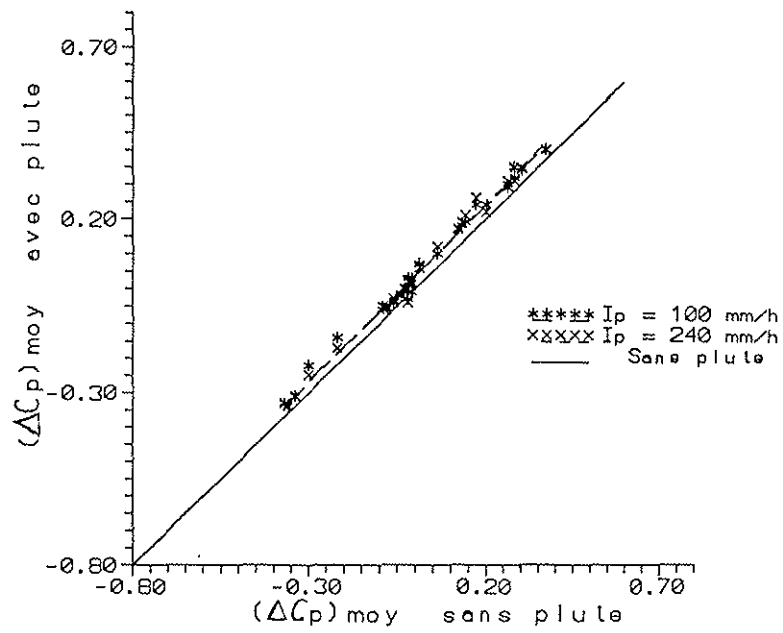


Figure 5.19. : Effet de la pluie sur $\overline{\Delta C_p} = \overline{C_{p_e}} - \overline{C_{p_i}}$
 $(\bar{U} = 16 \text{ m/s}, I_x = 10\%, \theta = 0^\circ)$

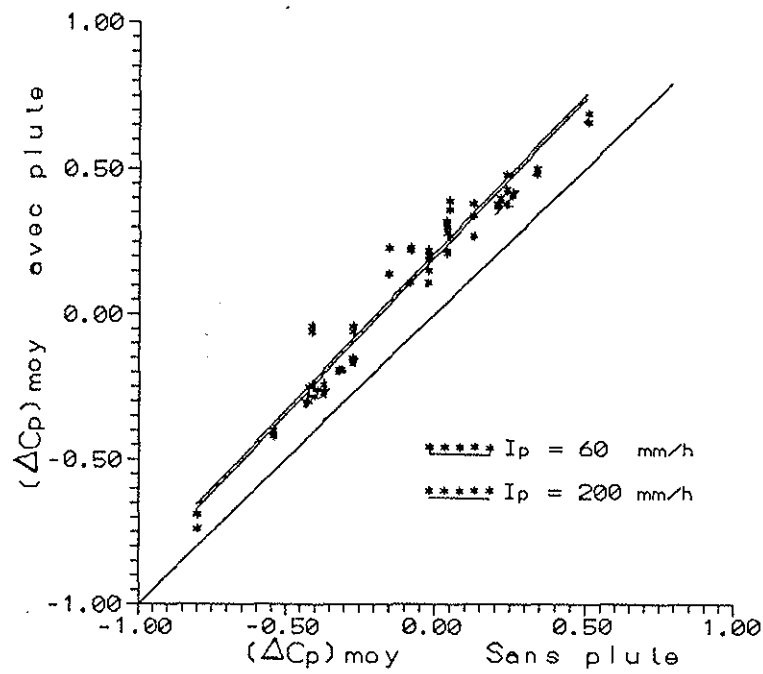


Figure 5.20. : Effet de la pluie sur $\overline{\Delta C_p} = \overline{C_{p_e}} - \overline{C_{p_i}}$
 $(\bar{U} = 9 \text{ m/s}, I_x = 24\%, \theta = 45^\circ)$

La figure 5.21. montre que l'écart entre $(\overline{\Delta C_p})_{\text{toiture sèche}}$ et $(\overline{\Delta C_p})_{\text{toiture mouillée}}$ pour chaque point est plus important pour les faibles vitesses que pour les grandes. Cela peut être expliqué par l'effet de la vitesse tangentielle sur la perméabilité à l'air d'une couverture sèche (cf. paragraphe 5.3.4.).

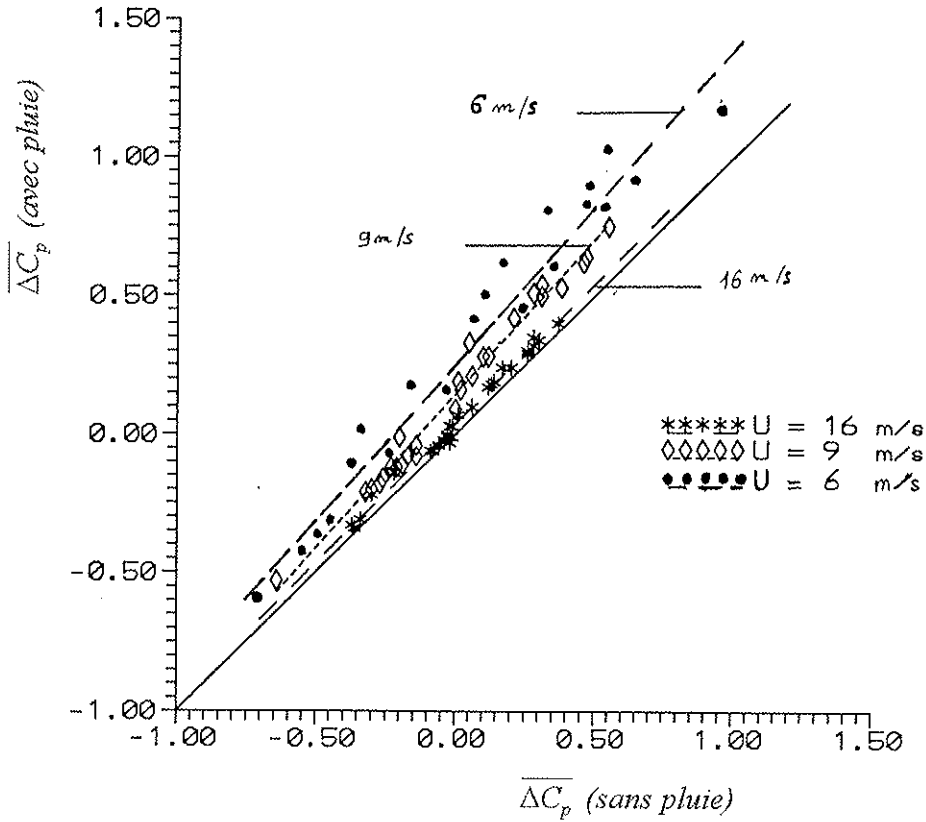


Figure 5.21. : L'effet de la pluie sur $\overline{\Delta C_p} = \overline{C_{pe}} - \overline{C_{pi}}$
Etude de cas : $I_x = 10 \%$ $I_p = 100 \text{ mm/h}$, pour différents vitesses du vent

Si la diminution de la perméabilité à l'air de la couverture pour un flux entrant est l'unique raison de l'augmentation de $\overline{\Delta C_p}$, on doit s'attendre à une augmentation de l'écart type ΔC_p pour les valeurs de $\overline{\Delta C_p}$ positives sous l'effet de la pluie, et inversement pour $\overline{\Delta C_p}$ négatives. C'est effectivement ce que montrent les figures 5.22. et 5.23. pour la plupart des points de mesure.

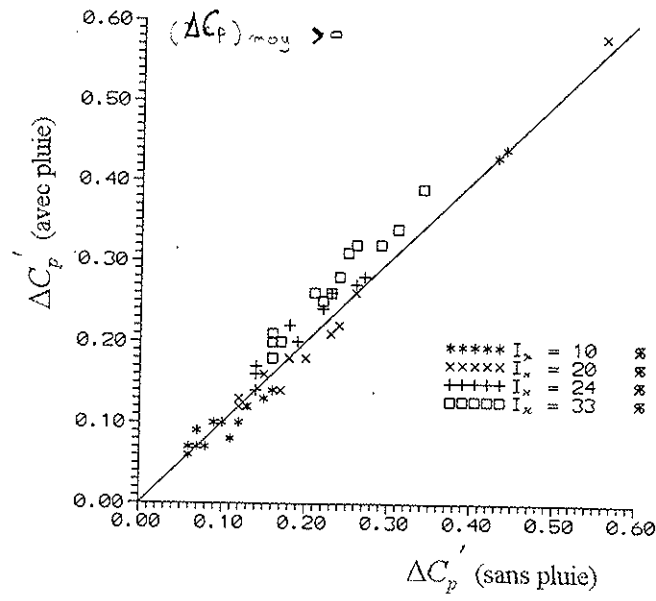


Figure 5.22. : L'effet de la pluie sur $\Delta C_p'$ pour les valeurs de $\overline{\Delta C_p}$ positives (étude de cas : $\overline{U} = 9 \text{ m/s}$ $I_p = 100 \text{ mm/h}$).

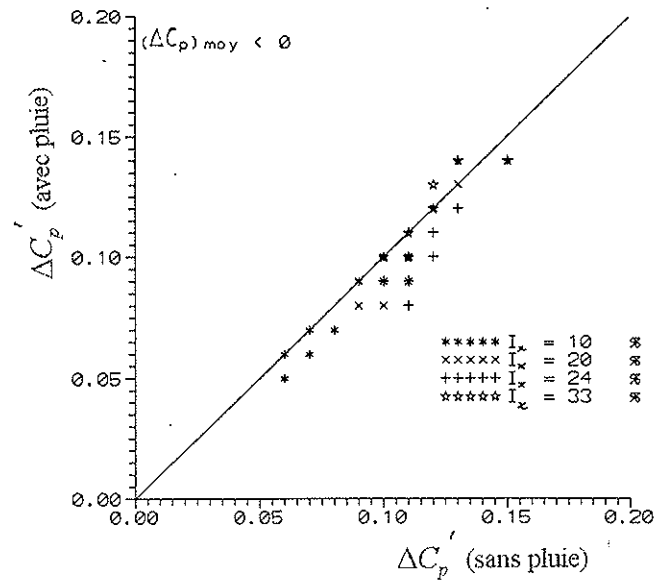


Figure 5.23. : L'effet de la pluie sur $\Delta C_p'$ pour les valeurs de $\overline{\Delta C_p}$ négatives (étude de cas : $\overline{U} = 9 \text{ m/s}$ $I_p = 100 \text{ mm/h}$).

Les valeurs maximales de $\hat{\Delta C_p}$ représentent globalement une légère augmentation en présence de la pluie. Cette constatation reste valable quelle que soit l'intensité de turbulence du vent simulé (cf. figure 5.24.). Etant donné que les valeurs de pic $\hat{\Delta P}$ jouent un rôle important dans le phénomène de pénétration d'eau, il est indispensable de prendre en considération l'effet de la pluie sur la perméabilité à l'air des couvertures.

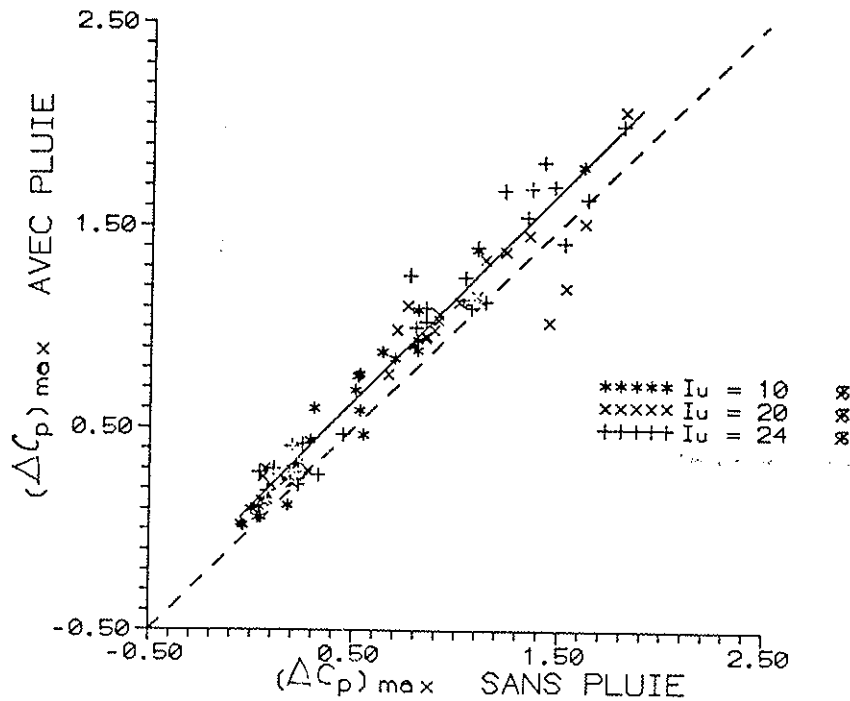


Figure 5.24. : Effet de la pluie sur $\hat{\Delta C_p}$
Etude de cas : $\bar{U} = 9 \text{ m/s}$ $I_p = 100 \text{ mm/h}$.

Cas de faibles fluctuations à fréquences élevées (spectre B) :

L'effet de pluie sur $\overline{\Delta C_p}$ est moins prononcé qu'au cas précédent (vent naturel). La dispersion des points est importante (figures 5.25. et 5.26.). Sur les mêmes figures, nous constatons pour certains points de mesure, une diminution de $\overline{\Delta C_p}$ sous l'effet de la pluie, ce qui est contraire au phénomène observé précédemment.

L'absence de comportement général pour le spectre de vent type B nous fait penser contrairement au spectre type A, que l'effet de la pluie ne se fait pas uniquement sur la pression interne, mais aussi sur le champ de pression externe : ceci n'est pas confirmé par l'analyse fine.

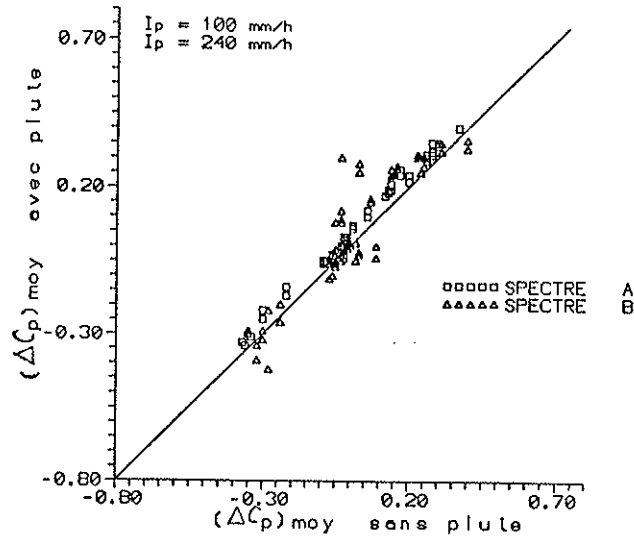


Figure 5.25. : Effet de la distribution spectrale
(Etude de cas : $\bar{U} = 16 \text{ m/s}$ $I_x = 10 \%$).

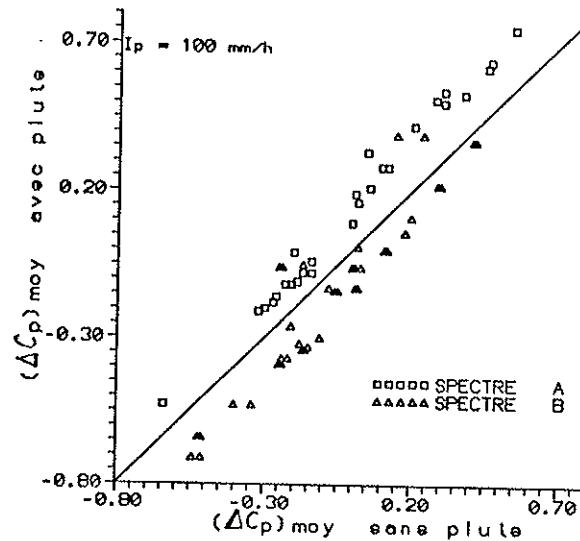


Figure 5.26. : Effet de la distribution spectrale
(Etude de cas : $\bar{U} = 9 \text{ m/s}$ $I_x = 10 \%$).

Par ailleurs, la comparaison des résultats de mesure obtenus pour les mêmes vitesses et intensités de turbulence du vent ($\bar{U} = 16 \text{ m/s}$, $I_x = 10\%$) avec deux distributions spectrales A et B (figure 5.27.) montre que le nuage de points est large pour les valeurs de $\overline{\Delta C_p}$ dans la gamme $[0, 0.2]$. En effet, la position de la ligne de recollement est fortement influencée par le spectre de vent incident. Nous notons également sur la même figure que la dispersion des points est aussi importante pour les mesures sans pluie qu'avec pluie.

Il est fort probable que, dans le cas d'une toiture sèche (pas de pluie), suivant la gamme des fréquences des fluctuations de pression, les éléments de la couverture ont un comportement différent, ce qui influence leur perméabilité à l'air que ce soit pour un flux sortant ou un flux entrant. Nous pensons que pour un changement rapide du sens de l'écoulement à travers la couverture les coefficients relatifs à un flux entrant ou sortant se rapprochent. Ce phénomène peut être observé dans la zone de décollement et au voisinage de la ligne de recollement. Les coefficients de perméabilité à l'air de la couverture sont différents par zone, et l'analyse basée sur une perméabilité uniforme est par conséquent absurde.

Pour une étude d'étanchéité à l'eau, l'existence d'une lame d'eau de ruissellement adoucit l'effet des caractéristiques de l'écoulement d'air externe sur les coefficients de perméabilité. L'intensité de pluie paraît le seul paramètre influençant ces coefficients pour une toiture à pentes.

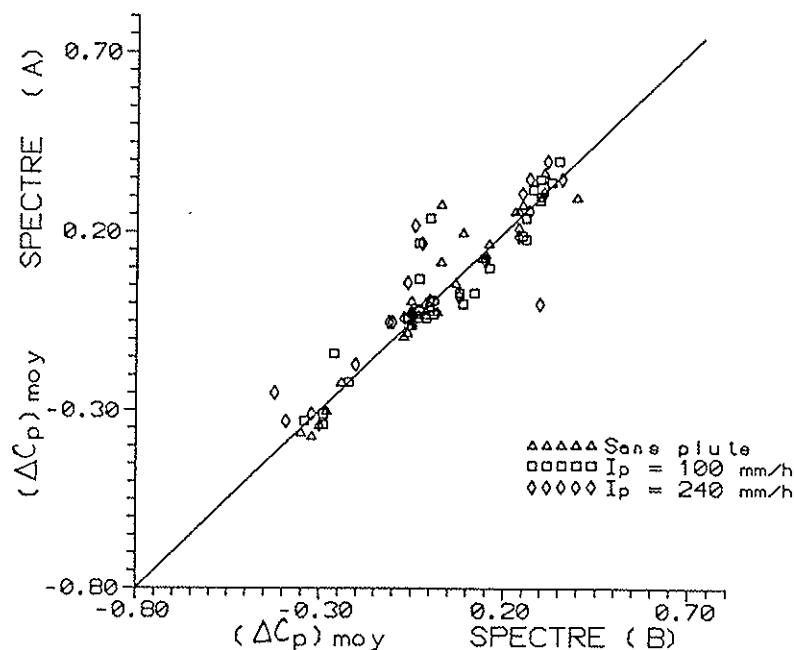


Figure 5.27. : Effet de la distribution spectrale.
Etude de cas : $\bar{U} = 16 \text{ m/s}$ $I_x = 10\%$.

5.3.4. Paramètre d'influence sur la perméabilité à l'air des couvertures (cas d'une couverture ardoise).

L'analyse précédente montre que la pluie a tendance à diminuer la perméabilité à l'air des zones en surpression, ce qui suppose une modification du coefficient C pour un flux entrant (dans la suite de l'exposé on appellera ce coefficient " C_{in} ").

Cette influence a été étudiée à l'aide d'un programme de calcul du coefficient " C_{in} ", en régime stationnaire qui repose sur les hypothèses suivantes :

- coefficient C (pour un flux sortant) et l'exposant N invariables.

Le coefficient " C_{in} " calculé pour différents fichiers ($\bar{U} = 9 \text{ m/s}$, toiture sèche) varie dans une gamme de ± 0.00026 autour d'une valeur moyenne de 0.00374 (cf. tableau 5.3. et figure 5.28.), ce qui reste globalement dans la gamme de valeur mesurée sur banc (0.00360 ± 0.00040).

I_x	10 %	20 %	24 %	33 %
série de mesure n°1	0.00350	0.00402	0.00405	0.000350
série de mesure n° 2	0.00348	0.00385	0.00400	0.00354

Tableau 5.3. : Calcul de " C_{in} " ($\bar{U} = 9 \text{ m/s}$, toiture sèche).

Sur la figure 5.28., on peut considérer comme négligeable l'effet de l'intensité de turbulence du vent simulé sur la perméabilité de la toiture¹. On constate sur la même figure une diminution de l'ordre de 50 % sur la valeur de " C_{in} " sous l'effet de la pluie (cas de $I_p = 100$ mm/h).

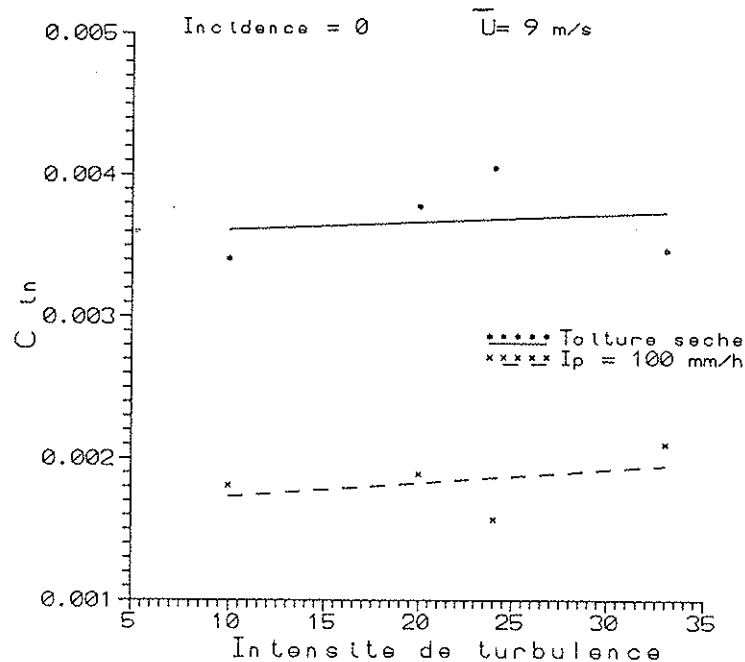


Figure 5.28. : Effet de l'intensité de turbulence sur les valeurs de " C_{in} "
calculées en absence et en présence de pluie (cas : $\bar{U} = 9$ m/s).

Le calcul de " C_{in} ", pour différents cas où seul le paramètre vitesse moyenne $\bar{U}$ varie, nous a permis d'avoir une idée de la sensibilité de la perméabilité à l'air de la couverture dans la zone de recollement. Nous constatons qu'en présence de pluie, l'effet de la vitesse du vent est négligeable (cf. figure 5.29.). Sur la même figure on note une diminution de la perméabilité à l'air lorsque la vitesse du vent augmente. Ce phénomène explique l'écart entre $(\overline{\Delta C_p})_{\text{toiture mouillée}}$ et $(\overline{\Delta C_p})_{\text{toiture sèche}}$, plus important pour les faibles vitesses que pour les grandes, observée sur la figure 5.21.

¹D'autres calculs ont conduit à la même constatation, en considérant C comme constant et N comme variable.

Nous ne pouvons pas en tirer une formule empirique décrivant l'influence de la vitesse tangentielle en absence de pluie, vu d'une part le faible nombre de fichiers et d'autre part l'absence de mesure de cette vitesse au niveau du toit (le champ de vitesse est différent selon la zone ; l'effet de la vitesse ne se globalise pas sur toute la surface du toit). L'analyse poussée de l'influence du vecteur de la vitesse tangentielle sur la perméabilité à l'air de la couverture nécessite la réalisation d'un banc de mesures adapté (cf. annexe 4).

Il est à noter que l'observation faite sur une couverture en tuiles montre l'effet contraire [33, 34] : augmentation de la perméabilité avec la vitesse tangentielle (cf. paragraphe 2.1.4.). En effet, l'influence de la vitesse tangentielle sur la perméabilité à l'air d'une couverture à petits éléments, est non seulement liée au champ de ΔP locale, mais aussi au degré de liberté donné à chaque élément de la couverture (le sens et l'importance des déplacements possibles sous l'influence de ΔP locale).

Au vu des résultats précédents, *on peut considérer comme négligeable l'effet de la vitesse moyenne $\bar{U}$ et l'intensité de turbulence I_x sur la valeur de " C_{in} " en présence de pluie.*

Le calcul de ce coefficient, pour différentes intensités de pluie, tous cas confondus (quel que soit $\bar{U}, I_x$), nous a conduit à proposer une formule empirique qui donne l'évolution de " C_{in} " avec l'intensité de pluie (cf. figure 5.30.) :

$$(C_{in})_{avec\ pluie} = (C_{in})_{mesure\ banc} F(I_p) \quad (V.1.)$$

avec
$$F(I_p) = \frac{A}{I_p + B} + C$$

Où :

$$A = 22.4 \text{ mm/h}$$

$$B = 32 \text{ mm/h}$$

$$C = 0.30 \text{ [adimensionnel]}$$

La gamme d'erreur relative maximale est de 10 %, ce qui représente en valeur absolue (± 0.00016).

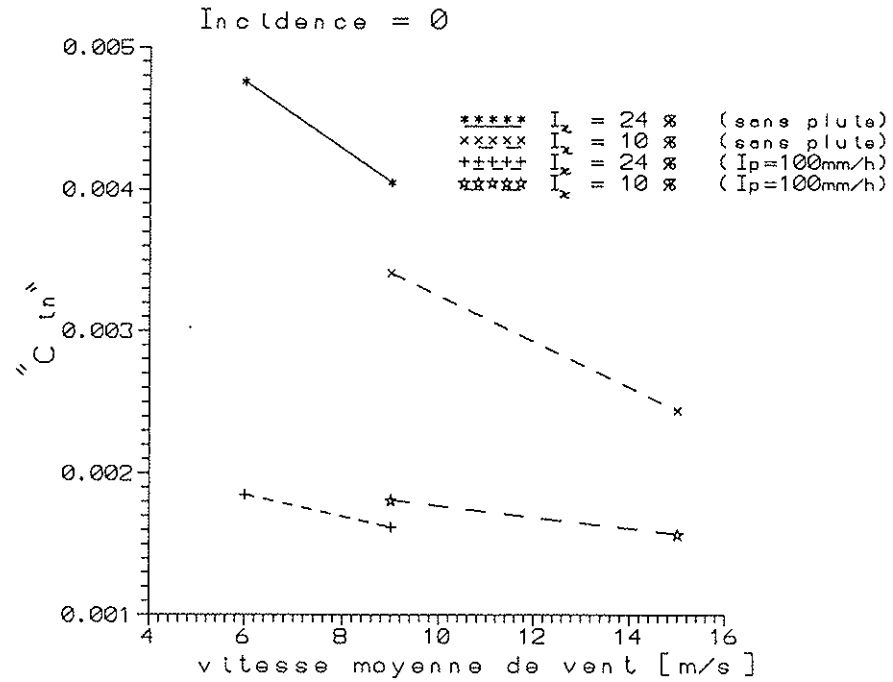


Figure 5.29. : Effet de la vitesse moyenne de vent $\bar{U}_{ref}$ mesurée en amont du modèle.

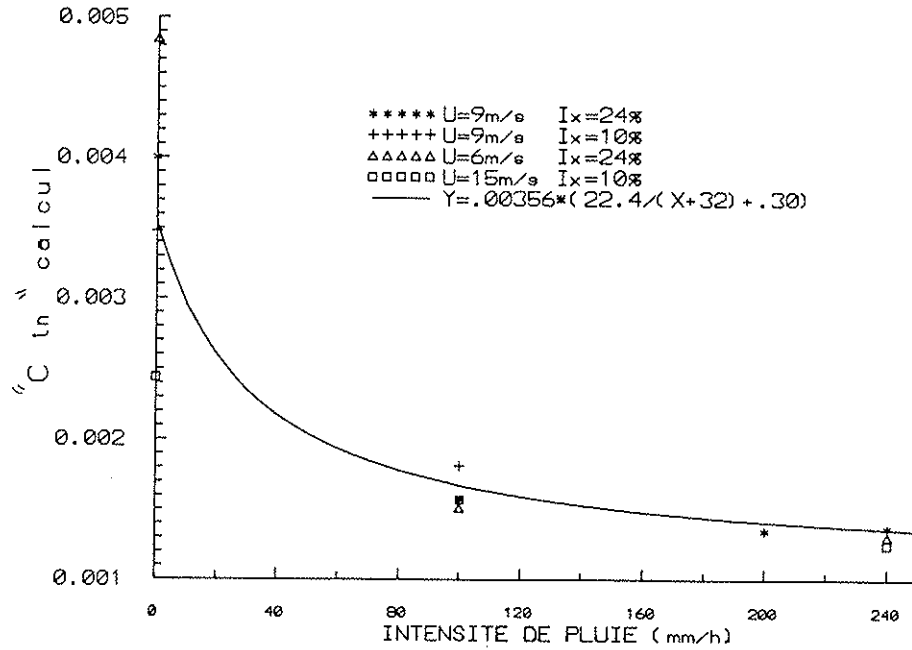


Figure 5.30. : Effet de l'intensité de pluie sur " C_{in} ",
tous cas confondus.

5.4. Conclusion.

L'étude paramétrique exposée dans ce chapitre met en évidence les points suivants :

- Le champ de pression différentielle sur le toit est directement influencé par la variation de la perméabilité à l'air de la couverture. On peut mettre en évidence l'importance du rapport des perméabilités à l'air associées au flux entrant ou sortant.
- L'existence d'une lame d'eau de ruissellement rend insensible la perméabilité à l'air de la couverture aux caractéristiques d'écoulement d'air externe (vitesse moyenne, intensité de turbulence et gamme des fréquences de fluctuations).
- La perméabilité à l'air de la couverture pour un flux entrant diminue en présence de la pluie. Une relation empirique qui donne son évolution en fonction de l'intensité de pluie a été proposée.
- La présence d'une vitesse tangentielle joue fortement sur la perméabilité à l'air de la couverture en absence de pluie. Cette influence n'a pas été analysée finement et devra l'être au titre des travaux futurs sur le thème (cf. chapitre 6, paragraphe 6.4.).

La base de données obtenue par les mesures (sur banc et sur le modèle soufflerie climatique), et l'analyse associée nous permettent d'entreprendre le travail de validation du modèle numérique PICOMBLE, ce modèle calcule la pression interne dans un comble sans écran en sous-face.

6. VALIDATION DU MODELE NUMERIQUE

6.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la validation du programme du calcul de la pression interne dans les combles [PICOMBLE] qui concerne le cas d'une couverture sans écran et aux tests numériques du programme [ECRANS] relatif au cas d'une couverture avec écran souple ou rigide en sous-face.

Dans les deux cas, les données des champs de pression externe proviennent de mesures effectuées à l'échelle 1 dans la soufflerie climatique (cf. chapitre 5).

6.2. Validation du modèle du calcul de la pression interne dans les combles

PICOMBLE calcule la pression interne en régime stationnaire ou quasi-stationnaire.

Le calcul dans l'option régime stationnaire est 5 fois plus rapide qu'en régime quasi-stationnaire. Il augmente la gamme d'erreur du calcul de 20 % et ne reproduit pas la fréquence de coupure du système. Cette option est intéressante quand on souhaite des ordres de grandeur, car valeur moyenne et écart-type sont peu sensibles au régime de calcul.

La confrontation calcul/mesure vraie grandeur, porte sur le calcul en régime quasi-stationnaire, pour les deux cas avec et sans pluie. Le cas sans pluie utilise les coefficients de perméabilité mesurés sur banc (cf. chapitre 5, paragraphe 5.2.2.). Le cas avec pluie, utilise la relation (V.1), exposée au chapitre précédent, qui tient compte de l'intensité de pluie.

6.2.1. Comparaison calcul/mesure vraie grandeur

Les figures 6.1. à 6.6 comparent les pressions internes mesurées et calculées en termes de variations temporelles, grandeurs statistiques, et spectres d'énergie pour les cas traités, que ce soit avec ou sans pluie.

Les variations temporelles et les densités de probabilité (figures 6.1. à 6.4.) associées aux pressions internes calculées et mesurées évoluent de la même façon. La densité de probabilité (figures 6.2. et 6.4.) montre que l'écart entre calcul et mesure se situe plutôt pour les faibles valeurs de la pression interne autour de zéro.

La densité spectrale des fluctuations calculées est plus faible que celle issue des valeurs mesurées (cf. tableau 6.1. et figures 6.5. et 6.6.). Sur les mêmes figures, on constate que la cohérence entre les spectres de la pression interne calculée et mesurée, est supérieure à 0.9 dans la gamme $[0, 0.8]$ Hz. Il est à noter qu'au-delà de cette gamme, l'énergie de fluctuations de la pression interne est faible voire négligeable.

$U=9\text{m/s}$ $I_u=33\%$ sans pluie

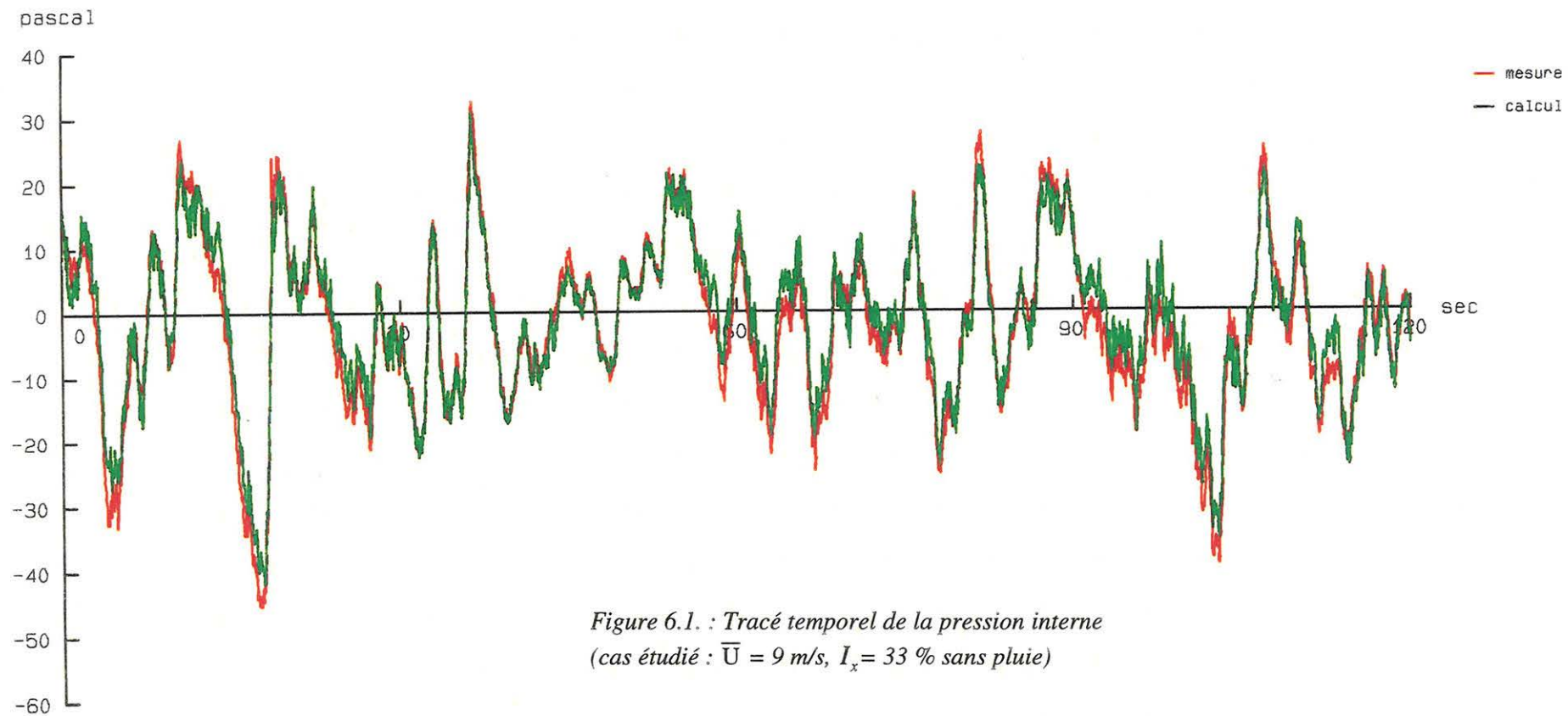


Figure 6.1. : Tracé temporel de la pression interne
(cas étudié : $\bar{U} = 9 \text{ m/s}$, $I_x = 33 \%$ sans pluie)

Les coefficients de perméabilité à l'air de la couverture
sont :

Pour un flux entrant : $C = 0.00360$ $N = 0.65$

Pour un flux sortant : $C = 0.00300$ $N = 0.65$

DENSITE DE PROPABILITE DE Cpi

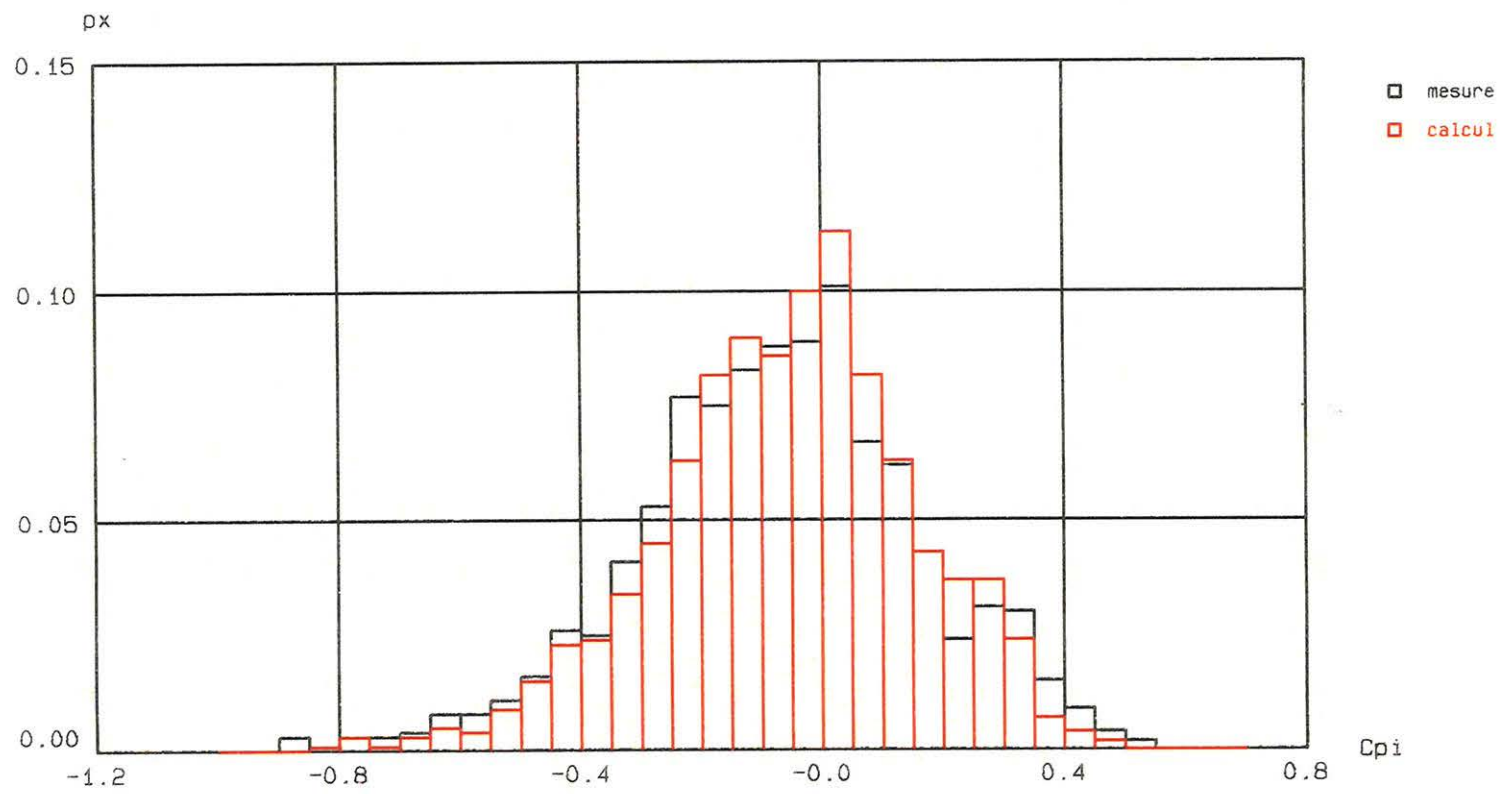


Figure 6.2. : Comparaison entre le calcul et la mesure
(cas : $\bar{U} = 9 \text{ m/s}$, $I_x = 33 \%$, sans pluie)

$U=9\text{m/s}$ $I_u=24\%$ $I_p=100\text{mm/h}$

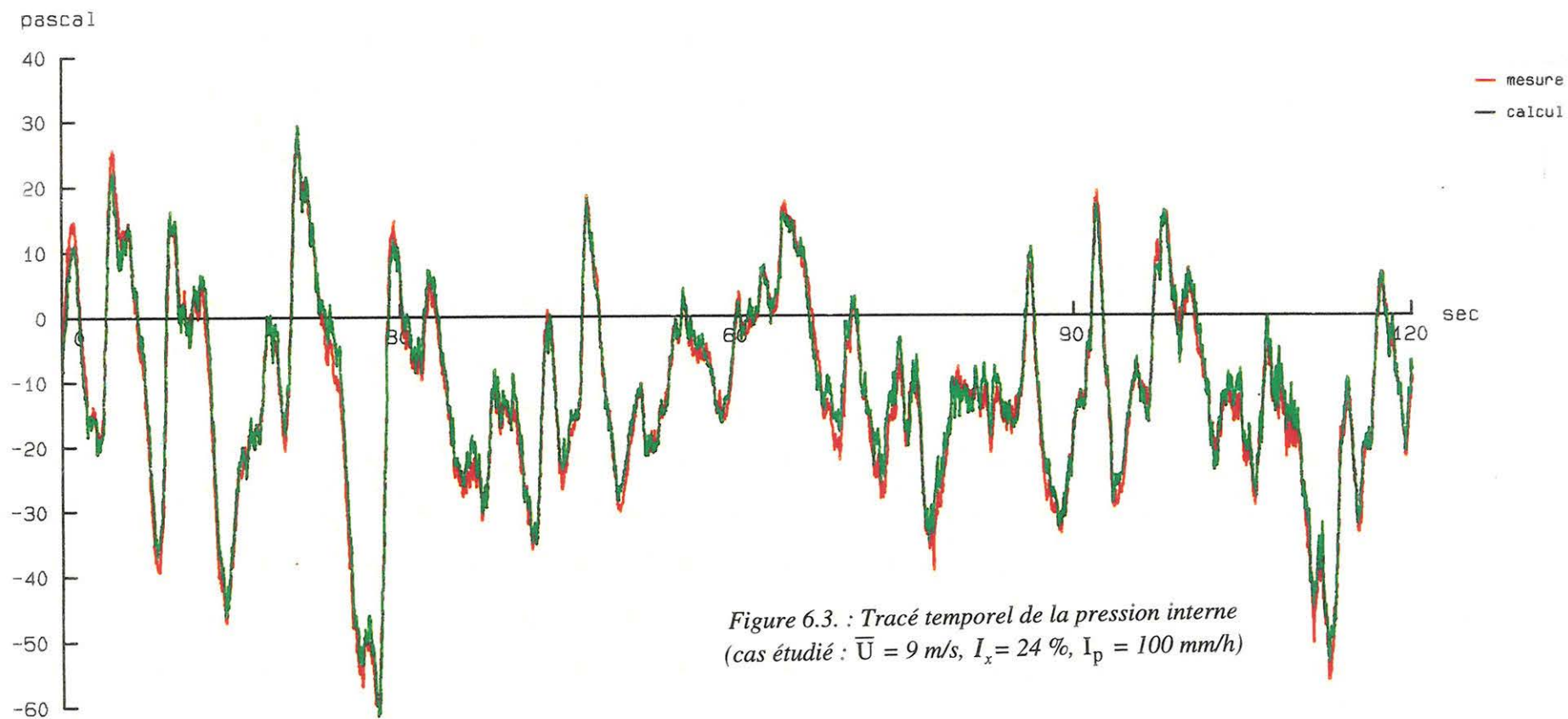


Figure 6.3. : Tracé temporel de la pression interne
(cas étudié : $\bar{U} = 9 \text{ m/s}$, $I_x = 24 \%$, $I_p = 100 \text{ mm/h}$)

Les coefficients de perméabilité à l'air sont :

pour un flux entrant : $C = 0.00167$ $N = 0.65$

pour un flux sortant : $C = 0.00300$ $N = 0.65$

DENSITE DE PROPABILITE DE C_{pi}

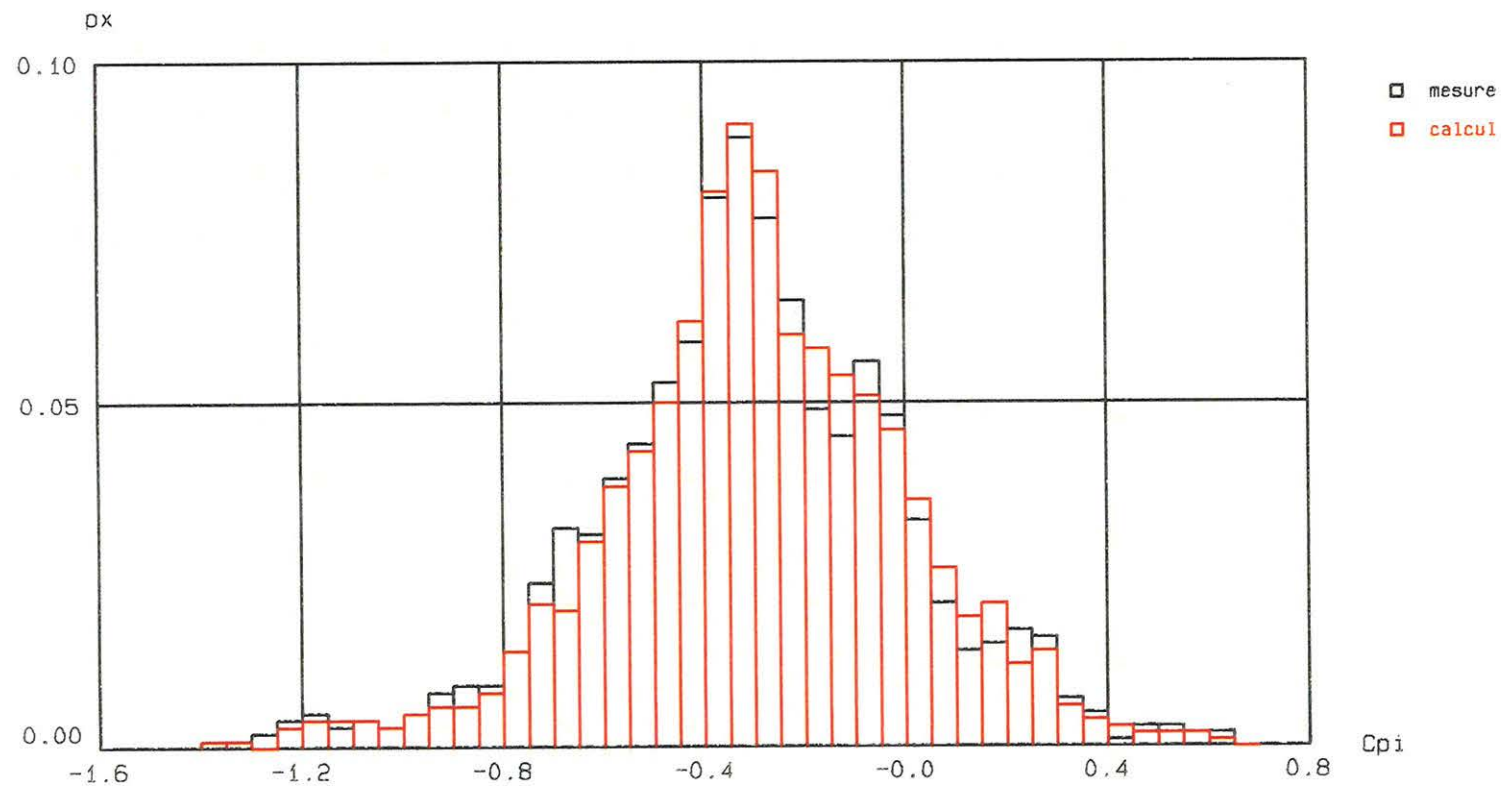


Figure 6.4. : Comparaison entre le calcul et la mesure
(cas : $\bar{U} = 9 \text{ m/s}$, $I_x = 24 \%$, avec pluie $I_p = 100 \text{ mm/h}$)

U = 9m/s Ix=10% sans pluie				
	moy	E.T.	max	min
mesure	.02	.06	.22	-.23
calcul	.03	.06	.20	-.26
calcul-mesure	.01	.03	.13	-.12

U = 9m/s Ix=33% sans pluie				
	moy	E.T.	max	min
mesure	-.02	.23	.65	-.78
calcul	-.01	.21	.63	-.71
calcul-mesure	.01	.06	.20	-.17

U=6m/s Ix=24% Ip=100mm/h				
	moy	E.T.	max	min
mesure	-.346	.514	1.497	-2.150
calcul	-.282	.501	1.596	-2.195
calcul-mesure	.064	.099	.371	-.390

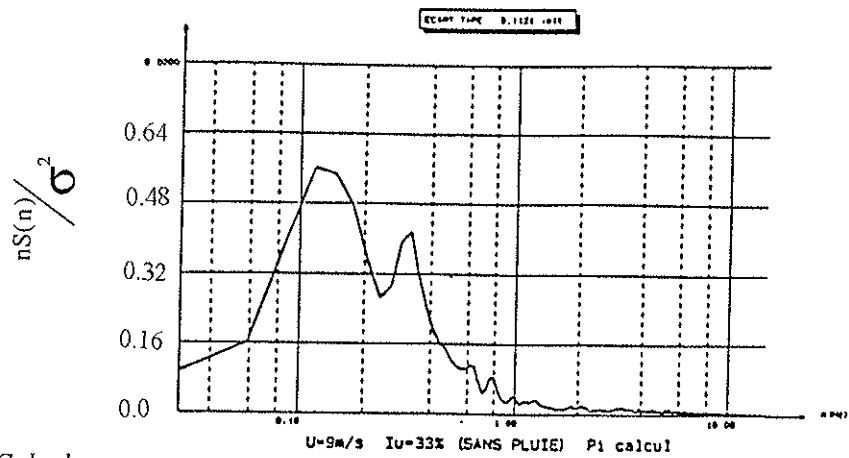
U=15m/s Ix=10% Ip=200mm/h				
	moy	E.T.	max	min
mesure	-.384	.102	.010	-.657
calcul	-.365	.105	.028	-.644
calcul-mesure	.020	.020	.046	-.042

U=6m/s Ix=24% sans pluie				
	moy	E.T.	max	min
mesure	-.328	.421	1.235	-1.536
calcul	-.408	.430	1.230	-1.681
calcul-mesure	-.080	.082	.172	-.385

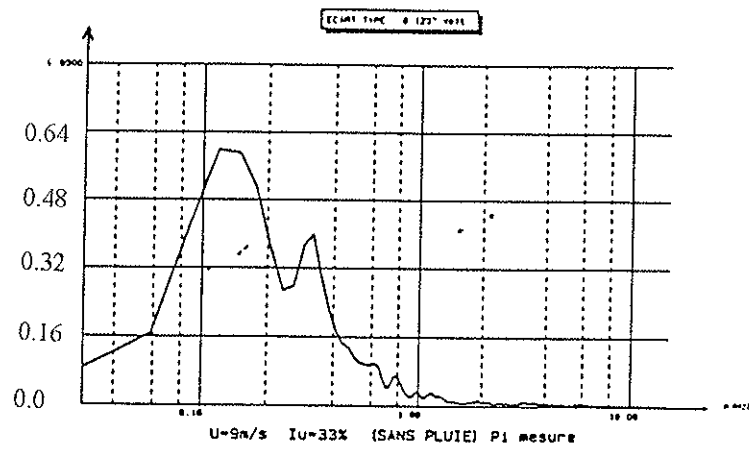
U=15m/s Ix=10% sans pluie				
	moy	E.T.	max	min
mesure	-.401	.101	-.018	-.684
calcul	-.371	.093	-.045	-.648
calcul-mesure	.030	.018	.077	-.054

U=9m/s Ix=24% Ip=100mm/h				
	moy	E.T.	max	min
mesure	-.282	.302	.725	-1.407
calcul	-.252	.291	.737	-1.409
calcul-mesure	.030	.045	.186	-.179

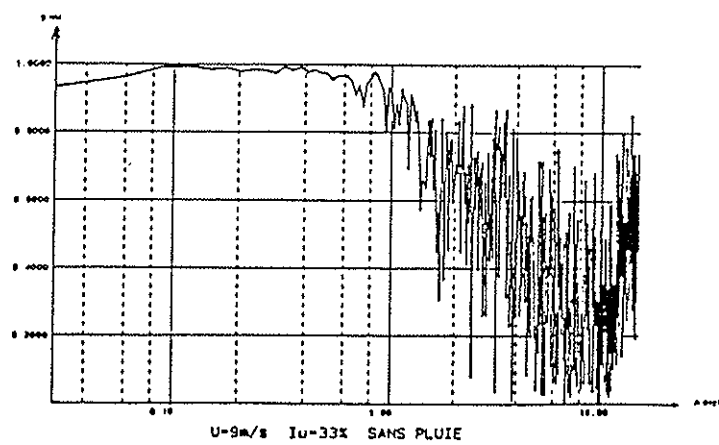
Tableau 6.1. : Comparaison en terme des coefficients de pression
calculés et mesurés pour différents cas d'essai



a) Calcul

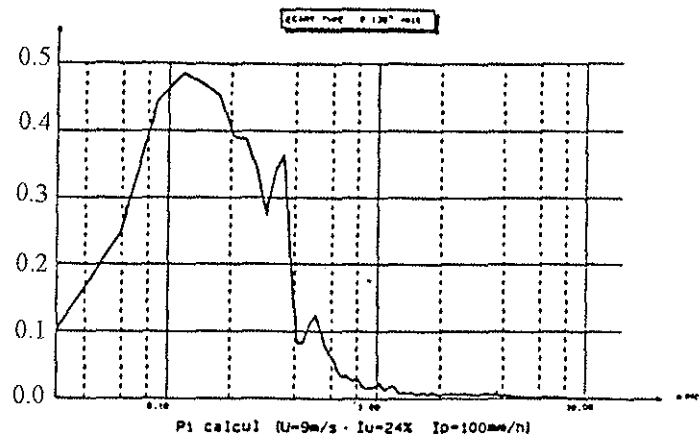


b) Mesure

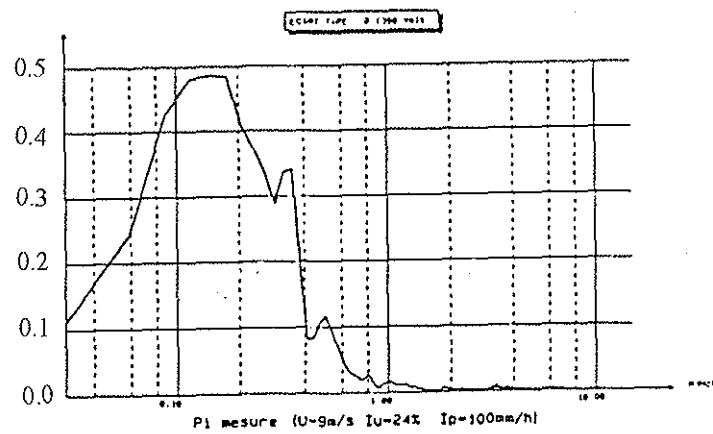


c) Cohérence

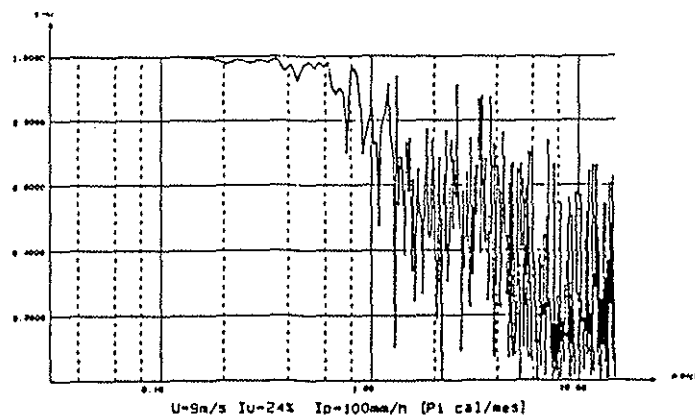
Figure 6.5. : Densités spectrales de la pression interne calculée et mesurée et leur coefficient de corrélation (cas sans pluie).



a) Calcul



b) Mesure



c) Cohérence

Figure 6.6. : Densités spectrales des fluctuations de la pression interne calculée et mesurée et leur coefficient de corrélation(cas avec pluie).

Cette étude étant destinée à reproduire le signal de la différence de pression ($P_e - PI$), nous avons comparé $(\Delta C_p)_{mesure}$ et $(\Delta C_p)_{calcul}$, où :

$$(\Delta C_p)_{mesure} = \frac{P_e - PI_{mesure}}{\frac{1}{2} \rho \bar{U}_{ref}^2}$$

$$(\Delta C_p)_{calcul} = \frac{P_e - PI_{calcul}}{\frac{1}{2} \rho \bar{U}_{ref}^2}$$

Nous notons, sur les graphes de la figure 6.7 que le calcul sous estime les valeurs de $\overline{\Delta C_p}$ et $\Delta C_p'$ au plus de 0.01. Les valeurs de pic $\hat{\Delta C_p}$, $\check{\Delta C_p}$ sont estimées avec un écart de ± 0.10 , ce qui représente une erreur relative moyenne de $\pm 5 \%$ Il est à remarquer que cette erreur est du même ordre de grandeur que l'erreur de mesure estimée dans le chapitre 4. A noter en outre que l'erreur relative que nous trouvons entre mesure/calcul est bien inférieure à l'erreur mesure/mesure comparant les résultats de deux essais successifs effectués en soufflerie climatique dans les mêmes conditions (cf . chapitre 5, page 14). La distribution spectrale des fluctuations est bien reproduite dans les zones turbulentes, ce n'est pas le cas dans les zones qui ne le sont pas (sillage) (cf. figure 6.9.).

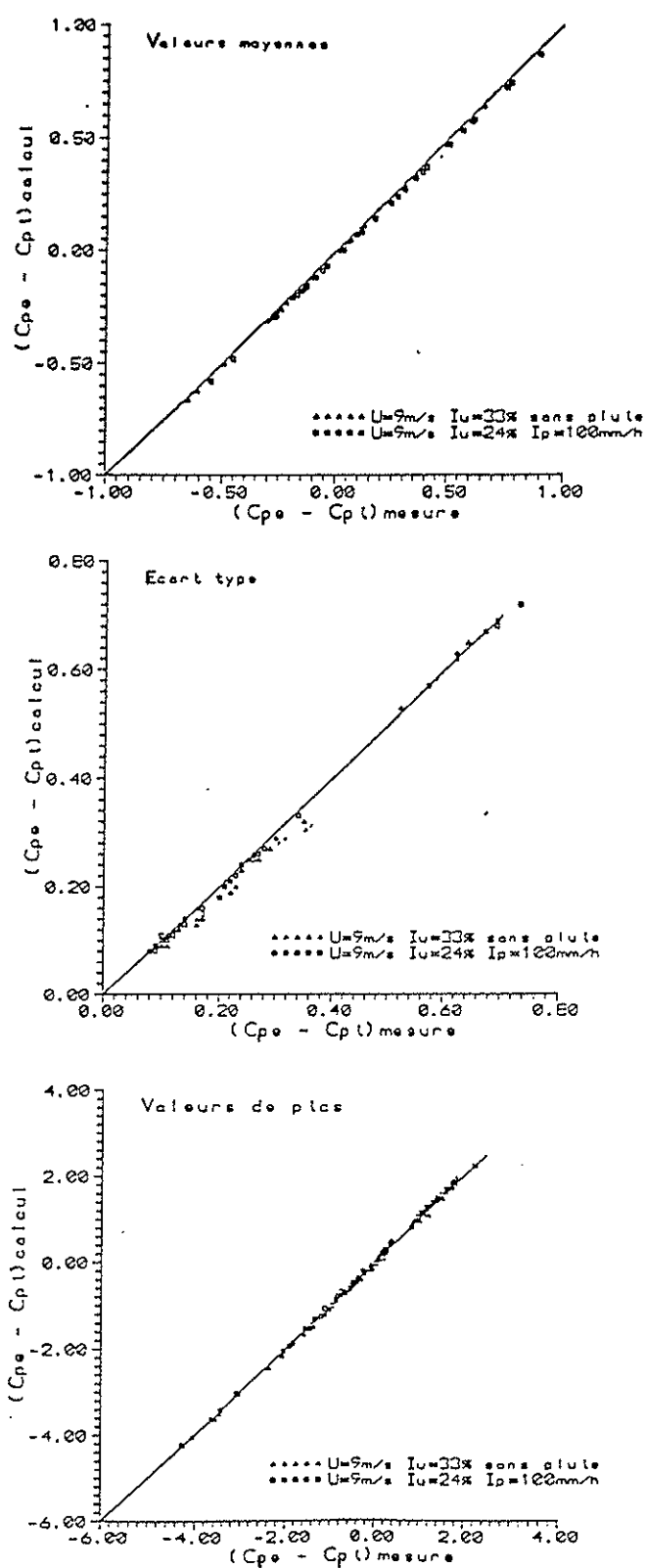
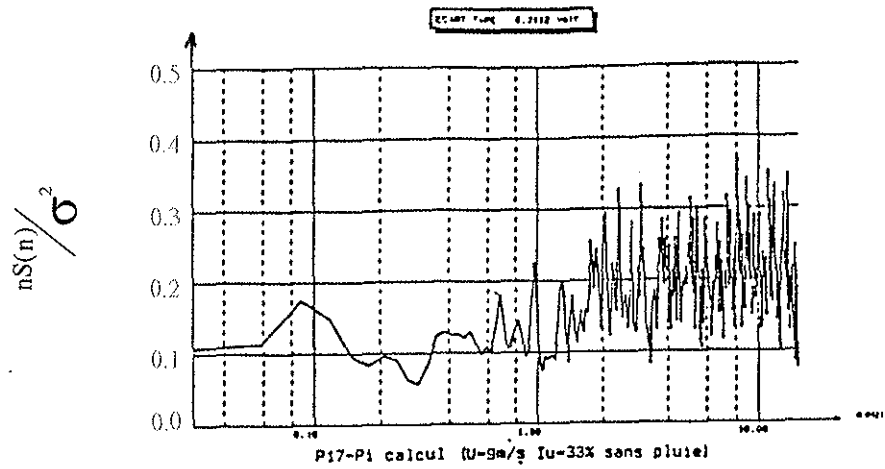
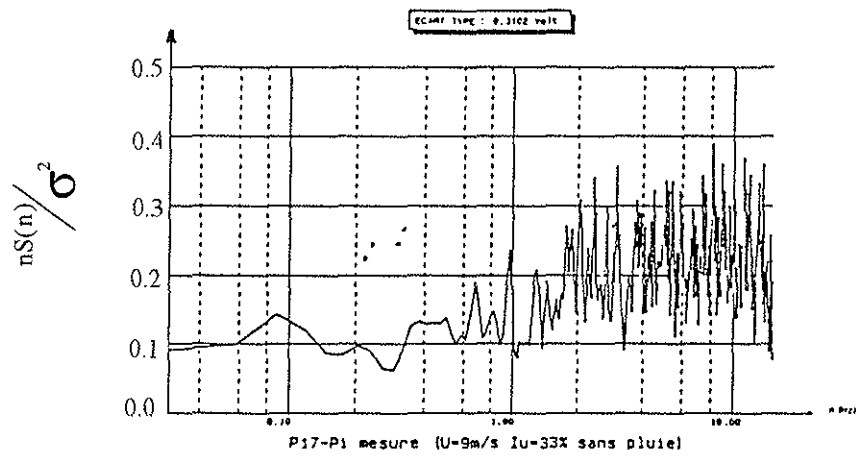


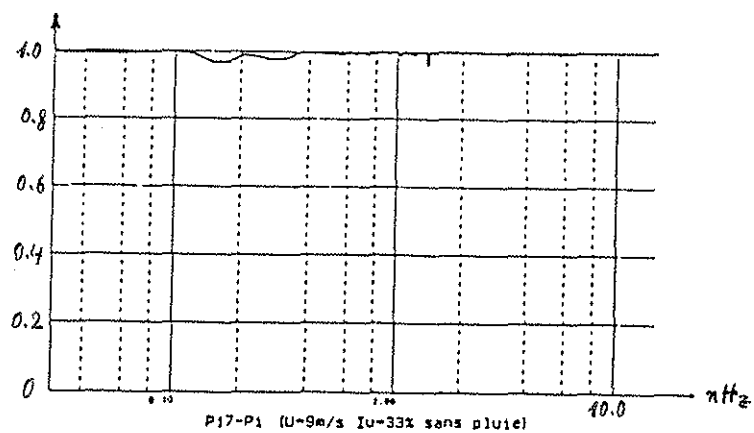
Figure 6.7. : Comparaison entre le calcul et la mesure de la différence de pression entre intérieur et extérieur.



a) Calcul

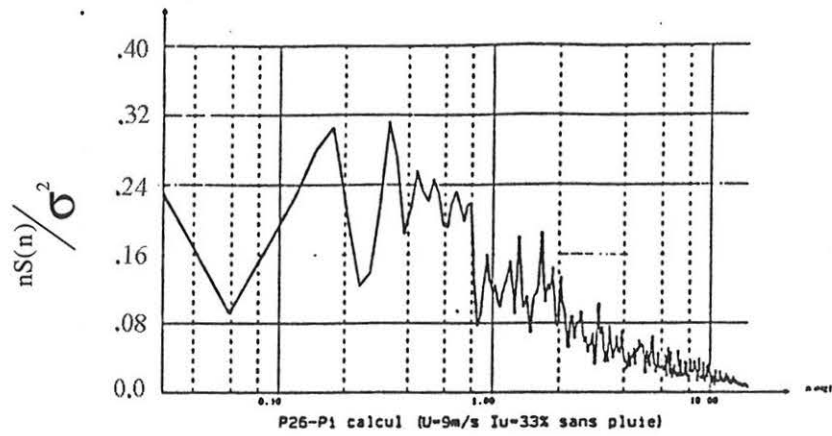


b) Mesure

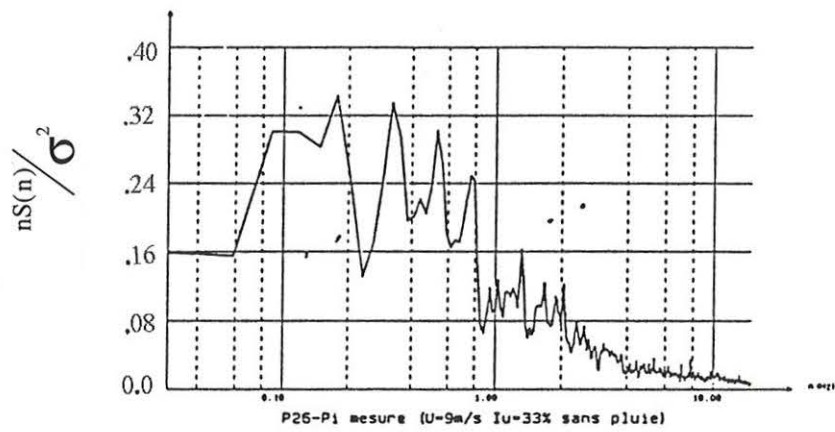


c) Cohérence

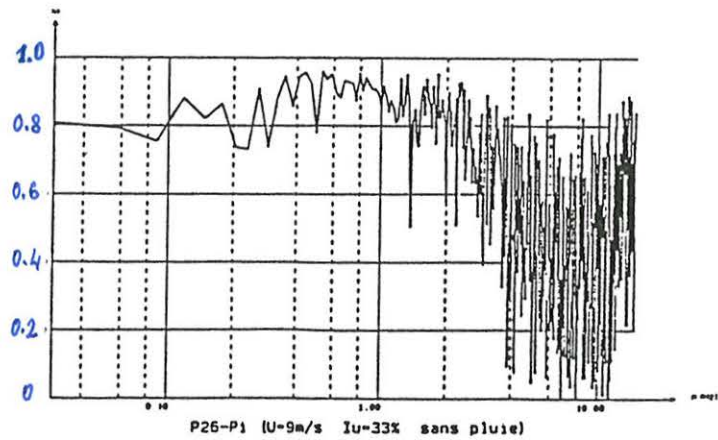
Figure 6.8. : Densité spectrale de $(P_e - P_l)$, point dans la zone de décollement



a) Calcul



b) Mesure



c) Cohérence

Figure 6.9. : Densité spectrale des fluctuations de la différence de pression ($P_e - P_I$)
le point de mesure se situe dans le sillage

Estimation de l'erreur du calcul :

Dans ce but nous avons calculé la différence des pressions internes calculée et mesurée ($PI(t)_{calcul} - PI(t)_{mesure}$). Cette différence, appelée "l'erreur de calcul" sur PI , est une fonction aléatoire du temps. Sa fonction de répartition P_x représente la probabilité pour que l'erreur soit inférieure à x (figure 6.10.). Nous calculons alors la probabilité pour que l'erreur soit incluse dans la gamme $[x_1, x_2]$ par $P_{x_2} - P_{x_1}$.

La courbe de la figure 6.10. montre que, en présence de la pluie, la probabilité est de 99 % pour que l'erreur soit incluse dans la gamme $[-6, +6]$ Pascals, quelle que soit la vitesse et l'intensité de turbulence du vent simulé. Elle est de 90 % pour une gamme $[-4, +4]$ Pascals. Les valeurs moyennes restant très proches (écart inférieur à 1.5 Pa). Si l'on note que pour une vitesse moyenne $\bar{U} = 15 \text{ m/s}$, la pression interne a pour valeur moyenne -50 Pascals et fluctue dans la gamme $[-90, +2]$ Pascals et pour $\bar{U} = 6 \text{ m/s}$, $\bar{PI} = 8$ Pascals et $PI(t) \in [-40, +30]$, on peut conclure que l'écart calcul/mesure est relativement plus important pour les faibles vitesses que pour les grandes.

En absence de pluie, la vitesse moyenne (d'un flux tangentiel) et sa gamme de fluctuations influent sur la perméabilité à l'air de la couverture (cf. chapitre 5, paragraphe 5.3.). Ce phénomène n'est pas pris en compte par le calcul. C'est pourquoi nous notons une surestimation de PI lorsque la vitesse moyenne du vent augmente (cf. figure 6.10.).

Pour une vitesse moyenne de vent (mesurée en amont du modèle à la hauteur du faîtage) $\bar{U} = 15 \text{ m/s}$, le calcul surestime $\bar{PI}$ de 5 Pascals (10 % de la valeur mesurée). Pour une vitesse moyenne $\bar{U} = 6 \text{ m/s}$, le calcul sous estime $\bar{PI}$ de près de 2 Pascal (20 % de la valeur mesurée). Dans tous les cas de figures l'erreur de calcul ne dépasse pas 10 Pascals.

FONCTION DE REPARTITION DE L'ECART (Pi) calcul- (Pi) mesure

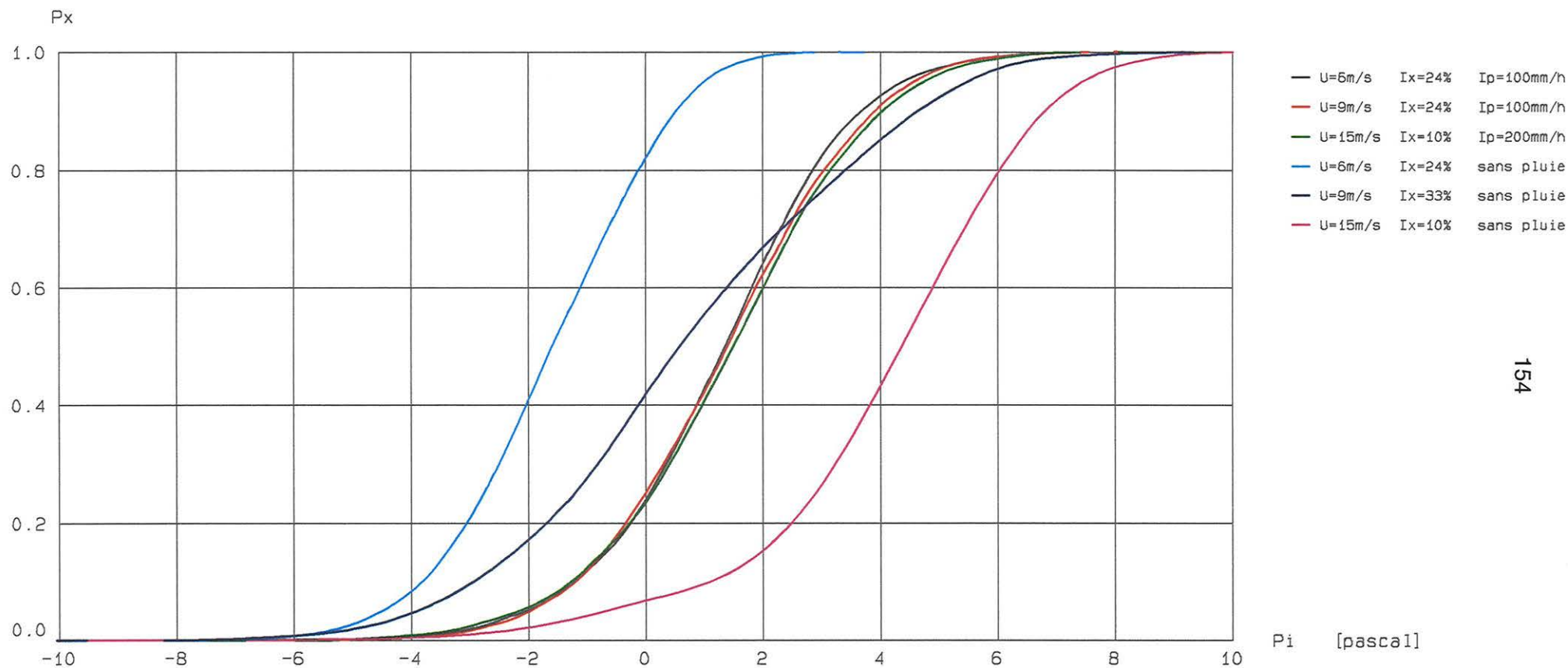


Figure 6.10. : Fonction de répartition de l'erreur de $\Delta PI = PI_{calcul} - PI_{mesure}$

6.2.2. Conclusion

Le programme PICOMBLE qui calcule la pression interne dans les combles en absence d'un écran en sous-face de la couverture, reproduit bien l'évolution temporelle du signal.

L'écart entre la pression interne calculée et celle mesurée est d'autant plus important que la pression est faible.

En présence de pluie, la probabilité pour que cet écart soit supérieur à 6 Pascals, en valeur absolue, est de 1 %, cela quelle que soit la vitesse moyenne, l'intensité de turbulence ou l'intensité de pluie.

On note que le modèle restitue assez correctement les fluctuations de différence de pression ($P_e - PI$) dans les zones turbulentes (décollement + recollement). Cette restitution est moins bonne dans le sillage (zone peu turbulente).

On constate enfin que les valeurs de pics en terme de différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur sont bien reproduites, (l'écart observé est nettement inférieur à celui entre deux mesures effectuées successivement en vraie grandeur dans les mêmes conditions), ceci étant intéressant pour l'analyse de perte d'étanchéité à l'eau des couvertures.

En absence de pluie, nous notons l'effet important de la vitesse sur la perméabilité à l'air (dans la zone de recollement), d'où la nécessité d'effectuer les mesures de la perméabilité à l'air d'une couverture en présence d'un flux tangentiel. Ces mesures couplées avec la souplesse du programme PICOMBLE, qui permet d'introduire des perméabilités différentes par zones, pourraient améliorer les résultats du calcul. Nous estimons comme suffisant le découpage de la couverture en 2 à 3 zones selon le sens et la valeur de la vitesse tangentielle.

6.3. Test numérique du modèle de calcul des pressions internes dans le cas d'un écran fixé en sous face de la couverture

Ce logiciel n'a pas été validé pour les raisons de disponibilités de la soufflerie climatique.

Seule une étude de sensibilité a été menée. Trois paramètres sont importants :

- l'échange entre la lame d'air et le volume du comble (perméabilité à l'air de l'écran) ;
- l'échange entre les deux lames d'air (relative à chacun des versants) au niveau du faîtage ;
- la flexibilité de l'écran.

Le logiciel permet de calculer les pressions internes dans la lame d'air (constituée de plusieurs cellules entre chevrons) et dans le volume du comble, pour deux cas :

1. La compressibilité de l'air dans les volumes est prise en compte. La déformation de l'écran est négligeable.
2. La déformation de l'écran est prise en compte. La compressibilité de l'air dans les volumes est négligeable.

La première solution, (correspondant au cas de l'écran rigide), a été utilisée pour l'étude de sensibilité aux échanges entre les lames d'air et le comble ainsi qu'entre les mailles constitutives de la lame d'air au niveau du faîtage.

La deuxième approche, qui correspond au cas d'écran souple, a servi pour l'étude de l'influence de la flexibilité de l'écran.

6.3.1. Description du cas test

Pour faciliter l'analyse et l'interprétation des résultats on a utilisé le cas d'école suivant :

La lame d'air est constituée de quatre mailles. Le volume de chaque maille est de 0.16 m^3 . Le volume du comble est de 20 m^3 . Les surfaces limitant chacune des mailles sont : $S_x = 0.11 \text{ m}^2$, $S_y = 0.056 \text{ m}^2$, $S_z = 4.5 \text{ m}^2$

La pression externe est considérée comme homogène au droit de chacune des mailles (cf. figure 6.11)

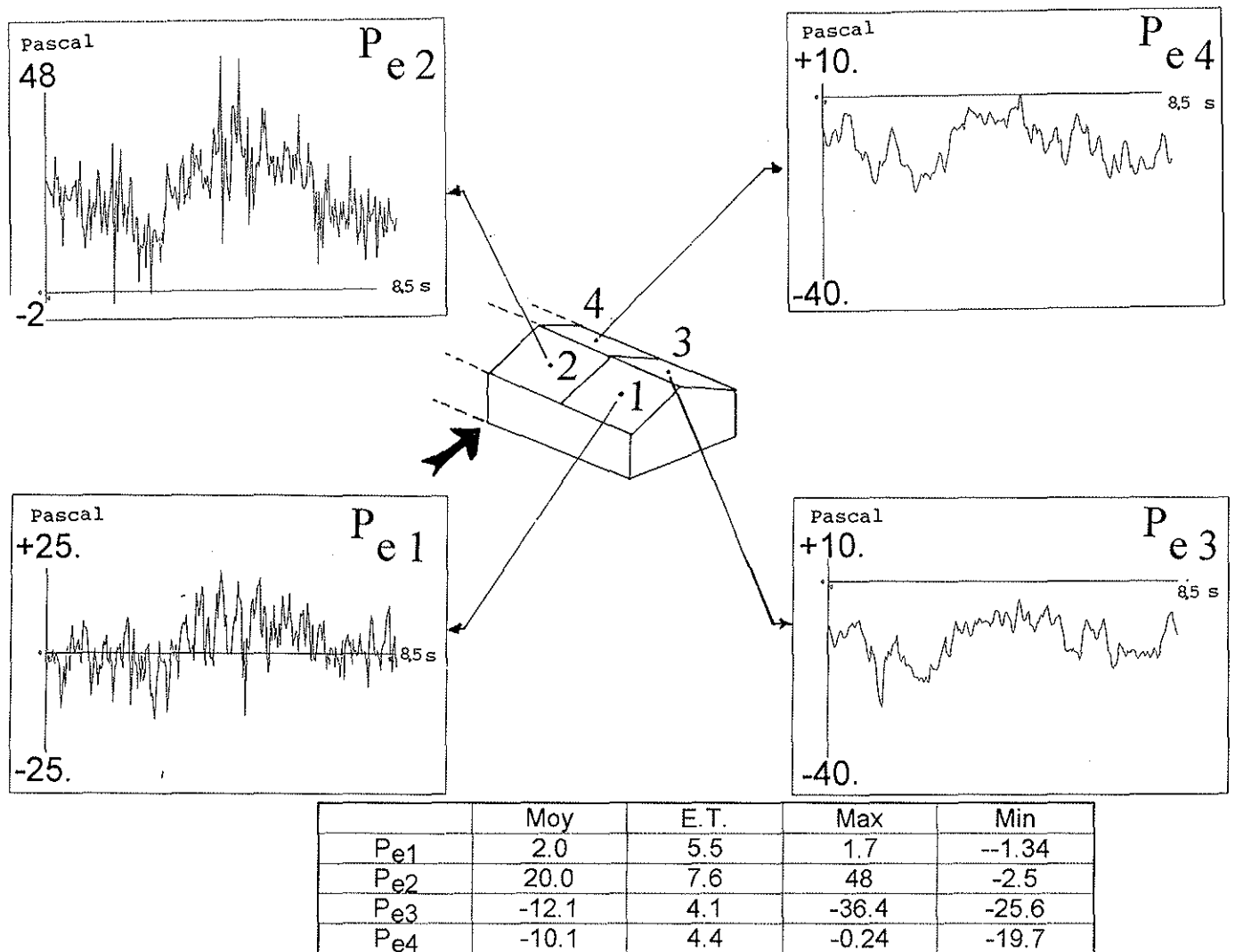


Figure 6.11. : Caractéristiques du cas test.

La perméabilité à l'air de l'écran est modélisée par :

$$Q = C_0 S_z \Delta P^{N_0}$$

Le calcul est effectué pour différentes valeurs de C_0 (0.00017, 0.00050, 0.00100), N_0 étant égale à l'unité pour les deux premières valeurs (écoulement laminaire) et à 0.8 pour le troisième cas (écoulement mixte).

L'échange entre les mailles selon l'axe x est modélisé par :

$$Q_x = 0.3 S_x \Delta P^{0.5}$$

Les coefficients (0.3) et (0.5) correspondent à la géométrie des ouvertures entre les liteaux (cf. chapitre 3, figure 3.2.).

L'échange entre les mailles selon l'axe y est modélisé par :

$$Q_y = C_y S_y \Delta P^{N_y}$$

Différents cas ont été étudiés :

1 - $C_y = 0.0001$	$N_y = 1$ (écoulement laminaire)
2 - $C_y = 0.001$	$N_y = 1$ (écoulement laminaire)
3 - $C_y = 0.01$	$N_y = 0.8$ (écoulement mixte)
4 - $C_y = 0.2$	$N_y = 0.5$ (écoulement turbulent)

Les deux premiers cas correspondent à une bonne fermeture au niveau du faîtage (recommandé par le DTU). Les deux derniers cas correspondent à une mauvaise fermeture.

La déformation de l'écran est modélisée par l'équation (III.25) (exposée dans l'analyse théorique du chapitre 3, page 62), qui donne la variation volumique de la maille par

$$\Delta V_0 = A * \Delta P^{1/3}$$

avec

$$A = \frac{BL_0^2}{6} \left(\frac{3L_0}{E.e_0} \right)^{1/3} \quad (\text{voir remarque 1})$$

A partir de cette équation nous avons déterminé une gamme de données en faisant varier seulement le module d'Young E :

pour : $L_0 = 1.5$ m, $B = 3$ m, $e_0 = 0.0005$

$E = 1000$ MPa	→	$\Delta V_o = 0.0234 \Delta P^{1/3}$	$\left[K_a / K_v \approx 4875 \Delta P ^{-2/3} \right]$
$E = 2000$ MPa	→	$\Delta V_o = 0.0186 \Delta P^{1/3}$	$\left[K_a / K_v \approx 3875 \Delta P ^{-2/3} \right]$
$E = 5000$ MPa	→	$\Delta V_o = 0.0135 \Delta P^{1/3}$	$\left[K_a / K_v \approx 2810 \Delta P ^{-2/3} \right]$
$E = 10\,000$ MPa	→	$\Delta V_o = 0.0110 \Delta P^{1/3}$	$\left[K_a / K_v \approx 2300 \Delta P ^{-2/3} \right]$

6.3.2. L'effet de l'écran et sa perméabilité à l'air.

La figure 6.12. donne une comparaison entre les résultats obtenus, pour les cas sans écran, et avec écran (en utilisant différentes perméabilités à l'air), en terme des valeurs moyennes de la différence de pression ($\overline{\Delta P} = \overline{P_e} - \overline{P_i}$).

Sur cette figure nous notons que la présence de l'écran diminue $\overline{\Delta P}$ de 25 % à 60 % (par rapport au cas sans écran). Plus la perméabilité de l'écran est faible plus $\overline{\Delta P}$ et $\hat{\Delta P}$ diminuent (cf. tableau 6.2.). Les fluctuations de la pression interne dans le comble augmentent avec la perméabilité de l'écran.

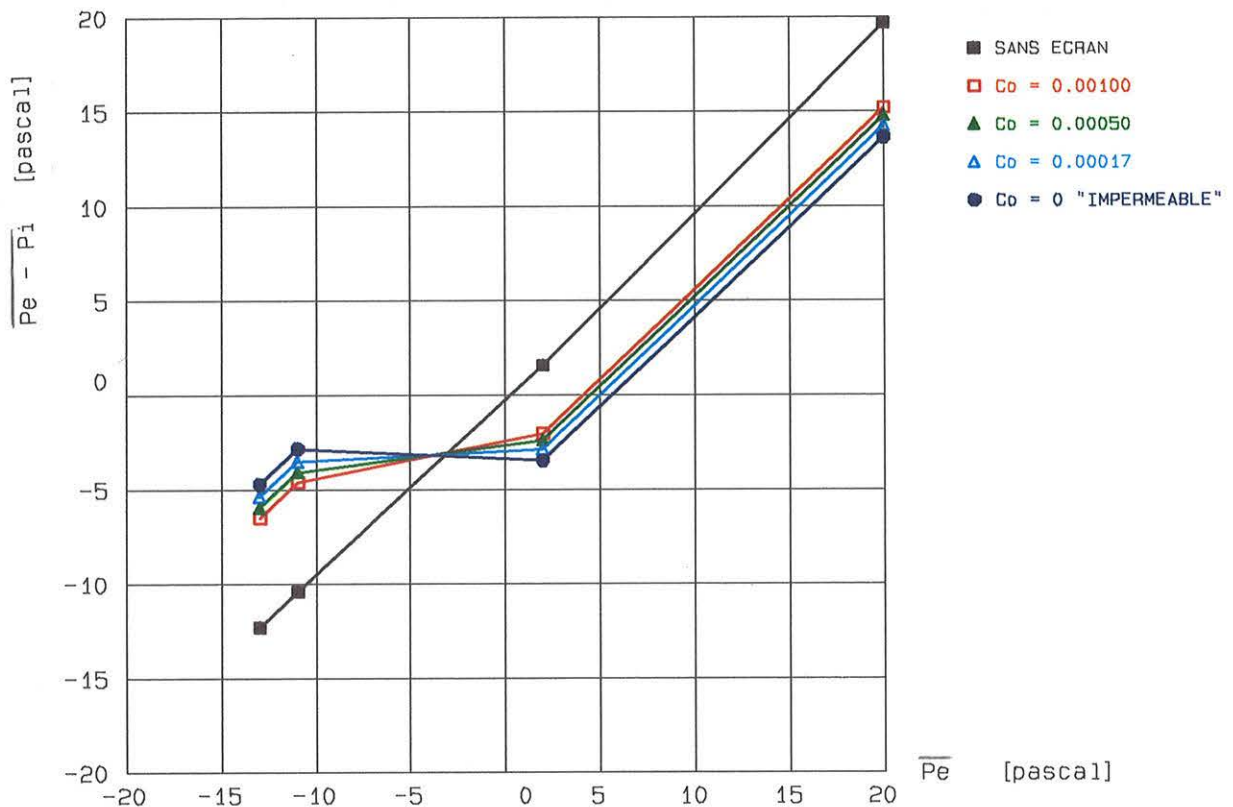


Figure 6.12. : Effet de la perméabilité de l'écran sur $\overline{\Delta P(i)}$

Cy=.001 Ny=1				
CO=0 (ecran impermeable a l'air)				
Voie	Moy.	E.t.	Max.	Min.
Pi(1)	.523	.459	1.927	-.733
Pi(2)	.625	.472	2.154	-.696
Pi(3)	-.737	.408	.359	-1.609
Pi(4)	-.734	.409	.359	-1.595
Pi(5)	.359	.000	.359	.359
DP(1)	-.343	.301	.518	-1.746
DP(2)	1.367	.435	2.630	.081
DP(3)	-.468	.178	-.032	-1.360
DP(4)	-.280	.156	.066	-1.067
CO =.00017 NO = 1				
Voie	Moy.	E.t.	Max.	Min.
Pi(1)	.465	.430	1.683	-.686
Pi(2)	.563	.440	1.893	-.650
Pi(3)	-.669	.379	.134	-1.443
Pi(4)	-.666	.379	.137	-1.443
Pi(5)	-.067	.340	.567	-.742
DP(1)	-.285	.294	.337	-1.766
DP(2)	1.429	.457	2.891	.078
DP(3)	-.536	.172	-.100	-1.118
DP(4)	-.348	.164	.027	-.838
CO=.00050 NO=1				
Voie	Moy.	E.t.	Max.	Min.
Pi(1)	.416	.421	1.604	-.684
Pi(2)	.510	.429	1.763	-.647
Pi(3)	-.611	.375	.176	-1.360
Pi(4)	-.608	.375	.181	-1.360
Pi(5)	-.069	.359	.650	-.811
Dp(1)	-.236	.297	.337	-1.766
Dp(2)	1.482	.470	3.021	.081
Dp(3)	-.594	.179	-.159	-1.204
Dp(4)	-.406	.176	.002	-.926
CO = .00100 NO=.8				
Voie	Moy.	E.t.	Max.	Min.
Pi(1)	.379	.416	1.524	-.681
Pi(2)	.469	.423	1.670	-.645
Pi(3)	-.559	.374	.222	-1.302
Pi(4)	-.557	.374	.227	-1.302
Pi(5)	-.062	.367	.689	-.840
DP(1)	-.200	.302	.379	-1.761
DP(2)	1.523	.478	3.114	.081
DP(3)	-.646	.185	-.210	-1.270
DP(4)	-.458	.185	-.012	-.999

Tableau 6.2. : Effet de la perméabilité de l'écran placé en sous face de la couverture sur $P(i)$ et $\Delta P(i)$.

6.3.3. L'effet de la perméabilité au niveau du faîtage.

Pour une fermeture non conforme aux recommandations données dans le DTU ($C_y \in [0.01, 0.02]$) ΔP diminue de l'ordre de 15 %. La diminution est de près de 45 % pour une fermeture réglementaire ($C_y = 0.001$, $N_y = 1$). Elle atteint 65 % pour une fermeture avec une étanchéité améliorée ($C_y = 0.0001$, $N_y = 1$) (cf. figure 6.13. et tableau 6.3.).

Les tracés temporels des pressions externe P_e , interne $P(i)$ et leur différence $\Delta P = P_e - P(i)$, pour les deux cas extrêmes, illustrent bien ce phénomène et justifient les précautions proposées par le DTU pour la fermeture en faîtage (figure 6.14.)

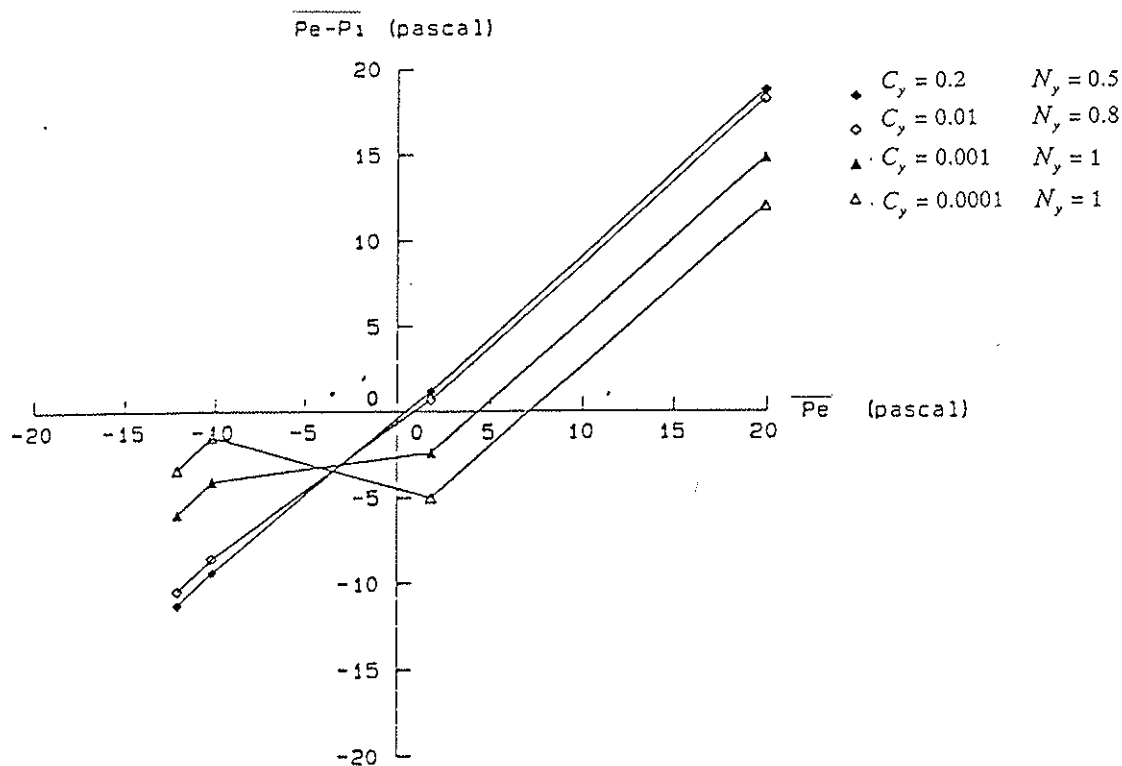


Figure 6.13. : Effet de la perméabilité au niveau de la fermeture en faîtage.

 Resultats du calcul (C0=.001 N0=1 Cx=.3 Nx=.5) :

Cy = .2 Ny=.5

Voie	Moy.	E.t.	Max.	Min.	Coef.
Pi(1)	.060	.394	1.116	-.921	10.
Pi(2)	.118	.397	1.228	-.872	10.
Pi(3)	-.080	.377	.862	-.965	10.
Pi(4)	-.076	.378	.869	-.960	10.
Pi(5)	.008	.351	.730	-.755	10.
Dp(1)	.119	.311	.801	-1.507	10.
Dp(2)	1.874	.507	3.556	.232	10.
Dp(3)	-1.126	.247	-.552	-1.929	10.
Dp(4)	-.939	.254	-.215	-1.724	10.

Cy = .01 Ny= .8

Voie	Moy.	E.t.	Max.	Min.	Coef.
Pi(1)	0.11	0.39	1.15	-0.88	10.
Pi(2)	0.17	0.39	1.27	-0.83	10.
Pi(3)	-0.15	0.37	0.76	-1.03	10.
Pi(4)	-0.15	0.37	0.76	-1.03	10.
Pi(5)	.00	0.34	0.71	-0.76	10.
Dp(1)	.07	0.30	0.73	-1.51	10.
Dp(2)	1.81	0.50	3.49	0.20	10.
Dp(3)	-1.04	0.24	-0.49	-1.83	10.
Dp(4)	-0.85	0.25	-0.15	-1.64	10.

Cy=.001 Ny=1

Voie	Moy.	E.t.	Max.	Min.	Coef.
Pi(1)	.416	.421	1.604	-.684	10.
Pi(2)	.510	.429	1.763	-.647	10.
Pi(3)	-.611	.375	.176	-1.360	10.
Pi(4)	-.608	.375	.181	-1.360	10.
Pi(5)	-.069	.359	.650	-.811	10.
Dp(1)	-.236	.297	.337	-1.766	10.
Dp(2)	1.482	.470	3.021	.081	10.
Dp(3)	-.594	.179	-.159	-1.204	10.
Dp(4)	-.406	.176	.002	-.926	10.

Cy= .0001 Ny= 1.0

Voie	Moy.	E.t.	Max.	Min.	Coef.
Pi(1)	.684	.444	2.015	-.530	10.
Pi(2)	.789	.460	2.242	-.491	10.
Pi(3)	-.862	.390	-.068	-1.692	10.
Pi(4)	-.859	.391	-.051	-1.675	10.
Pi(5)	-.057	.368	.681	-.806	10.
Dp(1)	-.504	.329	.208	-2.007	10.
Dp(2)	1.202	.416	2.552	-.005	10.
Dp(3)	-.342	.160	.000	-.869	10.
Dp(4)	-.155	.128	.076	-.535	10.

Tableau 6.3. : Effet de la perméabilité au niveau du fûtage.

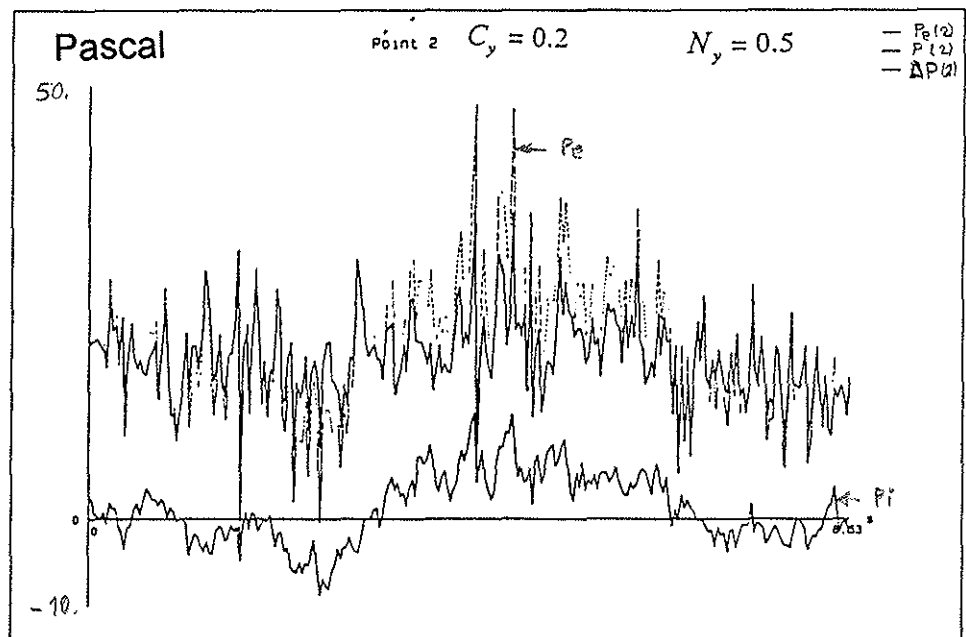
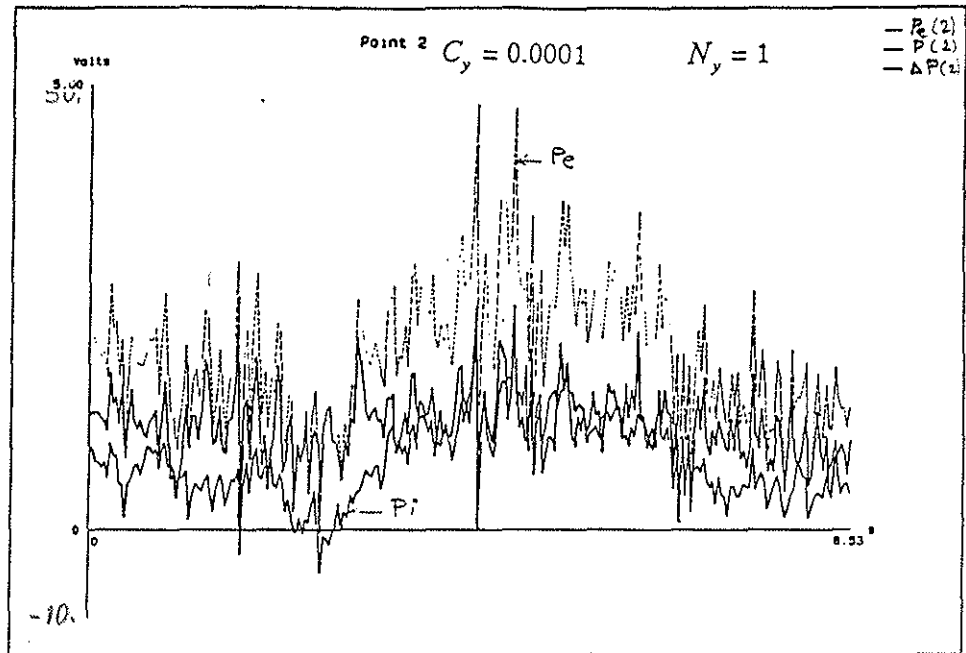


Figure 6.14 : Evolution comparative de la pression interne et externe et de leur différentiel pour les deux cas extrêmes concernant la fermeture du faitage.

6.3.4. L'effet de flexibilité de l'écran.

Le tableau 6.4. donne les résultats obtenus pour $(C_y = 0.001, N_y = 1)$, $(C_0 = 0.0016, N_0 = 0.8)$ (voir remarque 2). Nous notons les points suivants :

- La flexibilité de l'écran amortit fortement le signal de la pression interne dans la lame d'air, et dans le volume du comble. (cf figure 6.15.),

- L'augmentation de l'indice de flexibilité $\left(\frac{1}{K_v}\right)$ augmente l'amortissement, mais au-delà d'un

seuil $\left(\frac{K_a}{K_v} \approx 50\right)_{\Delta P \approx 1 Pa}$ son influence devient négligeable (cf. figure 6.16.).

Ecran flexible :					DV = A DP ^{.33}				
Ka/Kv = 2300/DP ^{.67} (A=.0110)					Ka/Kv=3875/DP ^{.67} (A=.0186)				
Voie	Moy.	E.t.	Max.	Min.	Voie	Moy.	E.t.	Max.	Min.
Pi(1)	.180	.197	.571	-.339	Pi(1)	.180	.196	.574	-.337
Pi(2)	1.407	.203	1.915	.905	Pi(2)	1.407	.202	1.914	.911
Pi(3)	.078	.171	.440	-.272	Pi(3)	.078	.170	.440	-.270
Pi(4)	.880	.166	1.238	.513	Pi(4)	.880	.165	1.237	.515
Pi(5)	.714	.191	1.106	.305	Pi(5)	.714	.190	1.111	.305
Dp(1)	-.001	.468	1.516	-1.109	DP(1)	-.001	.467	1.516	-1.109
DP(2)	.585	.671	3.302	-1.265	DP(2)	.585	.670	3.299	-1.260
DP(3)	-1.284	.449	-.425	-2.540	DP(3)	-1.284	.447	-.427	-2.540
DP(4)	-1.896	.505	-.857	-2.867	DP(4)	-1.897	.504	-.857	-2.867
Ka/Kv=2810/DP ^{.67} (A=.0135)					Ka/Kv= 4875/DP ^{.67} (A=.0234)				
Voie	Moy.	E.t.	Max.	Min.	Voie	Moy.	E.t.	Max.	Min.
Pi(1)	.181	.196	.574	-.337	Pi(1)	.181	.195	.574	-.337
Pi(2)	1.408	.202	1.915	.911	Pi(2)	1.408	.201	1.910	.913
Pi(3)	.079	.170	.442	-.269	Pi(3)	.079	.170	.442	-.263
Pi(4)	.881	.165	1.238	.515	Pi(4)	.881	.165	1.241	.515
Pi(5)	.715	.190	1.109	.308	Pi(5)	.715	.190	1.109	.308
DP(1)	-.002	.468	1.516	-1.109	DP(1)	-.002	.467	1.516	-1.109
DP(2)	.584	.671	3.299	-1.263	DP(2)	.584	.671	3.299	-1.255
DP(3)	-1.285	.448	-.427	-2.537	DP(3)	-1.285	.448	-.427	-2.530
DP(4)	-1.897	.505	-.860	-2.869	DP(4)	-1.898	.505	-.860	-2.867

Tableau 6.4. : Effet de la flexibilité de l'écran sur $P(i)$ et $\Delta P(i)$.

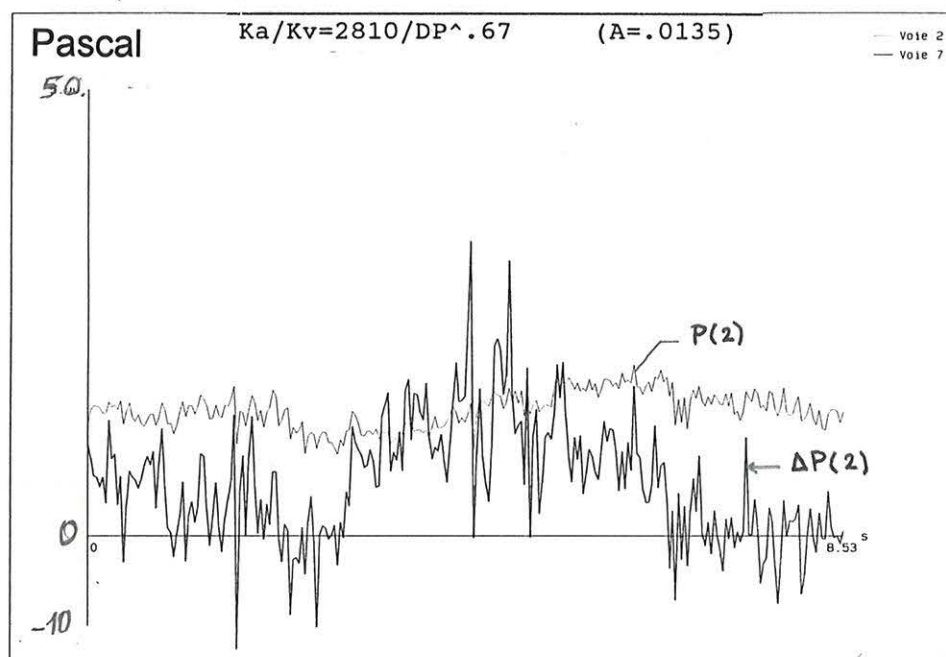


Figure 6.15. : Tracé temporel de la pression interne (cas écran flexible).

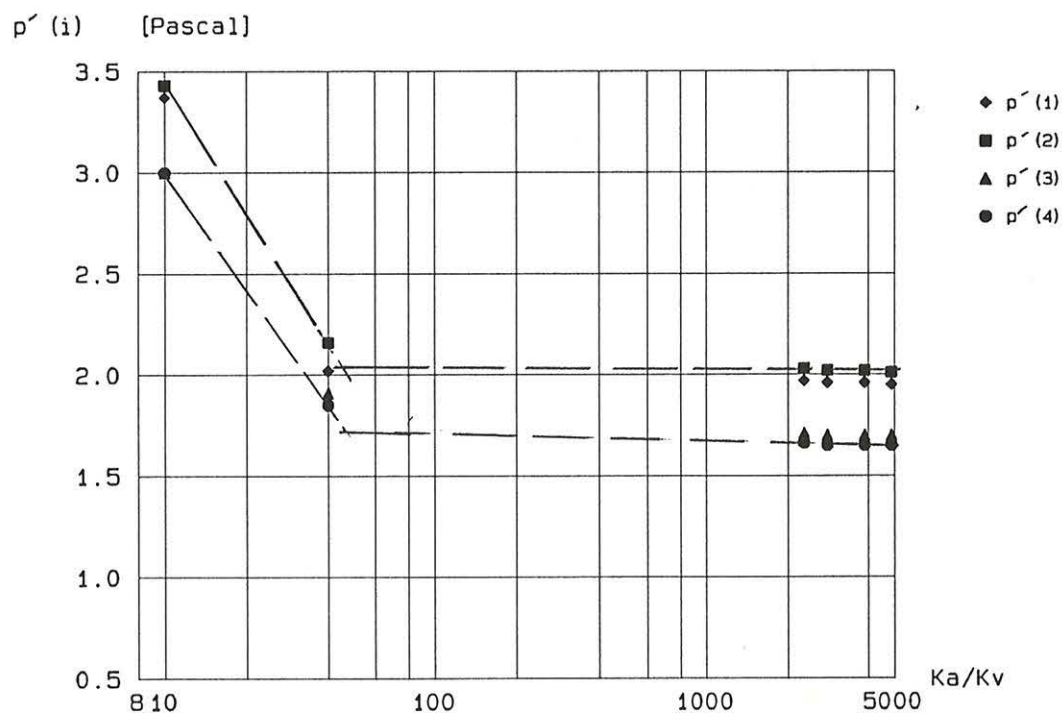


Figure 6.16. : Effet du rapport K_a / K_v sur l'écart type de la pression interne dans la lame d'air

Remarque 1 :

L'équation (III.25) modélise la déformation d'un écran tendu (cf. paragraphe 3.4.5.). Dans le cas d'un écran lâche (flèche non négligeable sous l'action de la gravité), la variation volumique de la lame d'air est liée principalement à ΔV_{a_i} , volume qui différencie la déformée lâche de la déformée tendue. Elle ne dépend plus de la valeur exacte de ΔP mais de son sens.

Remarque 2.

Le test numérique a mis en évidence la limite d'application de l'approche exposée en chapitre 3:

L'équation (III.19) n'est valable que pour le cas d'un écran ayant une perméabilité à l'air minimale ($C_0 \approx 0.001$, dans le cas étudié). Dans le cas contraire, L'équation (III.19) doit être remplacée par (III.8) ou (III.9) selon l'importance du volume du comble.

6.3.5. Conclusion et perspectives.

L'étude paramétrique met en évidence l'importance du rôle de l'écran. Sa mise en oeuvre en sous-face de la couverture diminue l'effort induit par le vent sur les éléments de la toiture. Cette diminution est d'autant plus importante que la perméabilité de l'écran est faible.

L'augmentation de la perte de charge entre les mailles est toujours intéressante en terme d'équilibrage local de pression de part et d'autre du revêtement. A titre d'exemple, selon la qualité de l'étanchéité au niveau du faîtage, ΔP varie de 40 %.

La valeur moyenne de la différence de pression $\overline{\Delta P}$, peut être moins importante pour un écran souple que pour un écran rigide. En revanche, la composante fluctuante de la différence de pression $\Delta p'$ est plus énergétique, ce qui peut jouer sur les valeurs des pics. Des mesures expérimentales, étudiant l'influence de chaque composante sur le seuil d'étanchéité, sont nécessaires pour déterminer la nature de l'écran conseillé, en vue d'améliorer la qualité d'une toiture vis-à-vis de son étanchéité à l'eau.

Le test numérique du modèle (cas d'écran rigide), s'est avéré correct. Cependant, des données expérimentales sont souhaitables pour le valider. Ce modèle fait intervenir plusieurs paramètres. Il est donc nécessaire de le valider par une série de mesures où intervient successivement un nouveau paramètre.

On retiendra que le modèle (pour le cas écran souple), ne doit pas être utilisé si l'écran est peu perméable à l'air. Dans le cadre de l'amélioration de ce modèle, nous proposons :

- de prendre en compte à la fois la compressibilité de l'air et la flexibilité de l'écran (équation III.8),
- d'ajouter les deux cas correspondants à une mise en oeuvre de l'écran lâche ou très tendu.

Si les mesures révèlent nécessaire la prise en compte du comportement dynamique de l'écran, il est utile de consulter les documents qui concernent le cas des structures gonflables, membranes et coques [68, 69, 70, 71, 72, 73].

6.4. Exploitation du modèle de calcul et perspectives :

Le modèle est destiné in fine à l'analyse du risque de perte d'étanchéité à l'eau des toitures. Il a également pour application le dimensionnement des éléments de fixations. Il faut préciser les outils et les démarches nécessaires pour de telles études.

Nous disposons de trois outils :

- La soufflerie atmosphérique : reproduit correctement le champ de pression externe au niveau du toit et donc un image assez fidèle du champ de vitesse.
- Le banc de mesure des perméabilités à l'air ; ce banc devra être amélioré pour prendre en compte :
 - . la pente de la toiture
 - . les effets de la pluie
 - . l'existence d'un écoulement d'air tangentiel (cas d'absence de pluie).
- Les deux modèles PICOMBLE et ECRANS : permettent le calcul du champ de pression interne à partir des données expérimentales précédentes : champ de pression externe et coefficients de perméabilité.

Un quatrième outil est à développer, c'est un banc d'essai destiné à effectuer un test d'étanchéité. Il peut reprendre la même structure du banc de mesure de perméabilité amélioré (cf. annexe 4).

Les organigrammes des figures 6.17. et 6.18. illustrent les démarches à suivre pour les études du risque de pénétration de pluie et de tenue au vent des éléments de toiture.

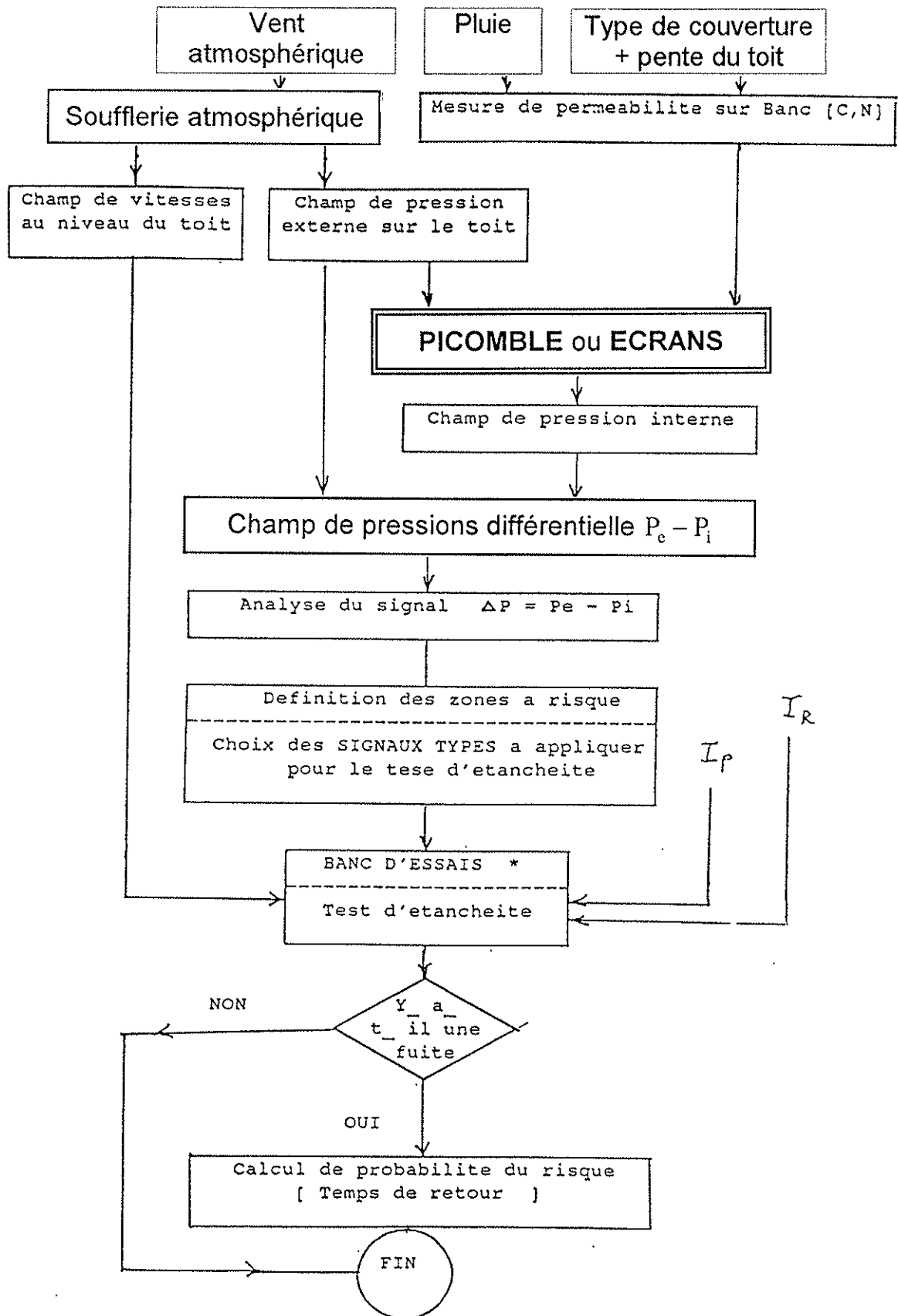


Figure 6.17. : Test d'étanchéité à la pluie des toitures.

* Une proposition de mise en oeuvre est exposée en annexe 4.

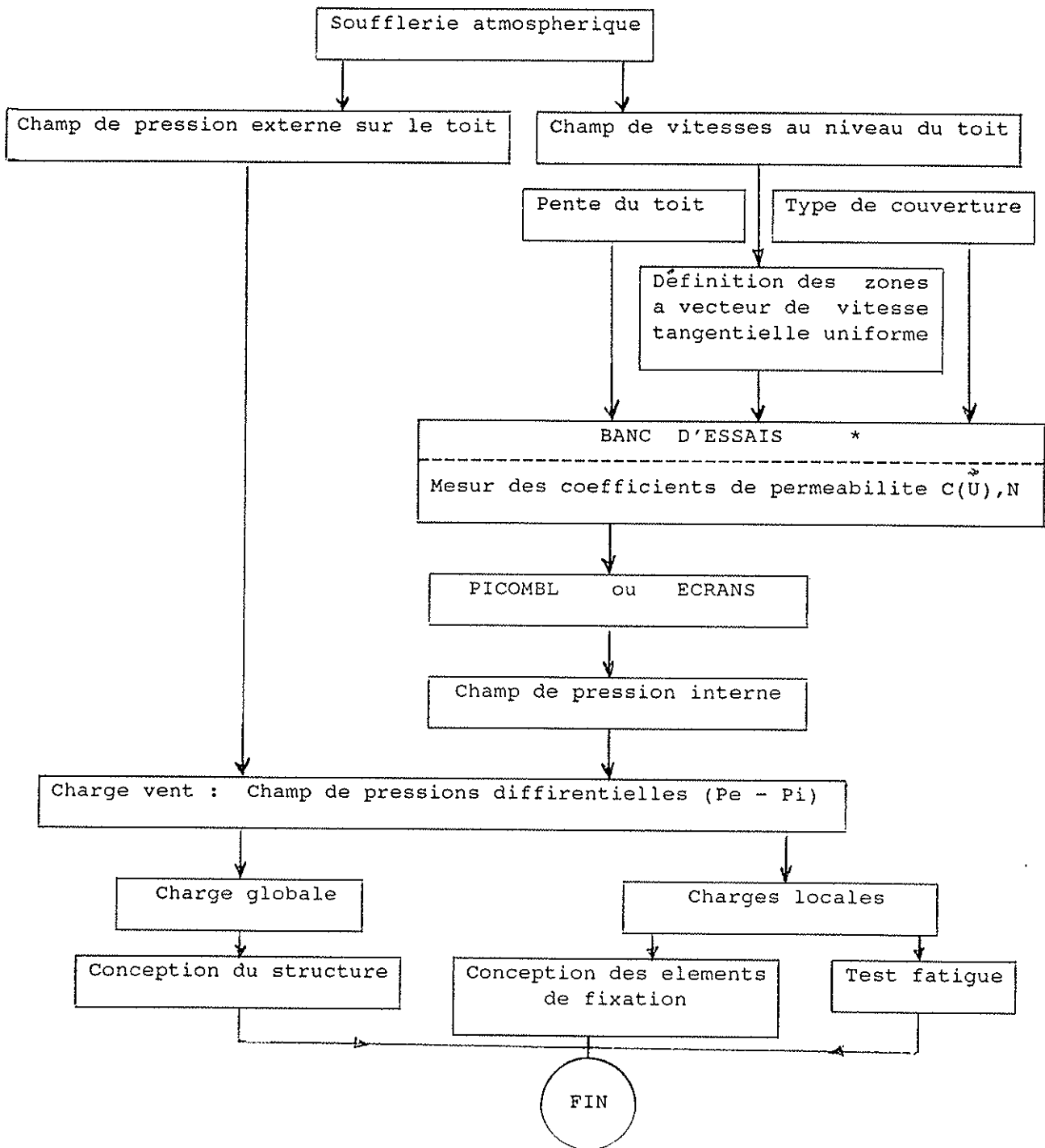


Figure 6.18. : Tenue au vent de la toiture

* Une proposition de mise en oeuvre est exposée en annexe 4.

7. CONCLUSION

La qualité d'une toiture constituée en particulier de petits éléments dépend à la fois de sa tenue au vent (dimensionnement des systèmes d'accrochage éventuels) et de sa capacité à éviter toute infiltration d'eau pendant les périodes où il y a concomitance pluie et vent fort.

Dans les deux cas, les risques sont directement fonction du champ de pression différentiel qui se développe au niveau du toit, l'analyse du risque supposant une bonne connaissance de son évolution spatiale et temporelle.

Si la technique de simulation à échelle réduite en soufflerie atmosphérique permet de connaître sans difficulté le champ externe, ceci pour différents types de vent et différentes géométries de toiture, elle ne permet pas d'accéder au champ interne en sous face du revêtement : la simulation ne peut reproduire les effets de viscosité à travers la perméabilité de la toiture.

Nos travaux ont consisté par conséquent à développer deux modèles numériques, répondant aux besoins d'analyse, d'abord sans écran en sous-face PICOMBLE, ensuite avec écran ECRANS.

Le modèle PICOMBLE, qui utilise des hypothèses simples et réalistes, a été confronté à l'expérimentation. La validation a montré l'importance de la prise en compte de la compressibilité de l'air, qui permet de reproduire correctement la fréquence de coupure du système (constitué par le volume et la couverture) et l'amortissement lié au volume.

Elle a aussi montré la sensibilité de la pression interne calculée à la perméabilité à l'air de la couverture, paramètre très important. Ceci étant, il y a bon accord entre les champs instantanés de pression interne calculé et mesuré en vraie grandeur.

Les expérimentations à l'échelle 1/1, ont permis de déterminer l'effet de la vitesse tangentielle et de la pluie sur la perméabilité à l'air pour le cas particulier d'une couverture en ardoises. Ces types d'expérimentations lourdes pourraient être avantageusement remplacés par un banc de mesure adapté, permettant l'analyse de nombreux autres types de couvertures.

La validation expérimentale du modèle de calcul du champ de pression interne avec écran en sous-face ECRANS n'a pas été faite faute de temps et de disponibilité des moyens d'essais (soufflerie climatique). Le modèle a cependant été utilisé pour développer une étude de sensibilité aux différents paramètres, dans ce contexte particulier de mise en oeuvre de la couverture.

On a ainsi montré l'important rôle de l'écran pour réduire la pression différentielle intrados-extrados de la couverture. Cette réduction peut atteindre 60 % dans certains cas particuliers,

d'où une diminution très importante d'abord du risque d'infiltration d'eau, d'autre part du risque d'arrachement de la couverture.

On retiendra qu'un écran rigide conduit à des différences de pressions moyennes intrados/extrados plus importantes que pour un écran souple, mais qu'en contre partie l'amplitude des fluctuations plus faible, conduit à un facteur de risque "perte d'étanchéité à l'eau" qui peut être identique dans les deux cas.

Les deux codes de calcul de pressions internes PICOMBLE et ECRANS sont à la base des travaux futurs qui devront être poursuivis pour l'analyse du risque de perte d'étanchéité à l'eau des toitures.

ANNEXE 1

BIBLIOGRAPHIE TECHNIQUE SUR LES COUVERTURES EN ARDOISE

1. NOTATIONS :	175
2. MONTAGE D'UNE COUVERTURE EN ARDOISE	176
3. LA SURFACE MOUILLEE	178
4. LA MISE EN OEUVRE D'UNE ISOLATION INTERNE	180
5. LA VENTILATION	182

1. NOTATIONS :

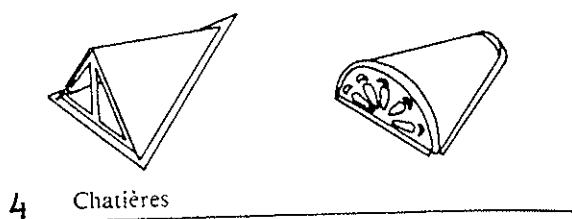
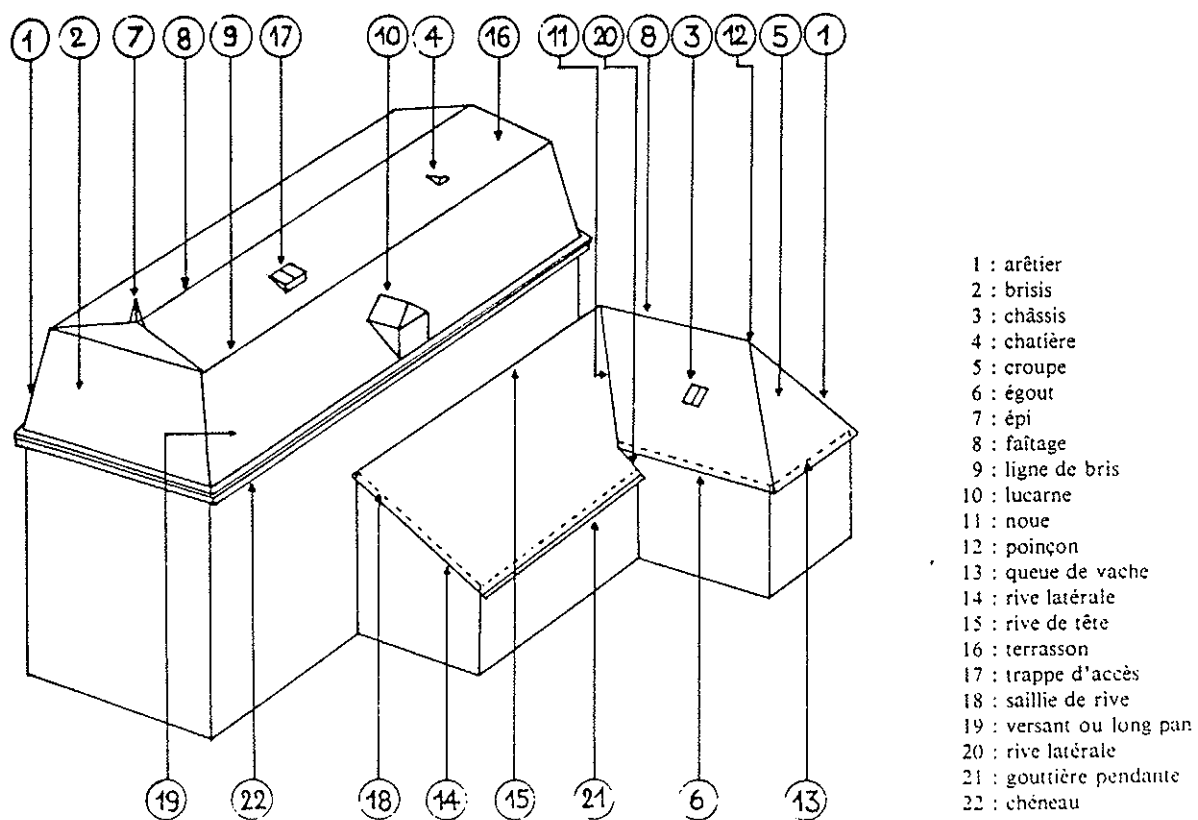


Figure 1 : Les principales notations [2].

2. MONTAGE D'UNE COUVERTURE EN ARDOISE

Le principe de montage est donné dans la figure 2.

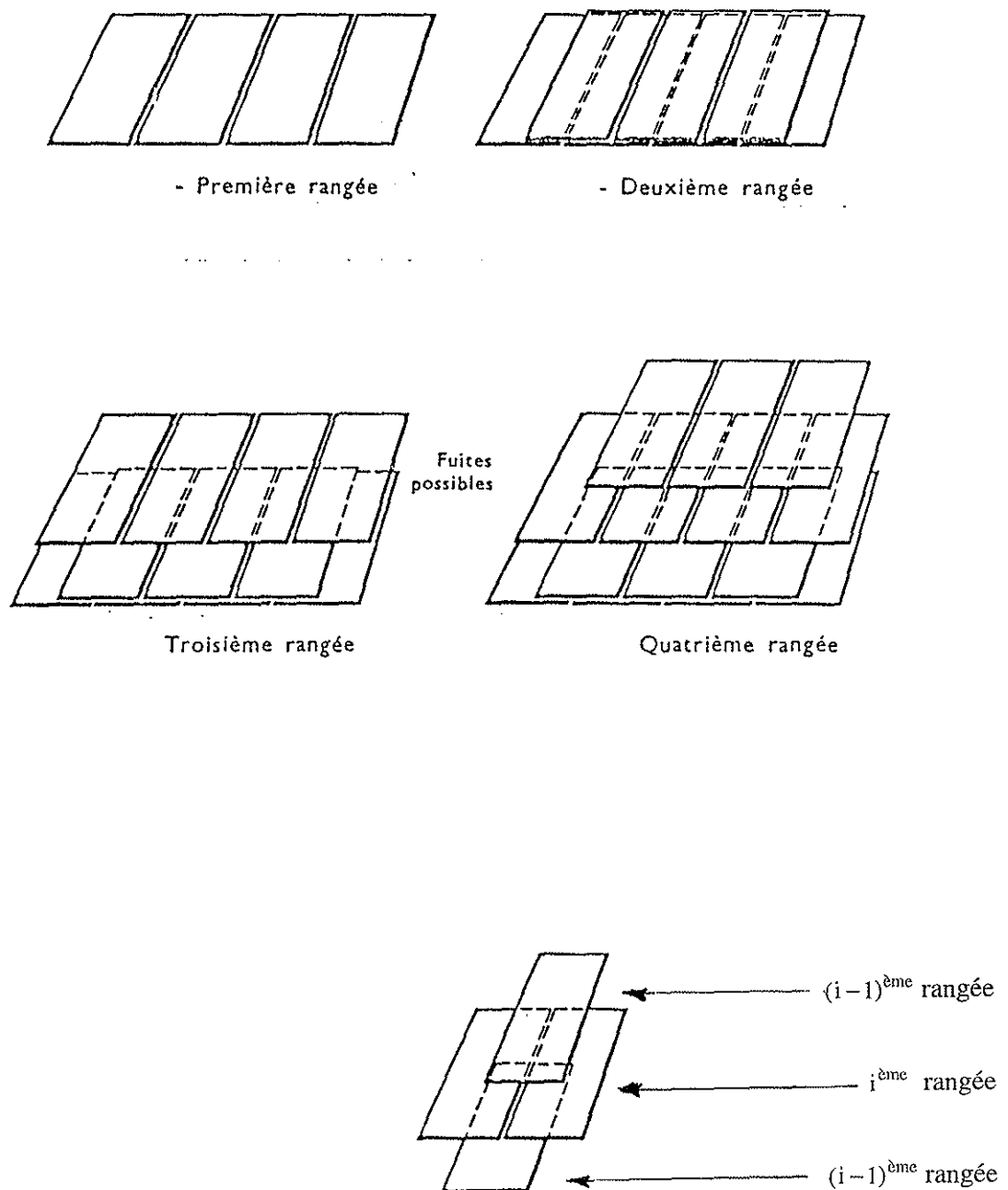
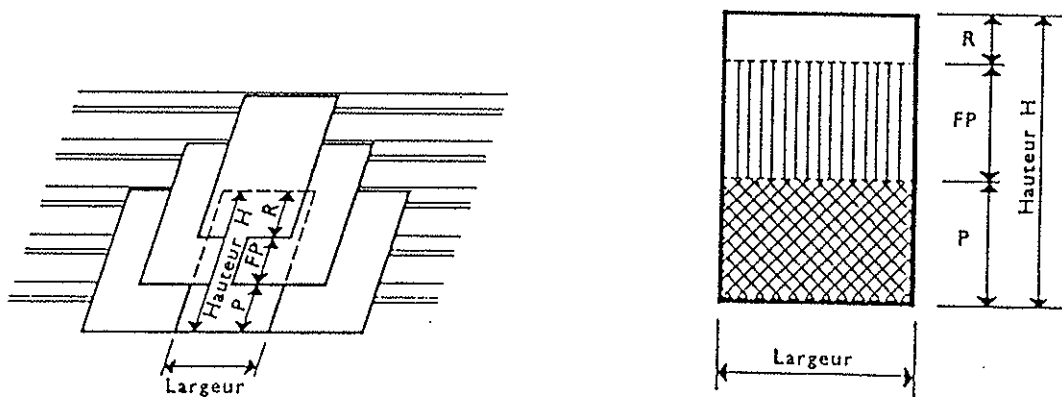


Figure 2 : Le principe de montage des ardoises.

La $i^{ème}$ rangée recouvre la $i-2^{ème}$ rangée par une longueur R de recouvrement. Plus la pente est faible, plus le recouvrement R est grand. Du fait de ces superpositions, chaque ardoise peut se diviser en trois parties (figure 3).



$$P : \text{le pureau,} = \frac{H - R}{2}$$

$$FP : \text{le faux pureau,} = P = \frac{H - R}{2}$$

R : le recouvrement

H : la hauteur totale de l'ardoise

Figure 3 : Les trois parties relative à chaque ardoise.

Le pureau : c'est la surface visible de l'ardoise, il est directement mouillé par la pluie.

Le faux pureau : c'est la surface située au-dessus du pureau et qui a toujours les mêmes dimensions que celui-ci. Il est mouillé indirectement par le joint entre les deux demi-pureaux des ardoises du rang supérieur.

Le recouvrement : il se situe au-dessus du faux pureau, sa hauteur est variable avec la pente et la région de construction. Il est partiellement mouillé par le phénomène de capillarité.

3. LA SURFACE MOUILLEE

La forme moyenne de la surface mouillée dépend du mode de fixation :

- pose au clou (figure 4)
- pose au crochet (figure 5)

Sous l'effet des fluctuations de pression différentielle, la surface effective mouillée fluctue du même coup autour sa forme moyenne décrite ci- après

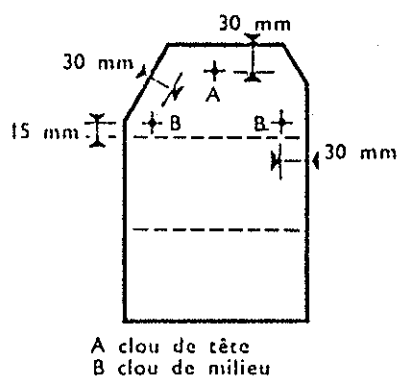


figure 4 : Pose au clou [2].

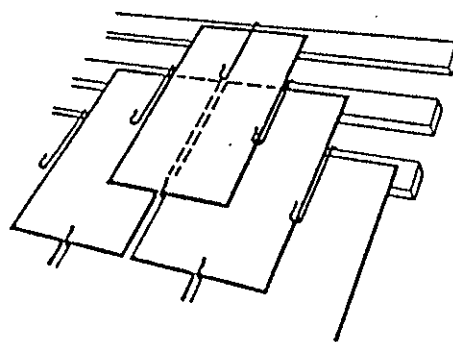


Figure 5 : Pose au crochet [2].

Pose au crochet.

Les ardoises sont moins serrées que dans une pose au clou, donc la remontée d'eau est plus faible dans le faux pureau. Par contre, le crochet posé entre deux chefs de côté des ardoises voisines, forme dans le joint deux canaux relativement fins (figure 6) qui augmentent la remontée d'eau à cet endroit.

Cette remontée d'eau supplémentaire est estimée entre 4.5 - 5.5. cm [2].

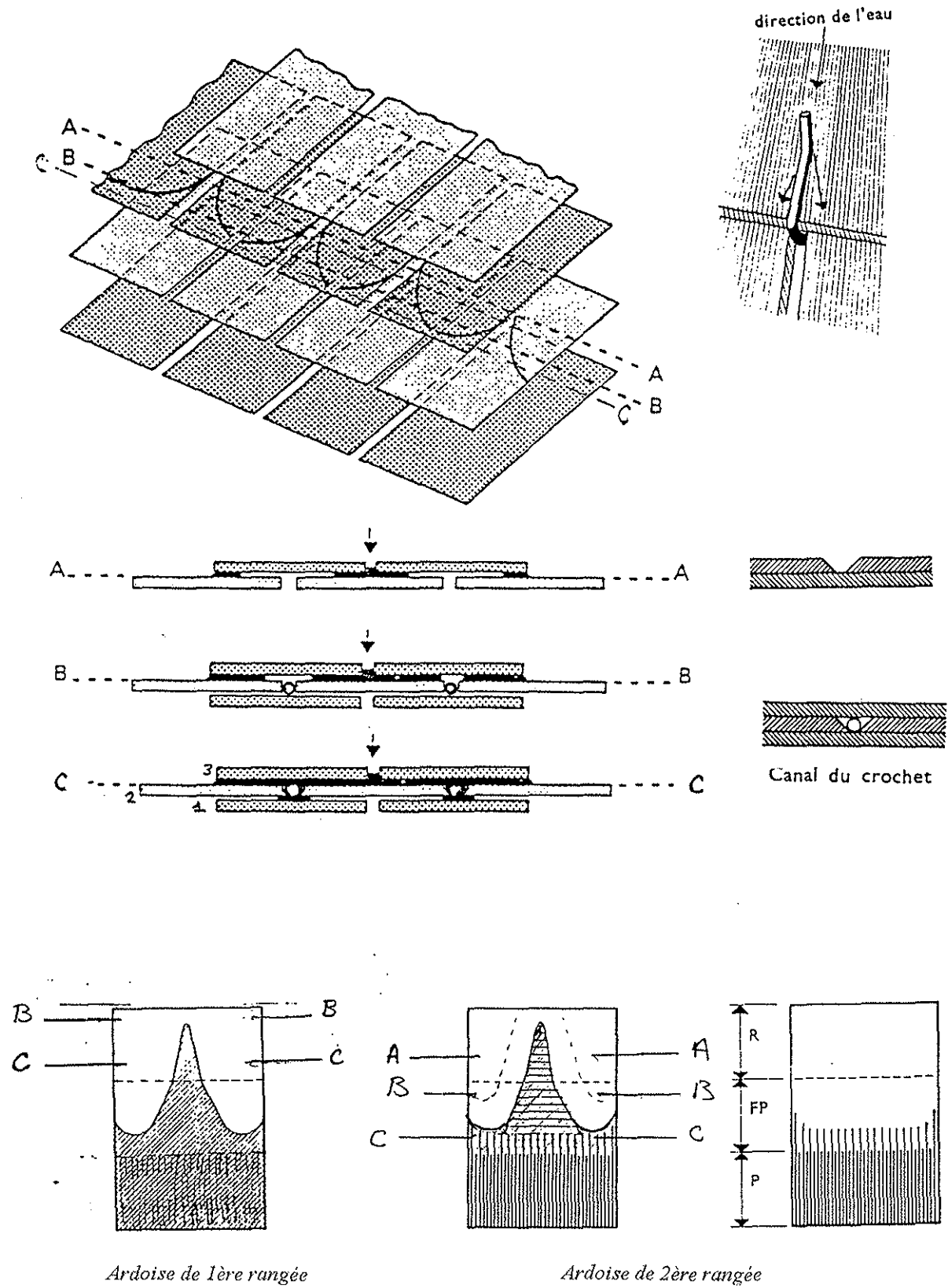


Figure 6 : Surface mouillée [2].

Pose au clou.

Le faux pureau est mouillé par capillarité. Le recouvrement est mouillé partiellement par l'eau qui s'écoule dans le canal en V situé entre deux ardoises du dessous, ce qui crée par étalement une surface humide ayant approximativement la forme représentée dans la figure 7.

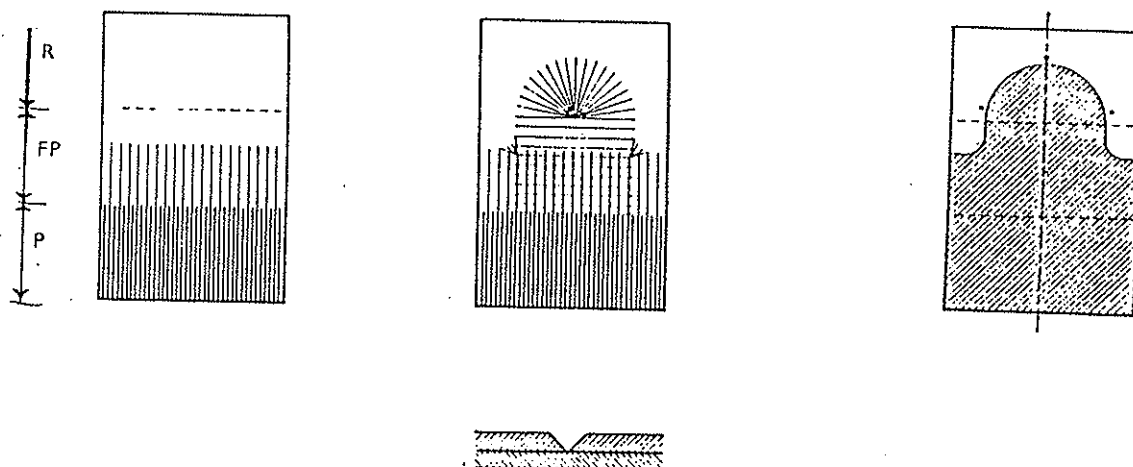


Figure 7 : La surface mouillée, pose au clou.

4. LA MISE EN OEUVRE D'UNE ISOLATION INTERNE

Ecran rigide.

Il est fixé directement sous les chevrons (figure 8), ou entre les chevrons et les contr-liteaux de façon semblable au mode de fixation de l'écran souple.

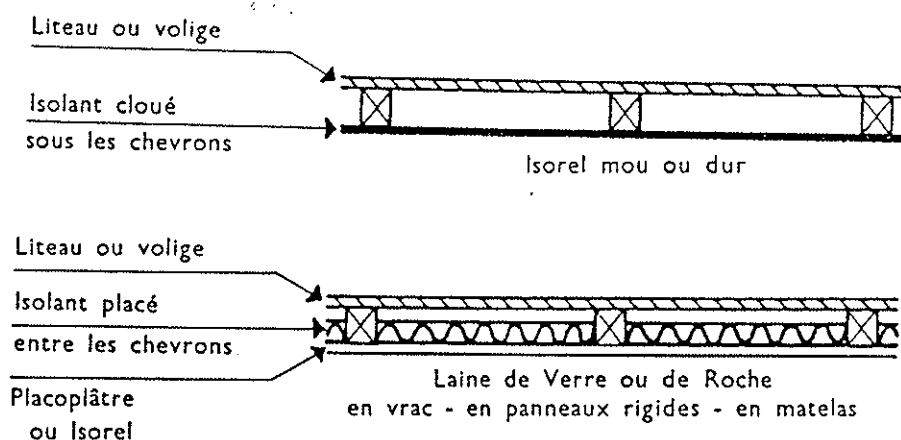


Figure 8 : Mise en oeuvre d'isolation interne écran rigide [2].

Ecran souple.

La mise en oeuvre de l'écran souple se fait par des bandes horizontales, qui se chevauchent par une longueur R de recouvrement, fixées uniquement entre les chevrons et les contres liteaux. Ces dernières ont une épaisseur minimale de 20 mm (figure 9).

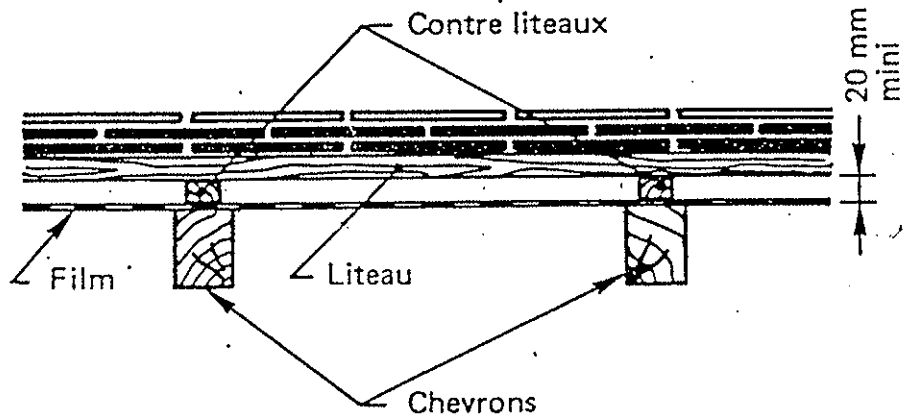


Figure 9 : Mode de fixation de l'écran souple.

La longueur R de recouvrement assure une étanchéité à l'eau de l'écran, tout en gardant un passage d'air entre la lame d'air et le volume du comble (figure 10).

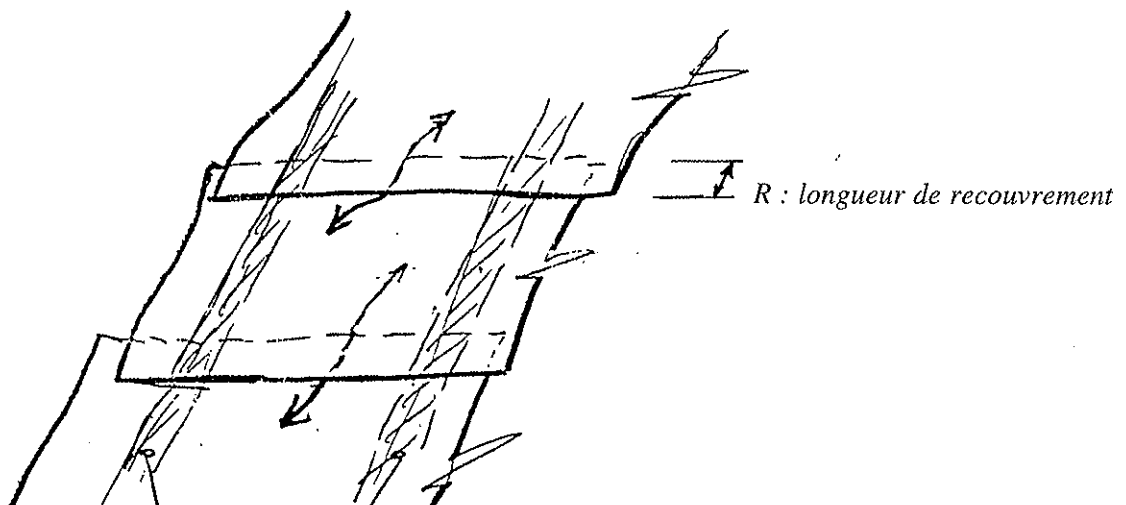


Figure 10 : Chevauchement des bandes.

5. LA VENTILATION

L'aération des combles est indispensable pour les raisons suivantes :

- supprimer les effets de condensation en sous face des ardoises qui se produit en particulier l'hiver pendant la nuit si le ciel est clair.
- assurer la bonne conservation des bois de charpente.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. DUTHU
"Nouvelle encyclopédie de la construction, 2000 mots clés"
Tome 1 - Editions du Moniteur
- [2] M. SANGUE, J. BEAULIEU
"Les couvertures en ardoises"
Edition Chambre Syndicale des Ardoisières de l'Ouest

ANNEXE 2

LA SOUFFLERIE CLIMATIQUE

LA SOUFFLERIE CLIMATIQUE



Figure 1 : Vue de la soufflerie climatique.

Principe de l'étude en soufflerie climatique.

La soufflerie climatique Jules Verne, réalisée par le CSTB, est destinée aux études que l'on ne peut mener en soufflerie atmosphérique à échelle réduite, pour des raisons de similitude.

Elle restitue le vent naturel, combiné avec la pluie, la neige, la grêle, la fumée, le sable pour étudier à l'échelle vraie grandeur les effets de ces phénomènes climatiques sur des ouvrages, la combinaison pluie/vent concernant directement cette étude.

Les caractéristiques de la soufflerie Jules Verne sont présentées dans la figure 2. On distingue deux circuits : dynamique et thermique [1].

CARACTERISTIQUES DE LA SOUFFLERIE CLIMATIQUE

CIRCUIT DYNAMIQUE

1. **Veine haute vitesse**
Section 26 m² - Vitesse supérieure à 83 m/s
Table tournante avec balance dynamométrique (7 composantes)
Avaloir de couche limite (longueur 12 m)
2. **Veine diffuseur**
Section moyenne 50 m² - Vitesse supérieure à 40 m/s
Plateforme d'ancrage pour tests destructifs
3. **Ecope d'admission d'air** (contrôle de la température)
4. **Six ventilateurs à hélices à pas variable** - Propulsion 3200 kW - Traitement acoustique
5. **Veine environnement**
Fonctionnement en anneau 8 bis
Longueur 25 m - section 79 m² à 134 m² - section moyenne 100 m² avec une vitesse supérieure à 21 m/s
Reproduction du vent naturel et de sa structure spatio-temporelle
Reproduction de la pluie jusqu'à 20 cm/h sur 100 m² (gouttes de 50 à 4000 µ)
Reproduction du soleil et de son spectre (1 kW/m² sur 20 m²) sous incidence réglable
Température positive (température ambiante jusqu'à 50°C)
Fonctionnement en U ouvert 7 bis
Cloisons mobiles 6 à repliement pour une configuration en U 7 section moyenne 100 m² avec une vitesse supérieure à 21 m/s
Température ambiante
Reproduction du vent naturel
Reproduction du vent de sable jusqu'à 10 g/m³ (grains de 50 à 500 µ) avec récupération à l'aval de la veine environnement
Reproduction de la dispersion des effluents, aérosols et fumées
8. **Mise à l'atmosphère et extraction d'air chaud**

CIRCUIT THERMIQUE

9. **Chambre expérimentale** (longueur 25 m, hauteur 7 m et largeur 10 m) avec buse à géométrie variable (section 30 m² maximum)
Vitesse maximum 25 m/s - Pression atmosphérique
Température -25°C à +50°C
Couche de l'hygrométrie relative de 30 % à 100 %
Reproduction du vent naturel fluctuant
Reproduction du givre et du brouillard
Fabrication de la neige (0,1 m/h sur 100 m²) et reproduction du vent de neige
Reproduction du soleil naturel
Table d'ancrage et banc à rouleau
Extraction de gaz brûlés
10. **Ventilateur à nombre de tours variable** (1000 kW) - Traitement acoustique
11. **Echange froid - Echange chaud**
12. **Aubes de guidage**
13. **Buse à section et longueur variables** (30 à 18 m² et prolongateur de 10 m)

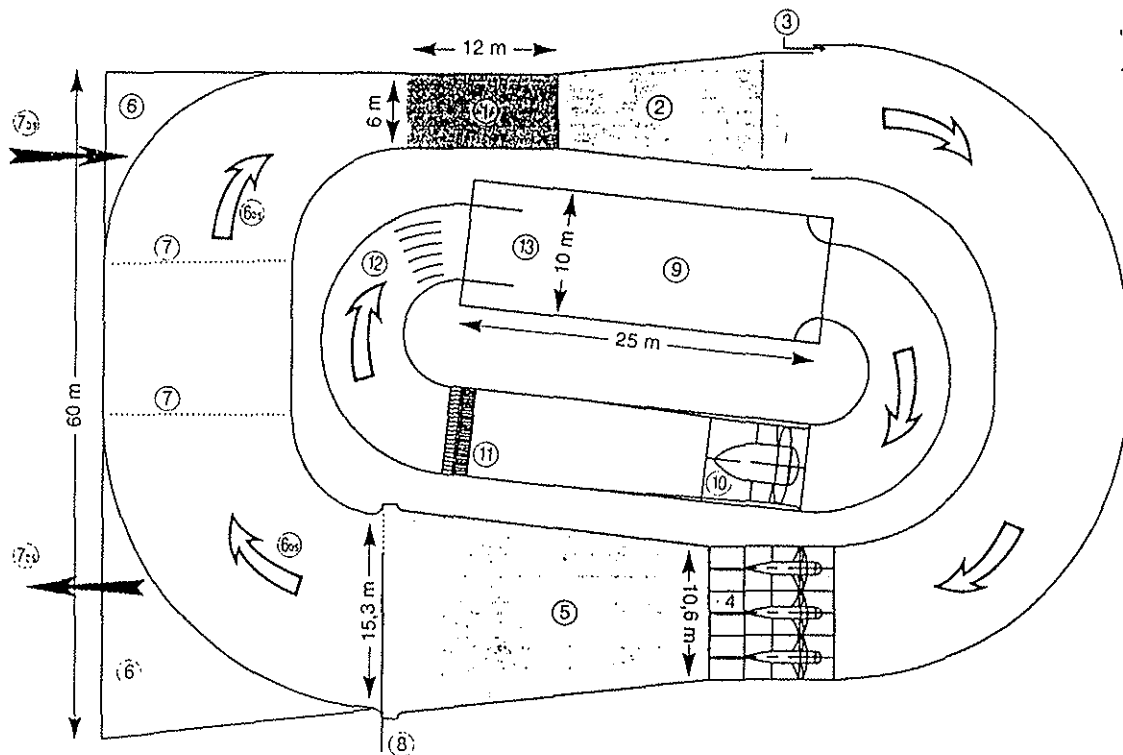


Figure 2 : La soufflerie climatique Jules Verne - circuits aérauliques et caractéristiques

LA SOUFFLERIE CLIMATIQUE



Figure 1 : Vue de la soufflerie climatique.

Principe de l'étude en soufflerie climatique.

La soufflerie climatique Jules Verne, réalisée par le CSTB, est destinée aux études que l'on ne peut mener en soufflerie atmosphérique à échelle réduite, pour des raisons de similitude.

Elle restitue le vent naturel, combiné avec la pluie, la neige, la grêle, la fumée, le sable pour étudier à l'échelle vraie grandeur les effets de ces phénomènes climatiques sur des ouvrages, la combinaison pluie/vent concernant directement cette étude.

Les caractéristiques de la soufflerie Jules Verne sont présentées dans la figure 2. On distingue deux circuits : dynamique et thermique [1].

Le circuit dynamique

Descriptif et caractéristiques.

Le circuit dynamique présente deux configurations de fonctionnement, l'une en circuit fermé (anneau de vitesse : 6 figure 2), l'autre en U ouvert à l'air libre (7 bis figure 2). Les mesures ont été effectuées dans la configuration circuit fermé.

L'air est entraîné par six propulseurs à hélices à pas variables (figure 3), la puissance maximum de cet ensemble correspond à 3200 kW.

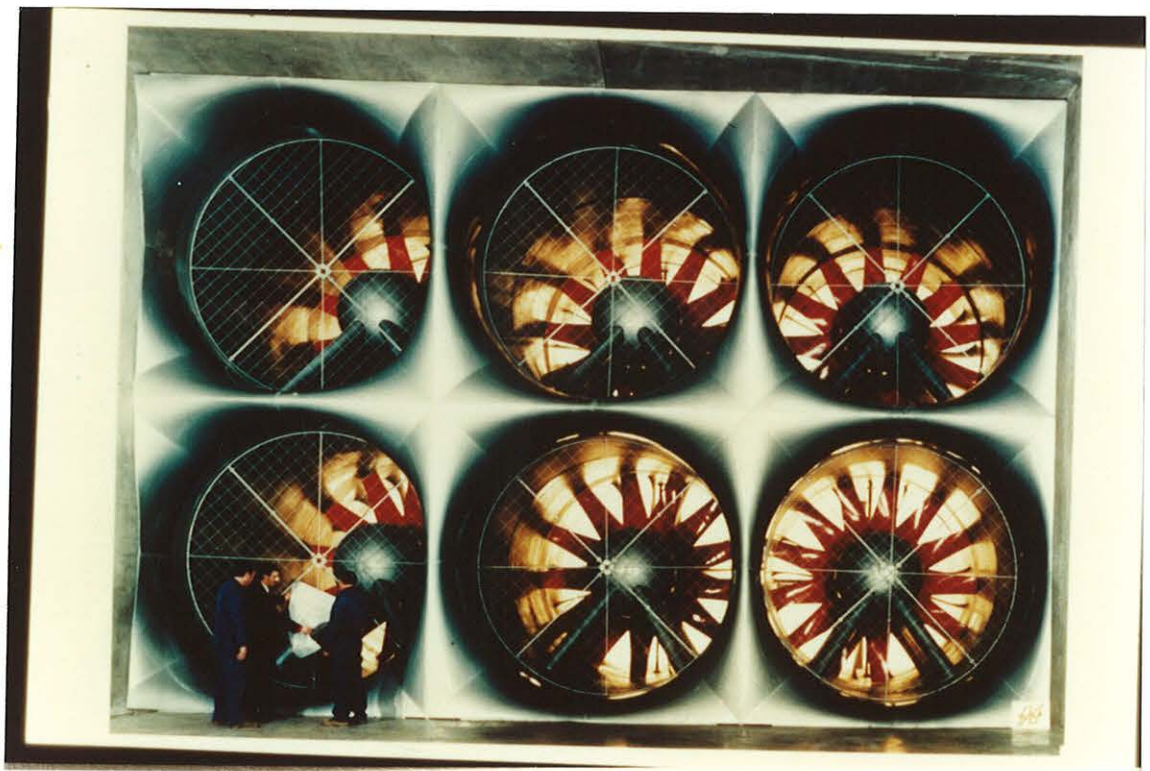


Figure 3 : Les six propulseurs à l'amont de la veine environnement.

Le contrôle de la température de l'écoulement, est assuré par un système d'admission d'air frais par vannes réglables (3 figure 2) et d'évacuation d'air chaud (surface d'ouverture réglable par bâches) jouant également le rôle de mise à l'atmosphère (8 figure 2). La stabilisation de la température ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) de l'écoulement est atteinte au bout d'environ 5 minutes compte tenu de la régulation et d'une température de veine fixée à quelques degrés au-dessus de la température extérieure.

La veine environnement (5 figure 3 - figure 4), de longueur 25 m et de section variable de 79 m² à 134 m² ; en configuration "anneau de vitesse", l'écoulement atteint une vitesse de 90 km/h dans une section moyenne de 100 m².

On y reproduit :

* fonctionnement en anneau :

- le vent naturel et sa structure spatio-temporelle
- la pluie jusqu'à 200 mm/h sur 100 m² (gouttes de 50 à 4000 μm)
- le soleil et son spectre (1 kW/m²) sous incidence réglable
- la température de l'ambiante jusqu'à + 50°C par fermeture des bâches au niveau de l'extraction d'air chaud.

* fonctionnement en U ouvert à l'air libre :

- le vent naturel
- les vents de sable ou de poussière (granulométrie de 50 à 2000 μm) avec ensemencement jusqu'à 10g/m³ et récupération du sable à l'aval de la veine environnement
- la dispersion des effluents, aérosols et fumées



Figure 4 : La veine environnement - tests d'étanchéité à l'eau.

* Simulation spatio-temporelle du vent.

Les six ventilateurs (correspondant à chacun à un maillage spatial de 3,3 x 3,3 m) peuvent être pilotés indépendamment les uns des autres par commande du calage des pâles et répondre à des variations de débit très rapide (pour un ventilateur jusqu'à $\pm 70 \text{ m}^3 / \text{s}$ en trois secondes).

Le pilotage des ventilateurs est obtenu à partir de signaux synchrones du vent enregistrés sur site suivant un maillage identique à celui des axes des ventilateurs (figure 5).

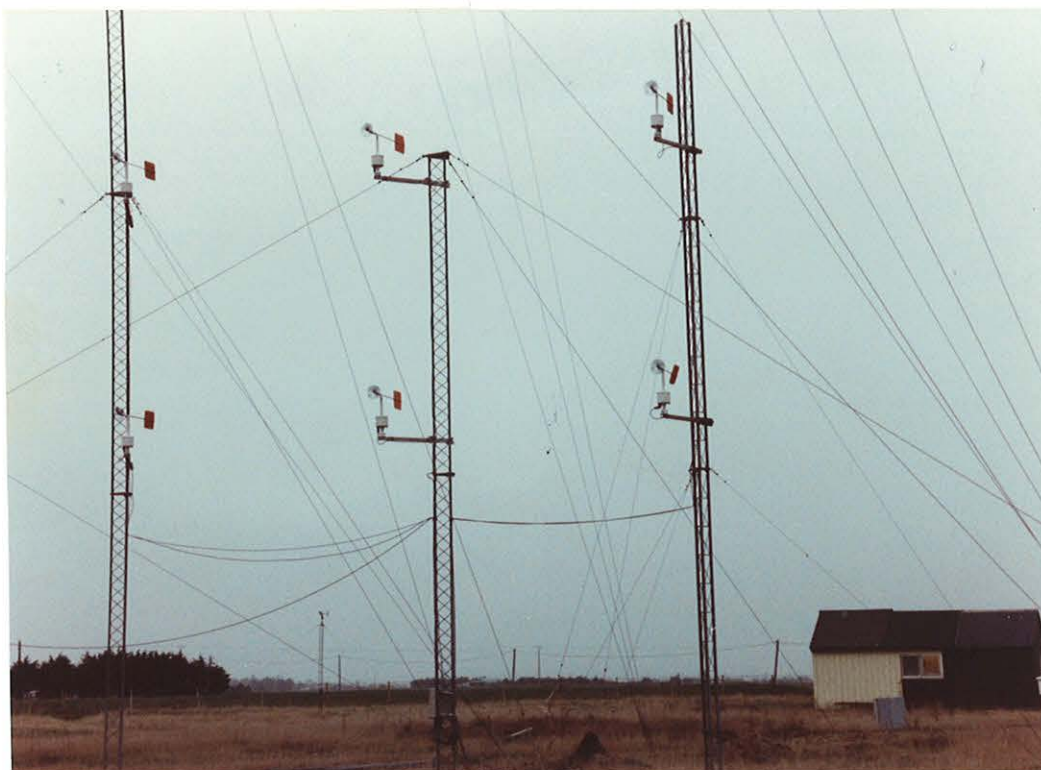


Figure 5 : Enregistrement de la vitesse du vent sur site.

Les rafales de vent reproduites sont alors représentatives de la réalité comme le montrent les figures 6 (intensité de turbulence) et 7 (densité spectrale de puissance du vent).

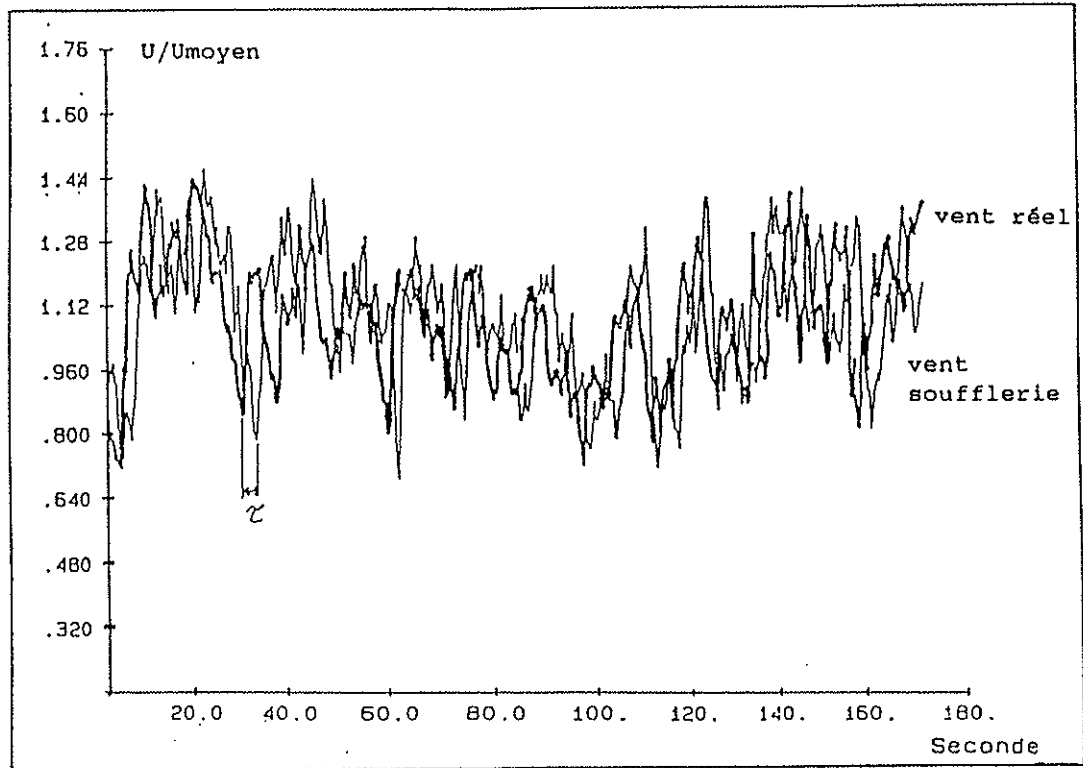


Figure 6 : Enregistrement instantané du vent en fonction du temps.

La restitution en soufflerie présente un retard lié à la position
du point de mesure en aval des propulseurs.

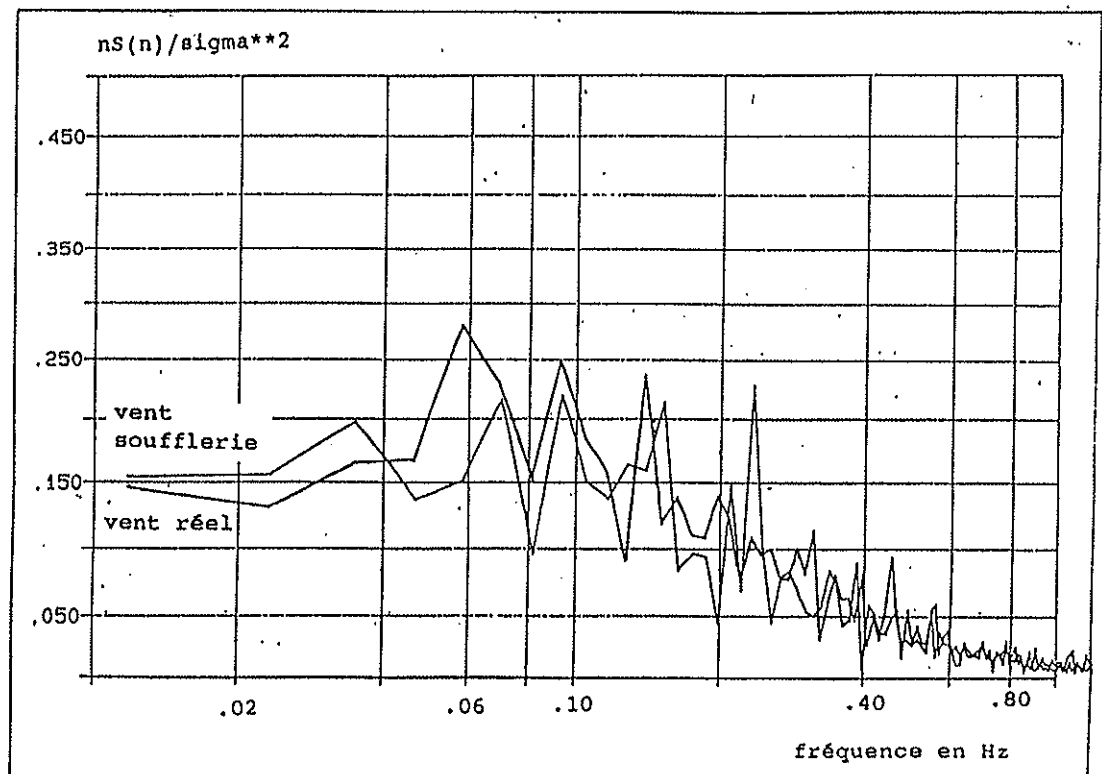


Figure 7 : Densité spectrale d'énergie du vent réel et du vent soufflerie.

Simulation de la pluie.

Les études climatologiques en vraie grandeur ont montré que la simulation correcte de la pluie nécessitait la restitution de l'intensité de la pluie, du spectre des gouttes et de leur trajectoire. La pluie ainsi reproduite peut être associée à des vents jusqu'à 100 km/h.

Deux réseaux maillés d'injecteurs (grille au plafond et grille verticale à l'aval des propulseurs) alimentés en eau surpressée, la géométrie des mailles, leurs dimensions, le type d'injecteurs, la pression et le débit de service permettent de recréer différents types de pluie.

Les performances de la rampe à pluie s'expriment en classes types d'intensité de pluie au sol, auxquelles on associe une distribution en diamètre de gouttes, (figure 8). Il est ainsi possible de reproduire la pluie sur 100 m² au sol avec des intensités jusqu'à 240 mm/h et des gouttes de diamètre compris entre 50 et 4000 μm) [2]

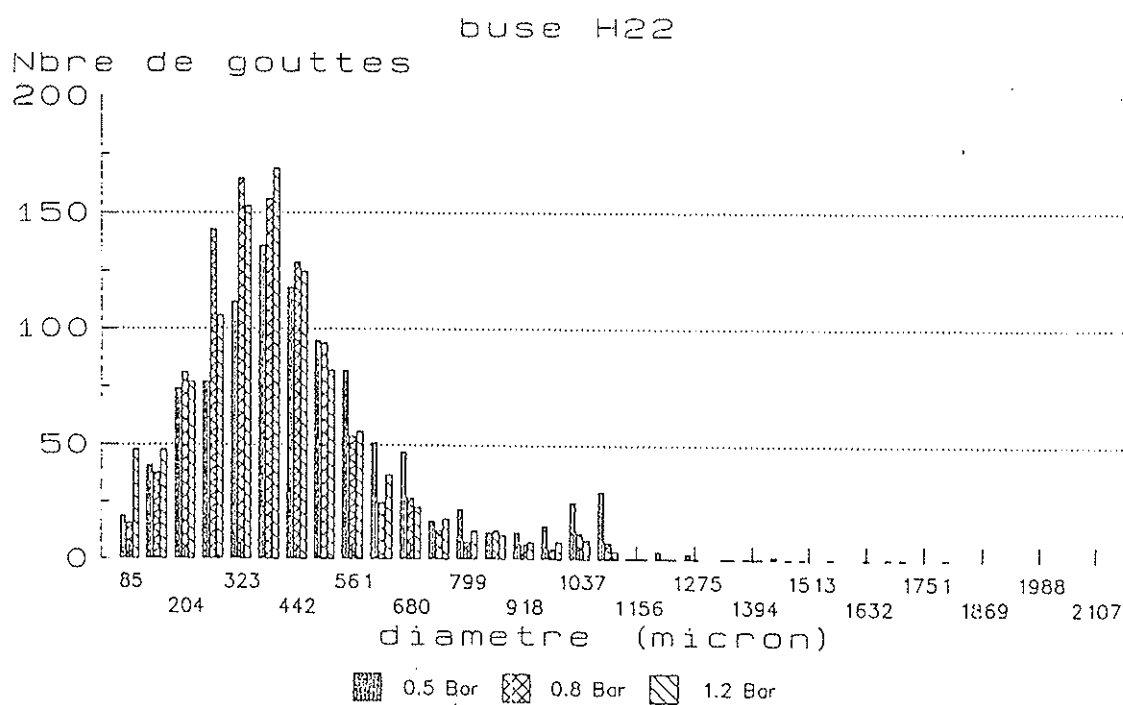


Figure 8 : Distribution du nombre de gouttes en fonction de leur diamètre pour différentes pressions d'alimentation.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. GANDEMER
La soufflerie climatique "Jules Verne" - Caractéristiques et performances
CSTB Nantes - EN.SC 91.15 L

- [2] M. DUFRESNE de VIREL, J. VILLAIN
Simulation des précipitations pluvieuses - Analyse spatiale du comportement des buses
CSTB Nantes - EN.SC 93.15 C

ANNEXE 3

MESURES PRELIMINAIRES DU CHAMP DE PRESSION EXTERNE SUR LA MAISON EXPERIMENTALE DE BOUIN

TABLE DES MATIERES

1. LE LABORATOIRE EXPERIMENTAL DE BOUIN	195
2. OBJECTIFS DES MESURES	198
3. DETERMINATION DE LA FREQUENCE LIMITE DU SIGNAL VRAIE GRANDEUR DE LA PRESSION EXTERNE.	198
3.1. Procédures expérimentales	198
<i>3.1.1. Champ de pression externe sur le bardage et le toit de la maison de Bouin.</i>	<i>199</i>
3.2. Mesures complémentaires du champ de pression externe sur le toit.....	204
4. OPTIMISATION DE LA FREQUENCE DE COUPURE.....	209
5. ANALYSE DES VALEURS DE PICS	210
6. CHAMP DE PRESSION DIFFERENTIELLE SUR LE TOIT (CAS : INCIDENCE NORMALE AUX FAÇADES).	212

1. LE LABORATOIRE EXPERIMENTAL DE BOUIN

Site d'implantation :

Le laboratoire expérimental est implanté sur un terrain de marais dégagé de toute rugosité, à 2 km de la mer.

Sur ce site la vitesse moyenne annuelle du vent à 10 m de hauteur est de 6 m/s. La rose des vents (figure 1) montre que les vents forts dominants sont de secteur O.S.O. L'échelle caractéristique de turbulence L_u^x est 160 m, L_u^y et L_u^z sont 30 m et 40 m. Le spectre de la composante horizontale de la vitesse est représenté sur la figure 2.

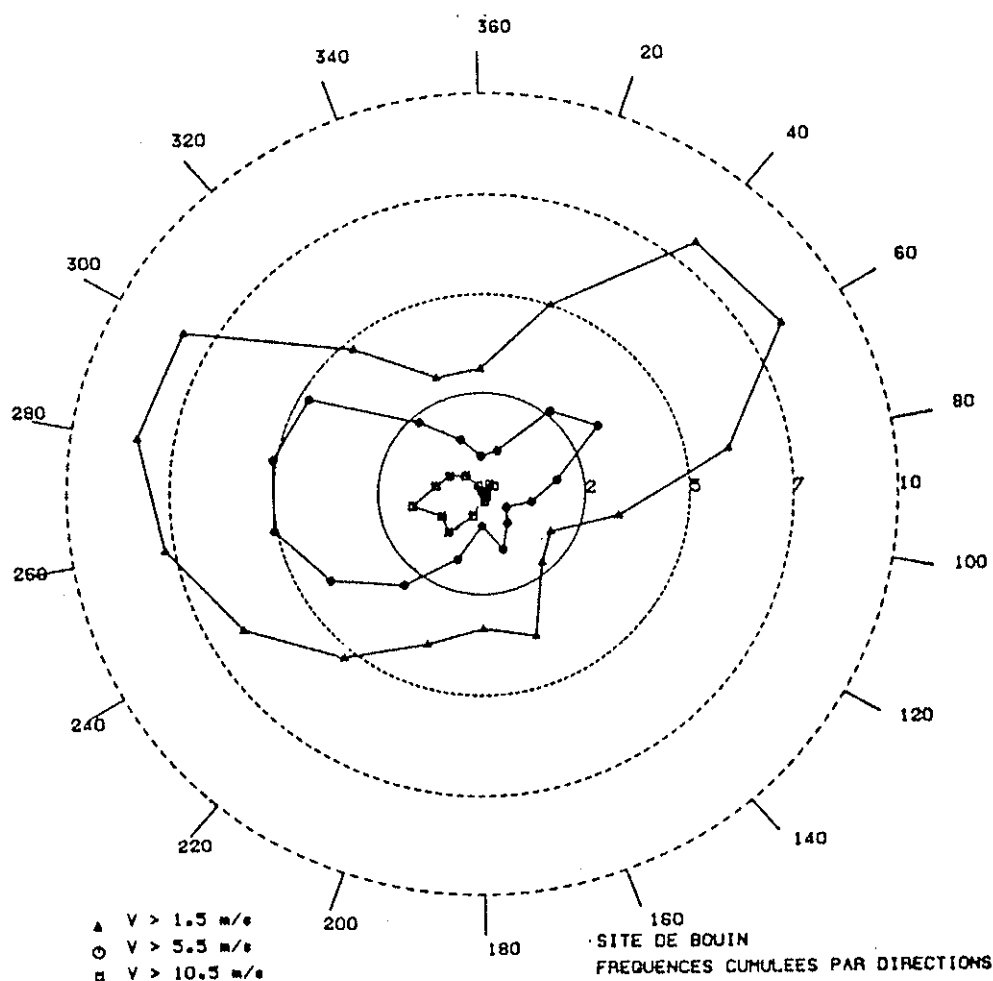


Figure 1 : Rose des vents sur le site d'expérimentation du CSTB à Bouin (85)
pour la période janvier 84 - janvier 86.

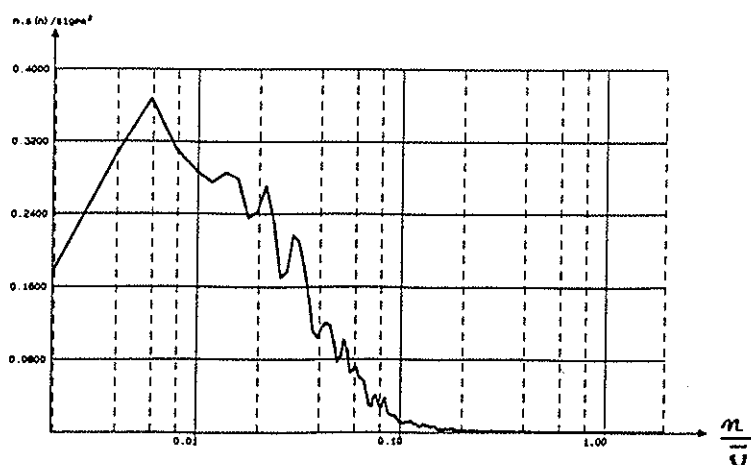


Figure 2 : Spectre énergétique de la composante horizontale de la vitesse du vent
[Bouin 1992]

Equipement de la cellule expérimentale

Le laboratoire de Bouin a été utilisé plus particulièrement pour les mesures préliminaires, dans le but de mettre en place la chaîne de mesure et les hypothèses expérimentales.

La cellule présente la géométrie et les dimensions d'une petite habitation (longueur 9,3 m ; largeur 5,2 m ; hauteur sous faîtage : 4 m ; toit à 2 pentes de 30°). Elle peut tourner sur elle-même et être orientée suivant la volonté de l'expérimentateur par rapport à la direction du vent.

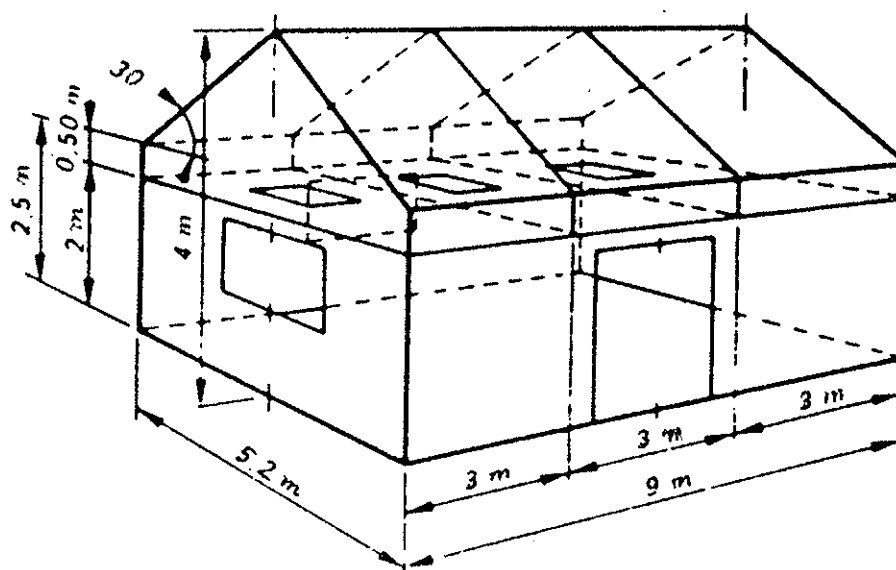


Figure 3 : Caractéristiques géométriques de la cellule expérimentale.

La maison est équipée de trois types de couvertures (ardoises d'Angers, ardoises amiantociment et tuiles plates béton) [1].

2. OBJECTIFS DES MESURES

Lors de cette étude préliminaire, nous nous sommes fixés quatre objectifs :

- Détermination de la fréquence limite f_M du signal de pression externe.
- Etude de l'effet du filtrage à une fréquence de coupure f_c inférieure à f_M (optimisation de la fréquence de coupure).
- Analyse des valeurs de pics (détermination de la gamme des capteurs de pression).
- Et enfin, obtention des fichiers références du champ de pression externe (mesures vraie grandeur).

Pour répondre à ces objectifs, plusieurs séries de mesures ont été effectuées pour différentes incidences du vent par rapport à la cellule (0° , 30° , 60° , 75° , 90°).

3. DETERMINATION DE LA FREQUENCE LIMITE f_M DU SIGNAL VRAIE GRANDEUR DE LA PRESSION EXTERNE.

3.1. Procédures expérimentales

Cette fréquence maximale f_M sera retenue après analyse :

- dans un premier temps, des fichiers de mesure concernant le champ de pression externe sur les façades et le toit de la cellule, (mesures réalisées par d'autres expérimentations),
- ensuite, des fichiers de mesure complémentaires de la pression externe sur le toit.

3.1.1. Champ de pression externe sur le bardage et le toit de la maison de Bouin.

Les mesures, traitées et analysées ici, concernent les pressions en neuf points distribués sur les façades et le toit [1] pour une incidence de vent normale à la façade ($\theta = 0^\circ$).

Le chaîne de mesure, utilisée est décrite dans le table 1. Le filtrage analogique a été utilisé uniquement pour éliminer les bruits de 50 Hz (énergie des fluctuations de la pression estimé négligeable au-delà de 3 Hz) [2].

Réponse dynamique du tuyau en fréquence	Capteurs		Filtre analogique		Fréquence d'échantillonnage
[0-2] Hz réponse plate	gamme $[P_a]$	sensibilité $[P_a]$	f_c	pente de coupure	5 Hz
$f_c(-3dB) = 6Hz$	± 1000	± 0.5	7 Hz	36 dB/oct	

Tableau 1 : Caractéristiques de la chaîne de mesures de pressions.

La figure 4 nous montre la position des points de mesure, ainsi que les tracés temporels des pressions mesurées. Le tableau 2 donne les résultats de traitement statistique du fichier.

Les résultats de l'analyse spectrale des fluctuations de pression sont exposés figure 5.

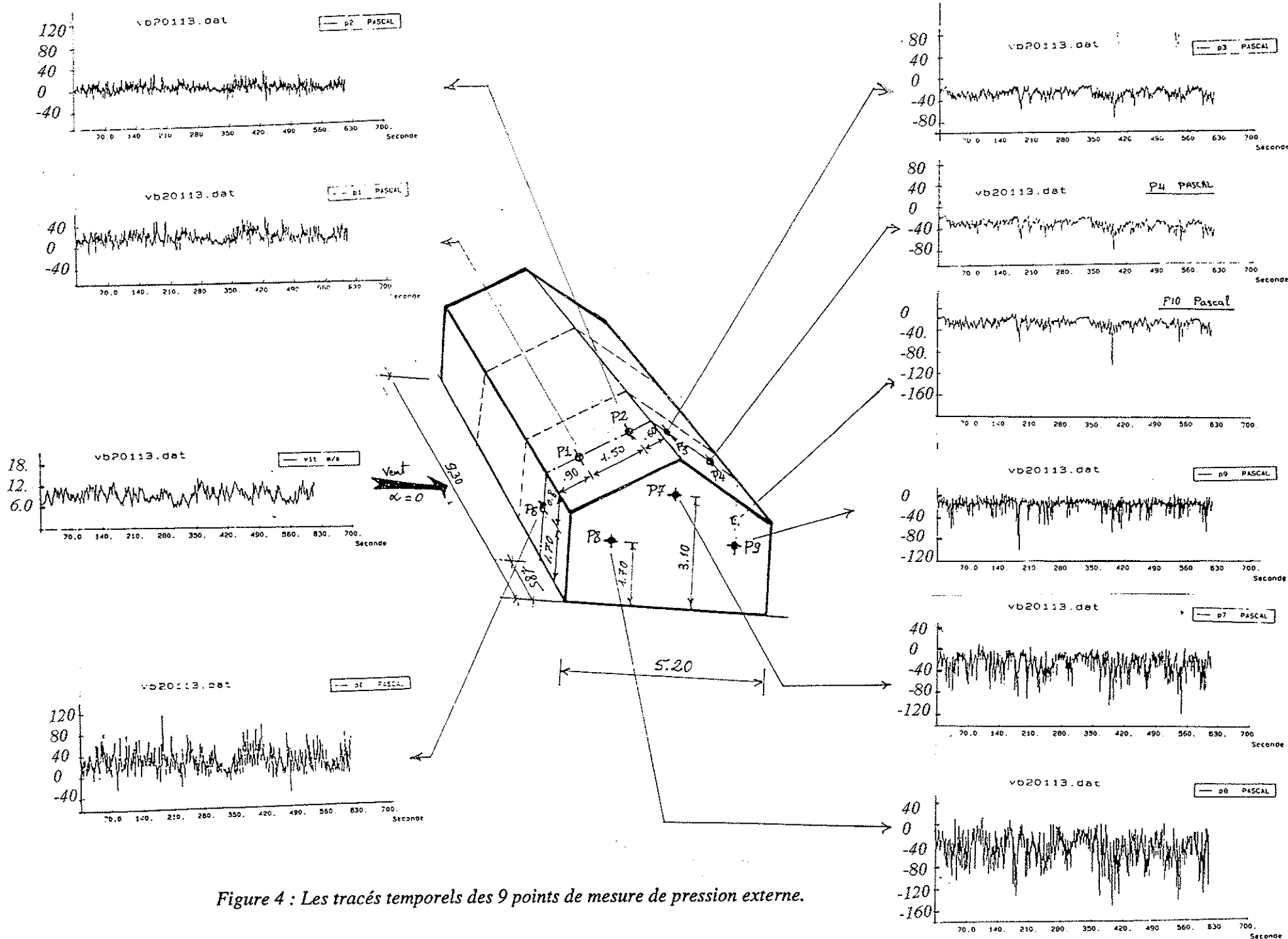


Figure 4 : Les tracés temporels des 9 points de mesure de pression externe.

	Mov	E-T	Min	Max	Minc	Maxc	
1 P1	16.713	8.370	-11.233	52.015	-3.175	39.479	PASCAL
2 P2	6.419	8.010	-20.024	34.921	-10.470	23.698	PASCAL
3 P3	-24.755	7.111	-69.841	-7.570	-42.806	-12.709	PASCAL
4 P4	-26.305	7.165	-71.795	-10.012	-44.862	-15.100	PASCAL
5 P5	-5.035	4.633	-26.862	7.814	-15.751	3.480	PASCAL
6 P6	29.184	15.837	-21.734	117.949	-6.604	76.852	PASCAL
7 P7	-23.696	15.247	-113.553	10.012	-72.355	3.042	PASCAL
8 P8	-39.318	21.011	-145.788	15.629	-102.768	3.460	PASCAL
9 P9	-14.047	8.731	-100.122	15.873	-52.727	3.236	PASCAL
10 P10	-23.853	7.149	-91.819	-6.838	-42.827	-11.650	PASCAL
11 P11	.919	3.800	-15.385	18.803	-7.672	10.144	PASCAL
12 P12	-9.168	4.039	-23.687	4.884	-17.613	-1.129	PASCAL
13 VIT	9.374	1.647	5.543	14.310	6.404	12.476	M/S
14 AZIM	202.993	8.193	171.429	232.967	180.549	224.542	DEGRE

Tableau 2 : Résultats du traitement statistique du fichier.

Exploitation des résultats :

Sur la façade au vent, pour un point de mesure situé au point d'arrêt, le spectre des fluctuations de pression tend vers celui des fluctuations de vitesse du vent¹. Au fur et à mesure que l'on s'approche du coin, les hautes fréquences apparaissent. Elles sont liées à la couche limite générée au droit de la paroi imposée par les conditions aux limites ($V_{paroi} = 0$).

¹L'équation de Bernoulli étant applicable entre ce point et un point M en amont

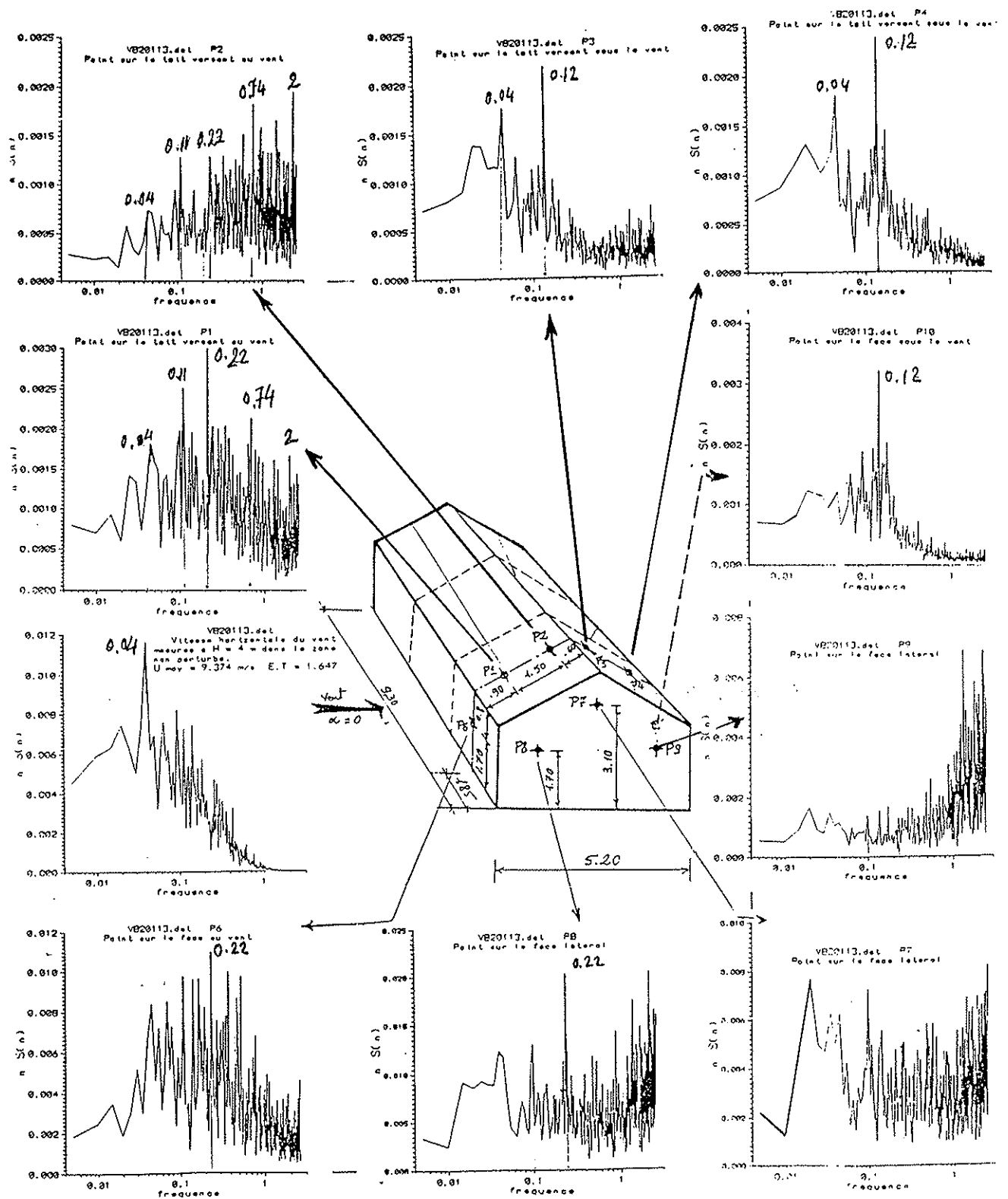


Figure 5 : L'analyse spectrale des 9 pressions mesurées

Lorsque le point de mesure est près du coin, il apparaît un pic dans le spectre à la fréquence de détachement tourbillonnaire. Le point 6 se situe à $0.2L$ du coin, on note l'apparition d'un pic à $f_o = 0.22\text{ Hz}$ (figure 5), la même fréquence apparaît dans la zone décollée du pignon (points 7 et 8).

La fréquence caractéristique de la vitesse du vent incident intervient également sur les fluctuations de pression sur la façade au vent (point 6) et au droit du pignon (points 7 et 8).

Sur le versant au vent, les deux points de mesure 1 et 2 se situent dans la zone recollée où la taille des tourbillons est liée aux épaisseurs des couches limites générées. La gamme des fréquences caractéristiques s'étend au-delà de 2.5 Hz (cf. figure 5).

Dans le sillage, une seule fréquence caractéristique apparaît (points 3, 4 et 10). La fréquence f_o est de l'ordre de 0.12 Hz , elle correspond au nombre de Strouhal égal à 0.06 basé sur la hauteur totale $H = 4.6\text{ m}$.

Sur le pignon, dans la zone décollée, la fréquence caractéristique est liée à celle du détachement tourbillonnaire ($f_o = 0.22\text{ Hz}$). Elle correspond au nombre de Strouhal environ 0.12 basé sur la longueur ($L-H = 9.3 - 4.6 = 4.7\text{ m}$). On note l'existence dans cette zone d'autres fréquences caractéristiques (1 Hz , 1.5 Hz , 2 Hz ...) qui s'étendent au-delà de 2.5 Hz (cf. figure 5).

Le tracé temporel des pressions dans la zone décollée (points 7, 8 et 9) montre les forts pics dépressionnaires (figure 4) à durée de vie très courte (variation brutale), (ce qui se traduit par des hautes fréquences dans les spectres (figure 5). On note également l'instabilité de la pression dans cette zone (figure 6) phénomène signalé par Cermak [3] et Cook [4].

Conclusion :

Les fréquences dépassent 2.5 Hz dans les zones de recollement ($S_r > 0.87$) et de décollement ($S_r > 1.3$).

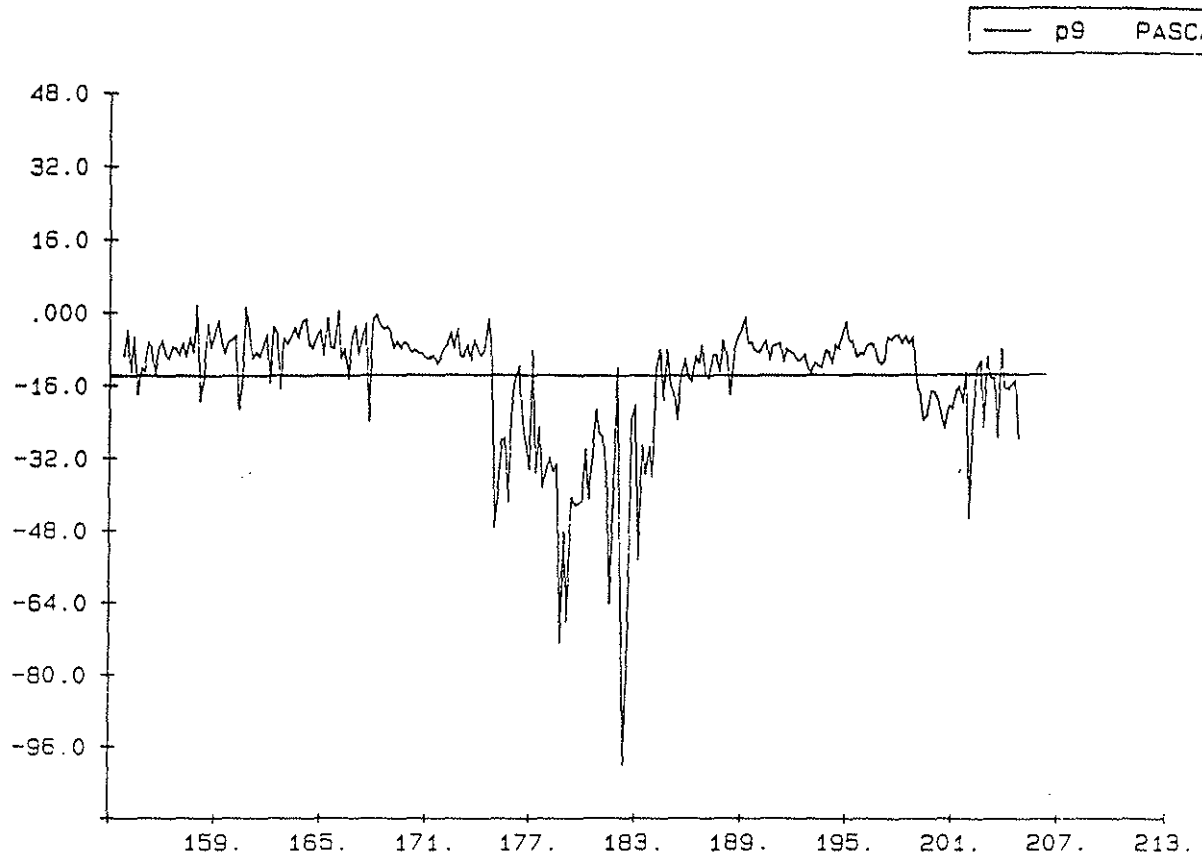


Figure 6 : Variations temporelles types de la pression externe dans la zone décollée : phénomène d'instabilité de pression.

3.2. Mesures complémentaires du champ de pression externe sur le toit

Les mesures sont effectuées sur le tiers du toit recouvert d'ardoises d'Angers. Cette partie a été équipée de 20 prises de pression externes sur chacun des deux versants (figure 7).

Pour différentes incidences de vent (0° , 30° , 60° , 75° , 90°) et quelques points caractéristiques, la pression externe a été mesurée avec des chaînes de mesure différentes par leurs caractéristiques (précisées en légende des figures 8, 9 et 10 qui montrent quelques exemples de résultats).

Nous notons sur la figure 8 que la gamme des fréquences caractéristiques dans la zone décollée correspond à $S_f \in [0.22, 2.2]$ et à $\frac{f}{U} \in [0.04, 0.4]$ (l'échelle de similitude dans la soufflerie est de 1/1).

Nous notons également sur les figures 8 et 9 que la fréquence de coupure ($f_c = 7\text{Hz}$) n'est pas adaptée à nos mesures (déformation du spectre vers les hautes fréquences dans la zone décollée).

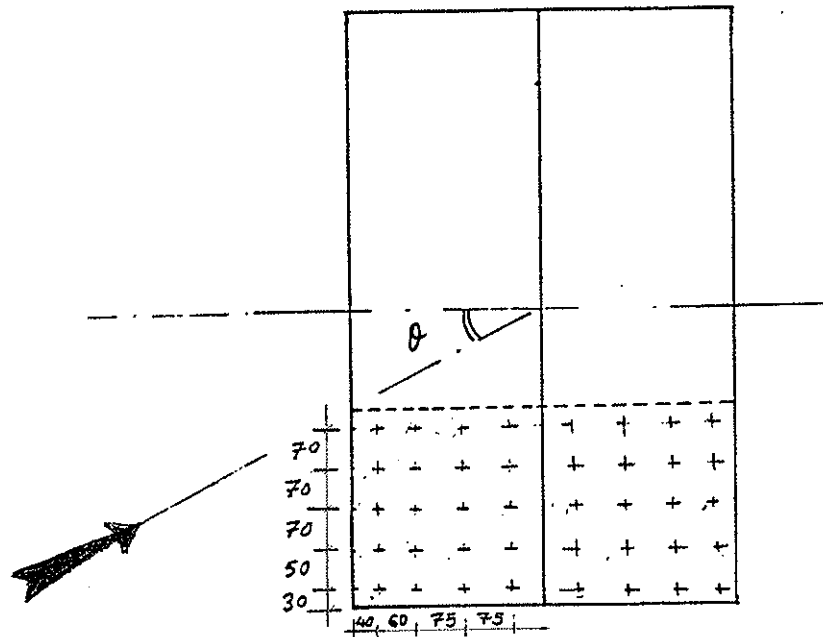


Figure 7 : Position des prises de pression externes

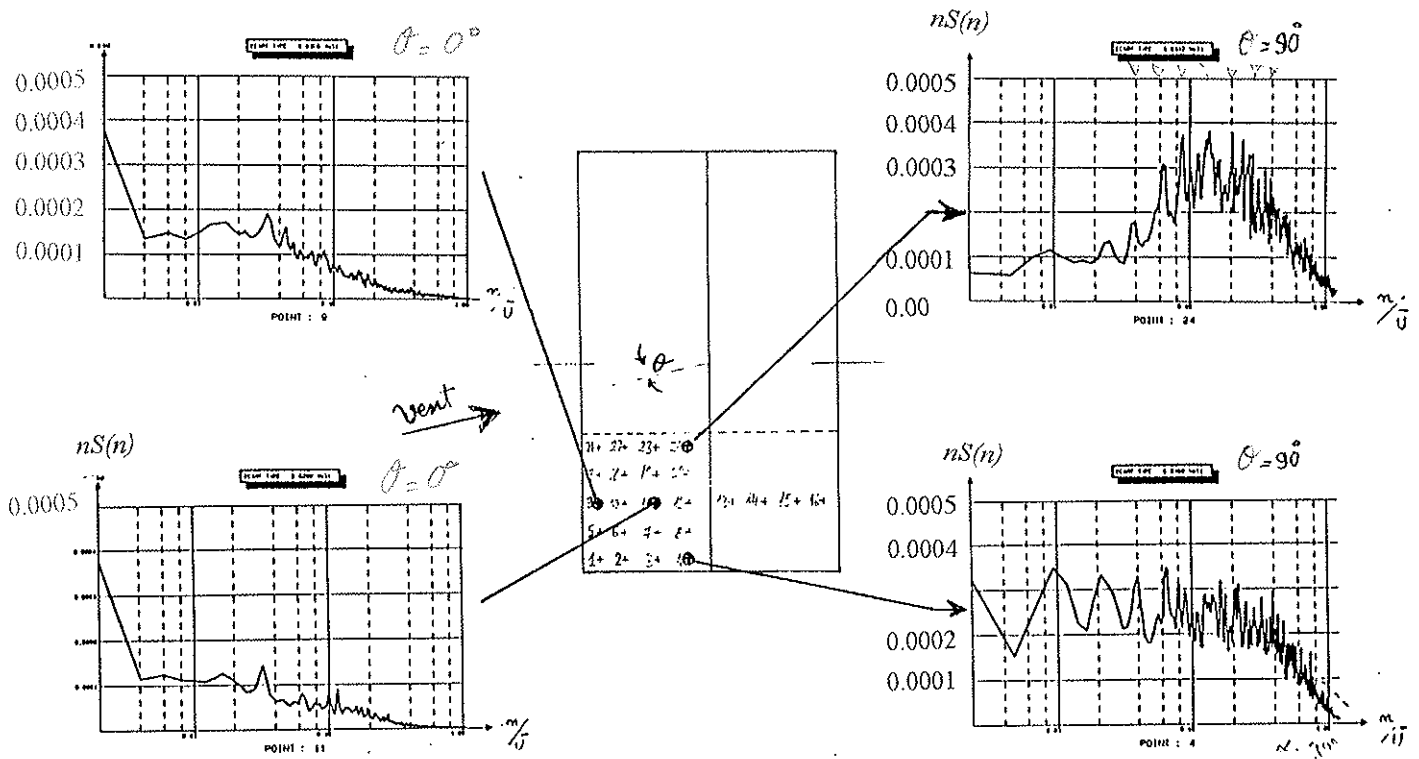


Figure 8 : Spectres des fluctuations de pression externe en 4 points dans les zones de recollement - $f_e = 15\text{Hz}$, $f_c = 7\text{Hz}$, réponse plate dans la gamme $[0,5]\text{Hz}$.

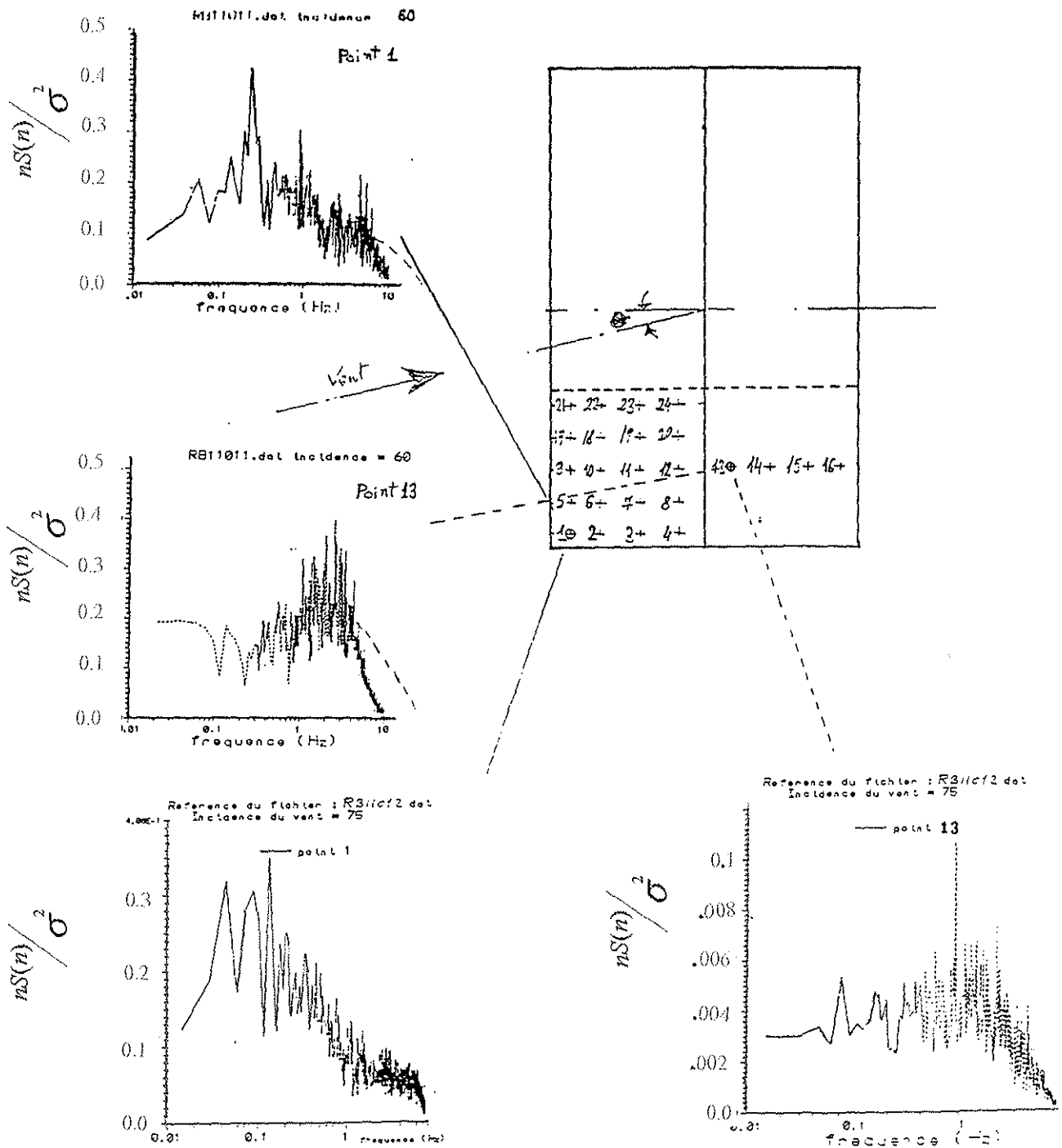
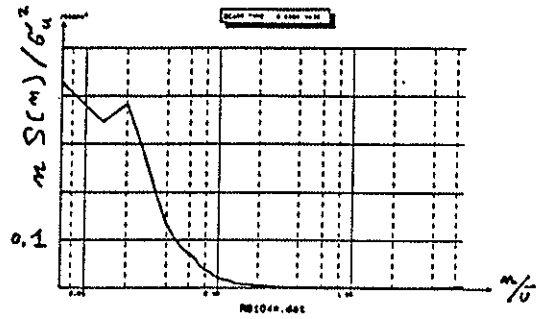
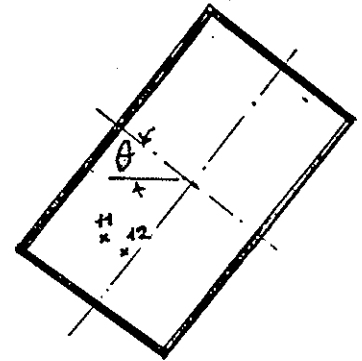


Figure 9 : Spectre d'énergie des fluctuations de la pression externe dans les deux points (1) et (13) pour deux incidences : 60° et 75°. $f_e = 20\text{Hz}$, $f_c = 7\text{Hz}$, réponse plate dans la gamme [0,5]Hz

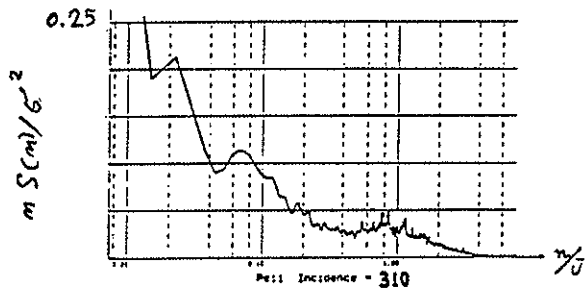


$$\bar{U} = 8.5 \text{ m/s}$$

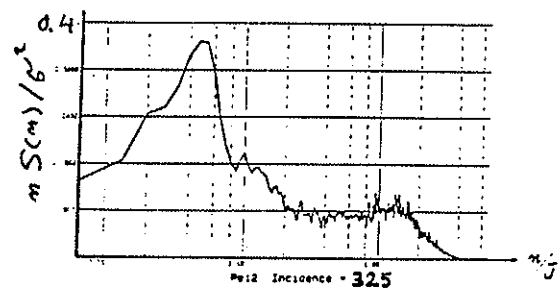
$$\text{E.T.} = 1.5 \text{ m/s}$$



*Spectre d'énergie de la vitesse
du vent incident*



Zone décollée (point 11)



Zone recollée (point 12)

	$\bar{C}_p$	CC'_p	$\hat{C}_p$	$\check{C}_p$
Point 11	- 0.84	0.30	0.23	- 1.63
Point 12	+ 0.17	0.10	0.63	- 0.30

*Figure 10 : Résultats de mesure de la pression externe dans les zones de décollement
et de recollement $f_e = 120\text{Hz}$, $f_c = 30\text{Hz}$, réponse plate dans la gamme $[0,15]\text{Hz}$*

Pour les mesures, dont les résultats sont illustrés figure 10, nous avons utilisé une chaîne à réponse plate jusqu'à 15 Hz (figure 11), dont la fréquence de coupure est 30 Hz ; la fréquence d'échantillonnage vaut 120 Hz.

L'analyse spectrale des pressions mesurées montre que le rapport $\frac{f_M}{U}$ est de l'ordre de 4 (zone de décollement, incidence $\approx -30^\circ$).

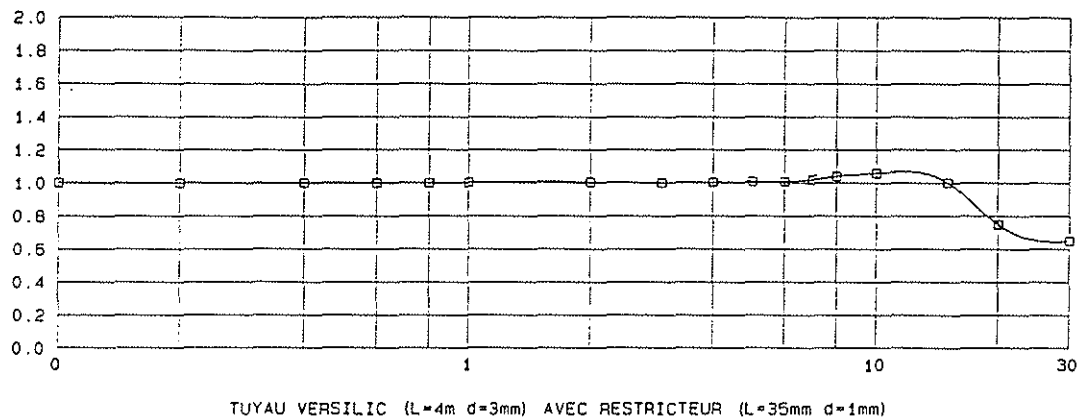


Figure 11 : Réponse dynamique de la chaîne de mesure de pression (sans filtre analogique).

4. OPTIMISATION DE LA FREQUENCE DE COUPURE

Nous devons étudier l'effet de la fréquence de coupure sur les valeurs des pics telle que $f_c < f_M$. Pour cela, nous avons mesuré la pression en un point simultanément par deux chaînes de fréquences de coupure différentes. Ensuite nous avons comparé les deux signaux obtenus (figure 12).

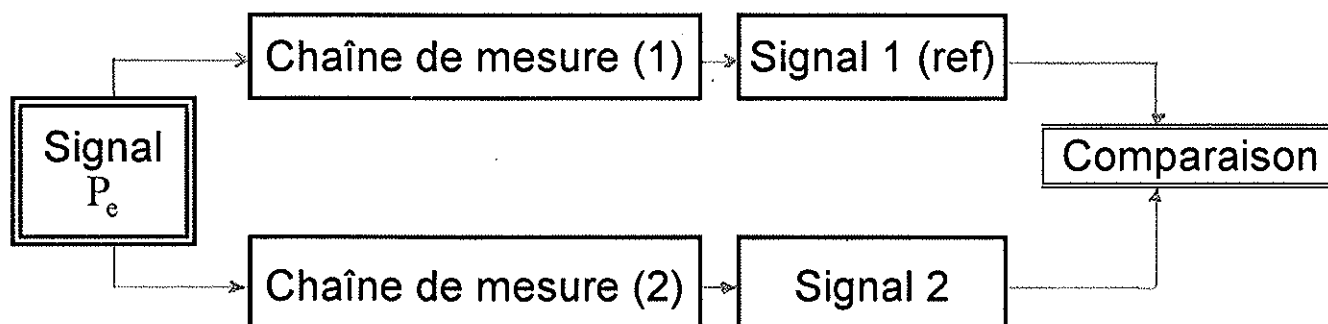


Figure 12 : Schéma de principe de l'essai.

Les mesures ont concerné uniquement les pressions dans les zones de décollement et de recollement.

* Résultats et commentaires :

La figure 13 montre un exemple de tracés temporels d'une même pression filtrée à 5 Hz et à 10 Hz. Nous notons en terme de C_p un écart sur les valeurs de pics de 0.28 au maximum.

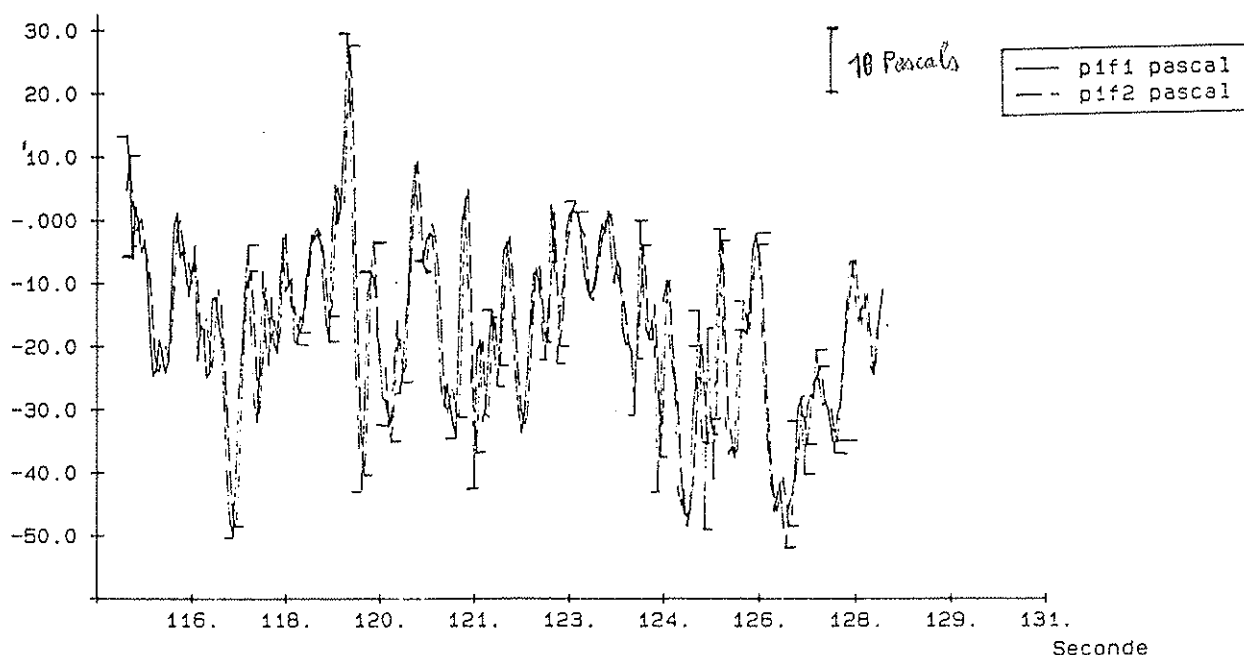


Figure 13 : Effet sur les valeurs de pic, du filtrage à 5 Hz d'un signal de pression, échantillonné à 20 Hz (le signal de référence est filtré à 10 Hz).

Les pressions mesurées n'ayant pas le même écart type ni la même distribution spectrale la comparaison a donc porté sur $\frac{\hat{C}_{P_1} - \hat{C}_{P_2}}{\hat{C}_{P_1}}$ avec P_1 : la pression de référence, P_2 : la pression filtrée à $f_{c_2} < f_{c_1}$ (cf. figure 14). A la suite des résultats obtenus nous fixons f_c à 15 Hz. Ce filtrage induit une erreur relative sur $\hat{C}_p$ au maximum de 5 %, la référence étant filtrée à 30 Hz pour un point situé dans une zone très énergétique (décollement).

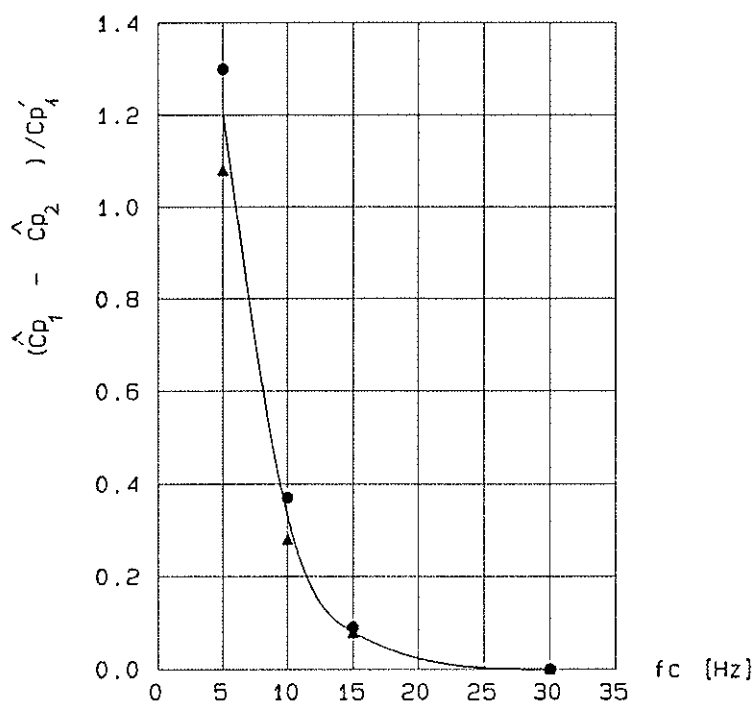


Figure 14 : Effet de filtrage à une fréquence de coupure $f_c < f_M$.

5. ANALYSE DES VALEURS DE PICS $\hat{C}_{P_e}, \check{C}_{P_e}$

Cette analyse a pour but de déterminer la gamme optimale des capteurs de pression. Nous traçons alors la densité de probabilité des extrema centrés sur 10 min et considérés indépendants entre eux, ceci pour tous les points de mesure et toutes incidences confondues (figures 15 et 16).

Pour une probabilité de non dépassement de 90 %, $\hat{C}_p$ est inférieur à 1 et $\check{C}_p$ de l'ordre de - 2.6. Cette dernière valeur correspond à - 625 Pa pour une vitesse de vent moyen égale à 20 m/s. La gamme des capteurs ± 1000 Pa paraît donc bien adaptée.

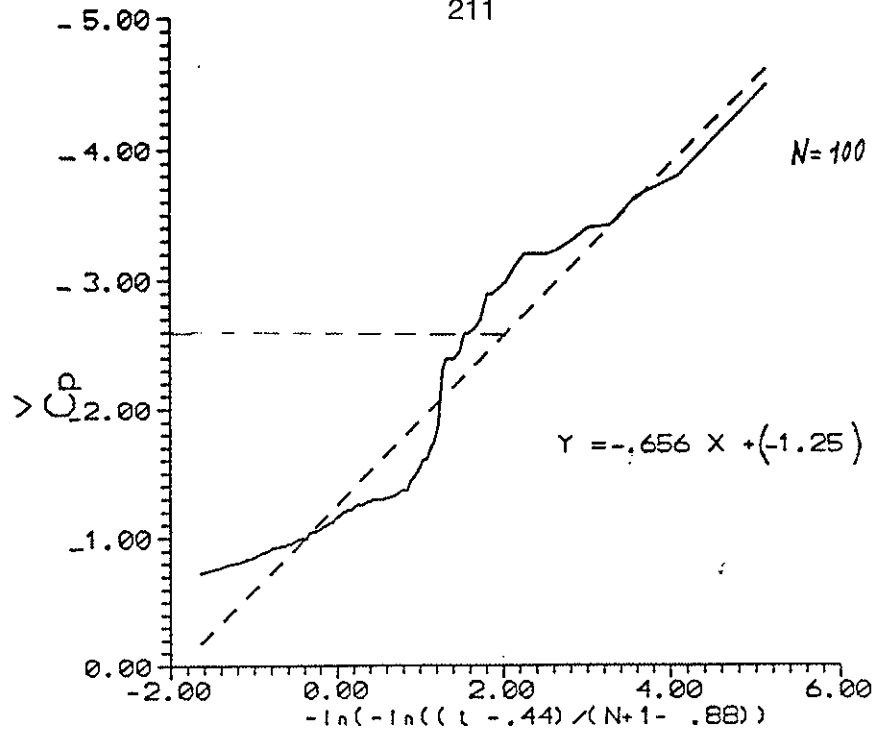


Figure 15 : Distribution cumulative des pics dépressionnaires $\hat{C}_p^v$ calculée sur des durées (10 min)

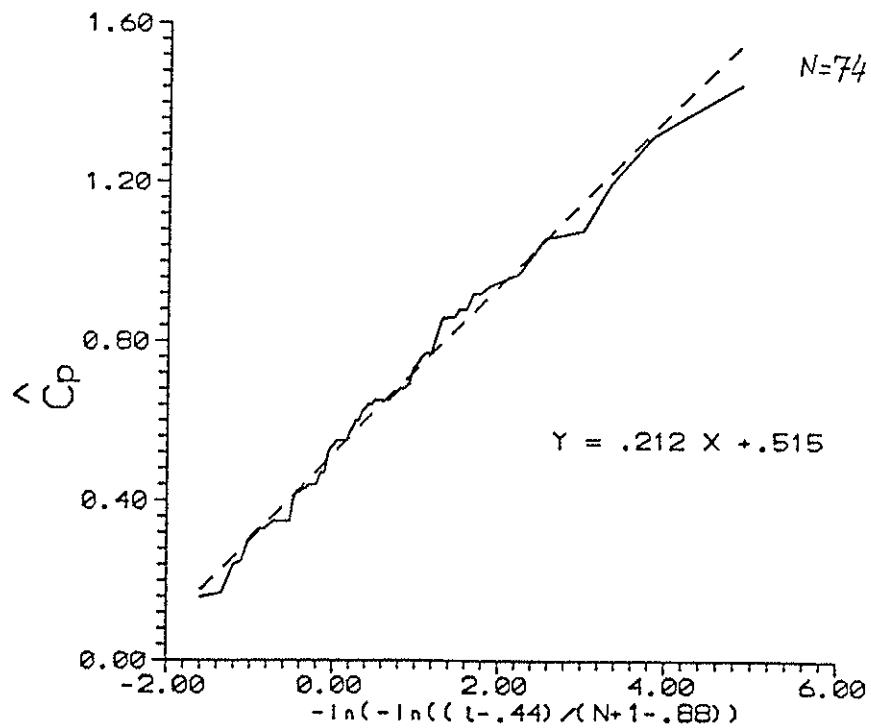


Figure 16 : Distribution cumulative des pics $\hat{C}_p$ calculés sur des intervalles de temps de 10 min.

6. CHAMP DE PRESSION DIFFERENTIELLE SUR LE TOIT (cas : incidence normale aux façades).

Analyse en terme de $\Delta C_p = \frac{P_e - P_i}{\frac{1}{2} \rho \bar{U}^2}$:

Cette analyse a été menée pour optimiser le maillage. Les lignes d'isovaleurs de $\overline{\Delta C_p}$ (figure 17) et de $\Delta C_p'$ (figure 18) montrent que le champ de pression dans le sillage a un gradient faible contrairement à celui sur le versant au vent, où deux zones se distinguent :

- une zone située près des bords à fort gradient et grande énergie de fluctuations. Cette bande a une largeur de 1 m ce qui correspond à B/3 où B est la longueur du versant.
- une zone à gradient plus faible, située vers le milieu. Les variations spatiales de la pression sont très faibles dans le sens perpendiculaire à l'écoulement.

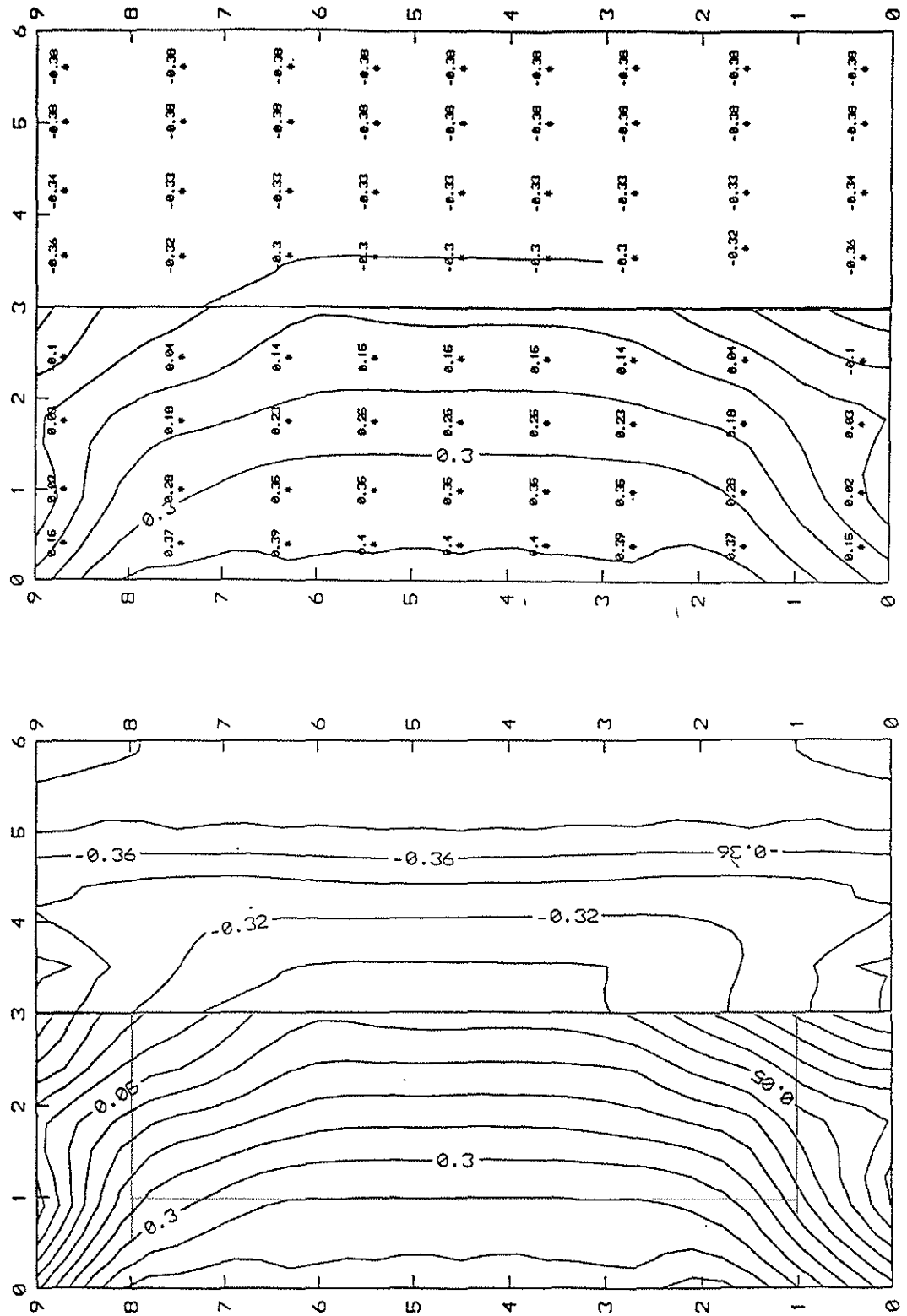


Figure 17 : Lignes d'isovaleurs de $\overline{\Delta C_p}$ (pour incidence du vent 0°).

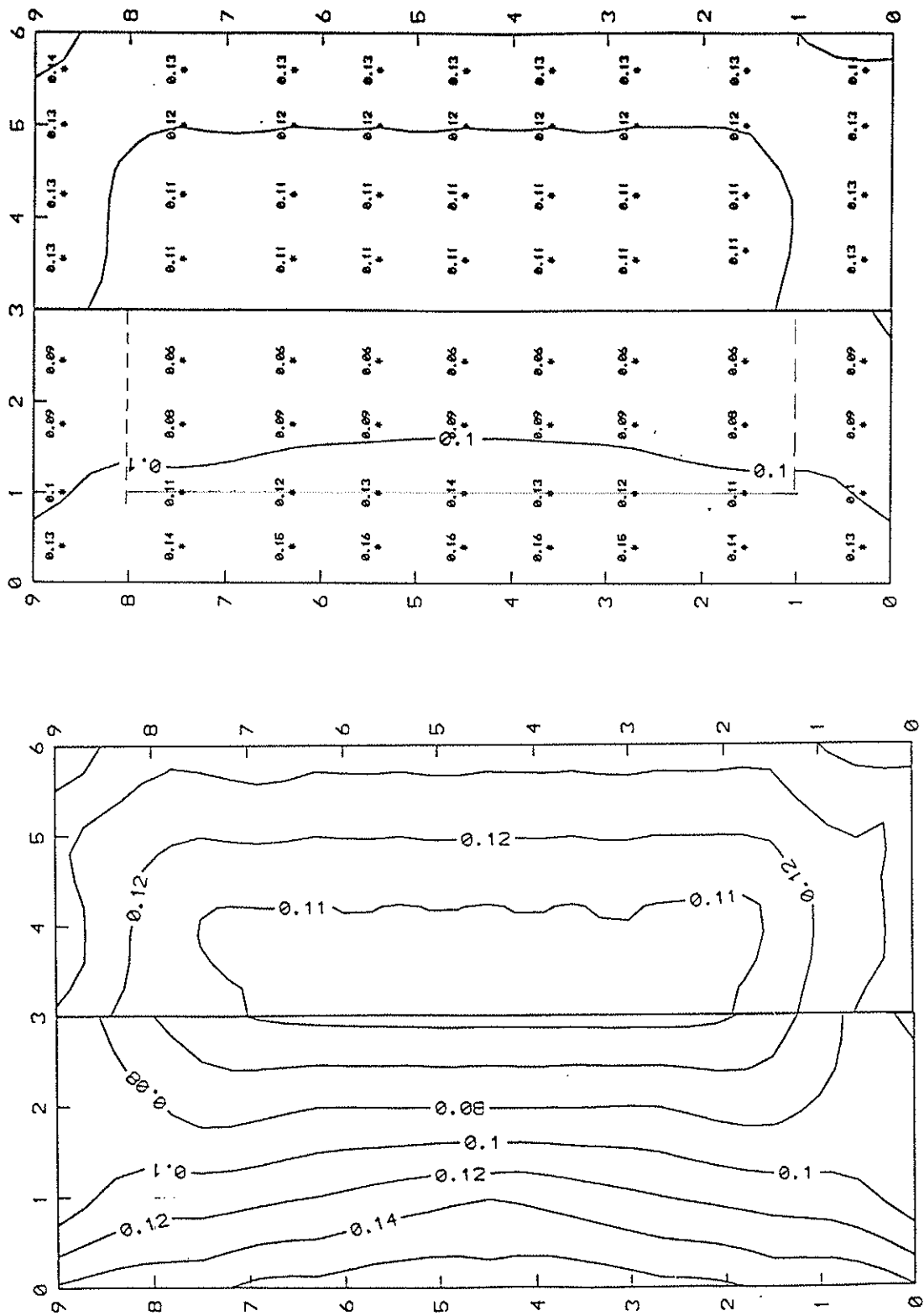


Figure 18 : Lignes d'isovaleurs de $\Delta C_p'$ (pour incidence du vent 0°).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. VILLAIN
 "Champ de pression induit par le vent sur la maison expérimentale de Bouin (Vendée). Banque de données expérimentales"
 Division Soufflerie Climatique du CSTB (Nantes)
 1992, EN-SC 92.05, 56 p.

- [2] F. CORLAIS
 "Etude en soufflerie et in situ du champ de pression induit par le vent derrière les bardages et autour d'une structure de section circulaire. 3ème cycle, dynamique des fluides, Nantes, 1987"
 Rapport CSTB - Nantes, EN-ADYM 87.33, 133 p, 1987, bibliographie : 67 ref.

- [3] J.A. PETERKA, J.E. CERMAK
 Peak pressure duration in separated regions on a struture.
 In : Wind effects on structures.Preceedings of wind effects on structures 2nd USA - JAPAN research seminar, K YOTO, 9 au 13 septembre 1974, 1976, 163-174, bibliographie : 11 ref (01688A/AP02)

- [4] N.J. COOK
 The designer's guide to wind loading of building structures - Par 1 and annexe 1.
 Building Research Establishment - London, Butterworths, 1985, 371 p,
 bibliographie : 152 ref (00586N/B520)

ANNEXE 4

PROPOSITION DE MISE EN OEUVRE D'UN BANC D'ESSAI.

Proposition de mise en oeuvre d'un banc d'essai.

Le banc a deux objectifs :

- effectuer un test d'étanchéité (détermination de seuil d'étanchéité pour différent type de couverture et les paramètres d'influence).
- mesurer la perméabilité à l'air des différents types de couvertures en prenant en compte les effets de la pluie et de l'écoulement d'air tangentiel.

La conception du banc d'essai doit vérifier les critères suivants :

- pente réglable,
- direction et vitesse de l'écoulement d'air tangentiel réglables,
- fluctuations de la pression différentielle intrados-extrados de l'échantillon réglables et reproductibles,
- modélisation réaliste des eaux reçues par l'échantillon (ruissellement, pluie battante),
- étanchéité assurée du volume de caisson (comble),
- dimension de l'échantillon testé suffisamment grande pour assurer une mise en oeuvre des produits de couverture conformément à la réglementation et suffisamment petite pour assurer un bon contrôle des champs de pression et de vitesse (large gamme, homogénéité),
- possibilité de mesure de :

. $\Delta P(t)$

. $U(t)$

. quantité d'eau traversant l'échantillon

. débit d'air traversant l'échantillon (pour l'application spécifique de la mesure de la perméabilité à l'air de l'échantillon).

Conception proposée :

La figure 1. montre le schéma de principe du banc, qui s'appuie sur l'analyse d'un certain nombre des bancs existants [1, 2, 3]

La génération de l'écoulement tangentiel est assurée par deux ventilateurs (coupe A figure 1) réglables en vitesse de rotation (1), divergent (2) et convergent (3), séparées par un caisson (4). Nous obtenons un écoulement dans la veine (5) quasi-laminaire lorsque le caisson (4) est vide, un écoulement turbulent pourrait être modélisé à l'aide d'obstacles statiques et dynamiques placés dans le caisson (4) et dans le convergent (si nécessaire).

La pluie est modélisée par deux rampes à eau (8). L'une, placée en amont de l'échantillon, modélise la pluie battante. L'autre, placée en aval, modélise le ruissellement d'eau venant des zones supérieures à celle étudiée. Le débit d'eau peut être réglé pour chaque rampe indépendamment.

L'échantillon étudié (6) est monté sur un cadre circulaire, l'ensemble constitue un plateau tournant pour pouvoir régler l'incidence θ de l'écoulement tangentiel. Une fois l'incidence θ réglée, l'étanchéité du comble est obtenue à l'aide d'un joint gonflable. Le caisson du comble (7) à parois étanches transparentes pour l'observation des fuites.

L'homogénéité de la pression ΔP est assurée par six arrivées d'air (tubes flexibles (9) liés au distributeur 10) réparties uniformément sur les parois du comble.

L'entrée d'air est dotée d'un dispositif pour limiter les tourbillons (coupe C, figure 7.7.).

Le réglage de la pente est assuré par une possibilité de rotation de l'ensemble autour d'un axe horizontal (11).

Le débit $Q(t)$ aspiré du distributeur (10) peut être : constant, progressif par palier (escalier) linéairement progressif ou cyclique.

Les variations de $Q(t)$ se traduisent par une variation de $\Delta P(t)$.

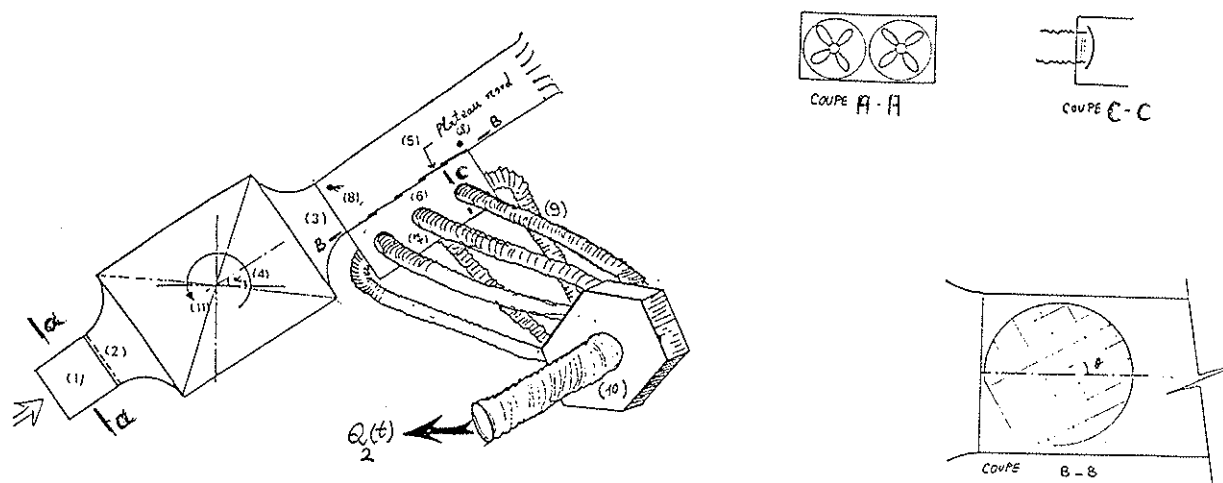


Figure 1 : Schéma de principe.

Système de réglage de $\Delta P(t)$:

La figure 2 montre le schéma de principe avec tous les dispositifs rassemblés. La suppression de certains d'eux modifie la nature du signal.

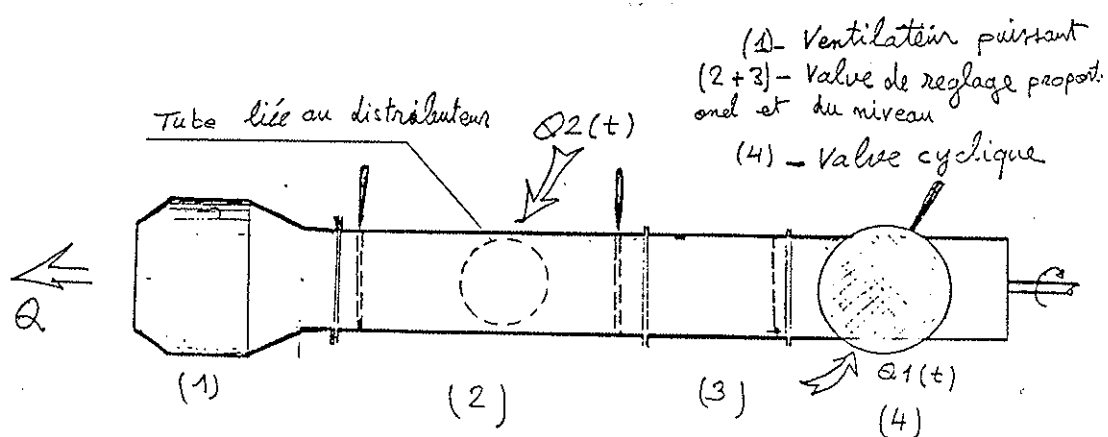


Figure 2 : Schéma de principe de contrôle de $Q(t)$.

L'aspiration est effectuée par un ventilateur puissant (1), lié à la valve de réglage de niveau (2). Les valves (3) et (4) sont utilisées pour l'obtention d'un signal cyclique à fréquence et amplitude contrôlable. Les figures (3 à 5) montrent le principe de chacune des valves.

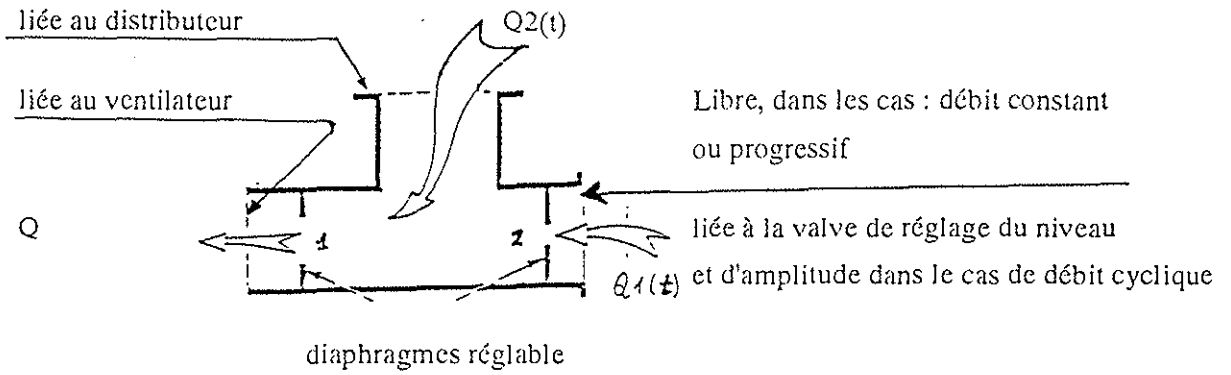


Figure 3 : Valve de réglage proportionnel

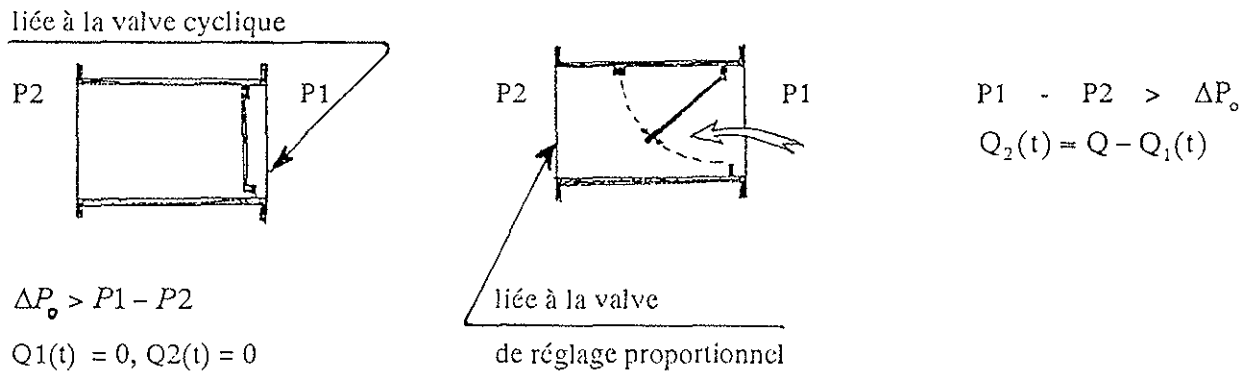


Figure 4 : Valve de réglage de niveau

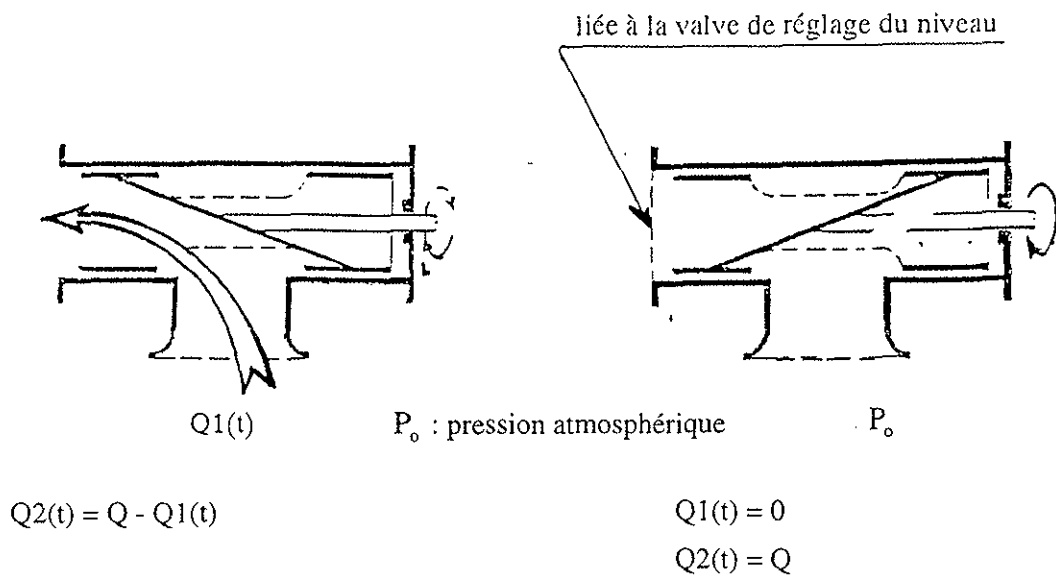


Figure 5 : Valve cyclique.

Adaptation aux mesures de la perméabilité à l'air de l'échantillon :

Le montage principal est identique à celui présenté dans la figure 1. Le distributeur (10) est lié au montage présenté sur la figure 6 qui ressemble à celui utilisé pour la mesure de perméabilité en statique (présenté dans le chapitre 5).

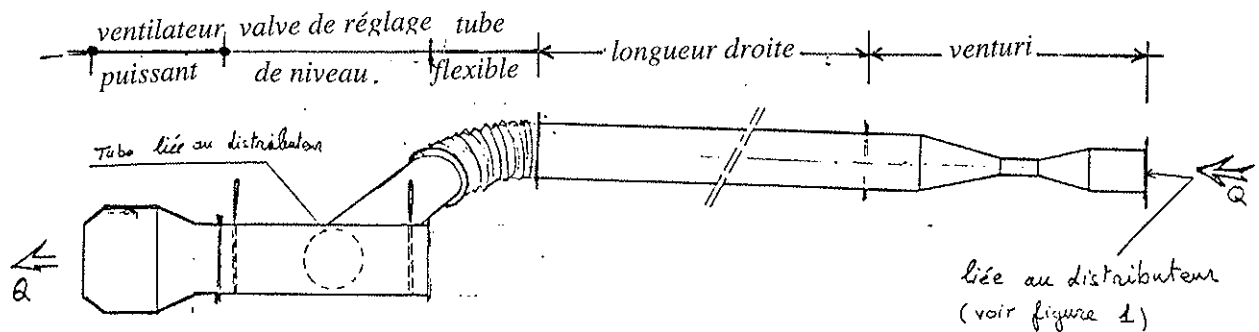


Figure 6 : Adaptation aux mesures de perméabilité.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. DUTRUEL
 "Etudes réalisées au CERIB"
 IN : compte rendu du rendez-vous du CSTB : climatologie et toitures
 1992, 13-21, (12462A/DOCP)

- [2] ISO
 "Roofs - waterproofing test"
 1984, ISO/TC 59/SC 6/WG 5 N77E, 13 p (09048A/DOCA)

- [3] D. REDREARN
 "A test rig for proof-testing building components against wind loads"
 Building Research Establishment (GBR)
 IP 19/84, 4 p, 1984, bibliographie : 1 ref (04614A/DOCA)

Notations générales

A	: grandeur physique
$\overline{A}$	: moyenne de cette grandeur
a'	: fluctuation de la grandeur autour de sa moyenne
$\dot{A} = \frac{dA}{dt}$	: dérivée première de A par rapport au temps t
$\ddot{A} = \frac{d^2A}{dt^2}$	: dérivée seconde de A par rapport au temps t
$A' : \sigma_a$	: écart type de la grandeur A
$\hat{A} / \check{A}$	: valeur maximale/valeur minimale pendant toute la durée d'observation
$S_a(n), S_a(\omega)$	: spectre des fluctuations de cette grandeur
δA	: erreur sur la grandeur A

Liste des principaux symboles.

B	: longueur du versant [m]
C	: coefficient de perméabilité $[m.s^{-1} p_a^{-N}]$ où $Q = C \cdot S \cdot \Delta P^N$
C_x, C_y, C_0	: coefficients de perméabilité à l'air relatifs à la perméabilité à l'air des parois $S_x, S_y, S_0 [m.s^{-1} p_a^{-N}]$
C_d	: coefficient de décharge [adimensionnel]
C_{d_o}	: coefficient de décharge pour $(R_e > 10^5)$
C_p	: coefficient de pression $\frac{P - P_s}{\frac{1}{2} \rho \overline{U}_{ref}^2}$ [adimensionnel]
e_o	: épaisseur de l'écran [m]
E	: module d'Young [Pascal]
f, n	: fréquence des fluctuations [Hz]
F_A	: facteur d'amortissement [adimensionnel] $= \left(\frac{\overline{U}}{C_a} \right)^2 \left(\frac{V_o / 4}{C_d s L_e} \right)$
f_o	: fréquence propre [Hz]
f_e	: fréquence d'échantillonnage [Hz]
f_c	: fréquence de coupure [Hz]
I_p	: intensité de pluie [mm/h]
I_R	: intensité d'eau de ruissellement
I_x, I_y, I_z	: intensité de turbulence dans les trois directions [adimensionnelle]
K_p	: coefficient de flexibilité d'une paroi $[m.Pa^{-1}]$
$1 / K_v$	: indice de flexibilité $= \frac{K_p \cdot S}{V_o} [Pa^{-1}]$
$1 / K_a$	: coefficient de compressibilité de l'air $[Pa^{-1}]$
L_o	: distance entre chevrons [m]
L_u^x	: échelle de turbulence de la composante u dans la direction x [m]

N	: exposant adimensionnel
N_x, N_y, N_0	: exposants adimensionnels relatifs à la perméabilité à l'air des parois S_x, S_y, S_0
N_s	: nombre de surfaces
N_m	: nombre de mailles
N_e	: nombre d'éléments de l'enveloppe du comble
P_o	: pression atmosphérique [Pa]
$P_i, P_i(t)$	: pression interne au temps t [Pa]
$P(i) = P(i, t)$	: pression dans la maille (i) au temps t [Pa]
$P_e(i, j, t), P_e(i, j)$	: pression externe sur la surface $S(i, j)$ au temps t [Pa]
P_s	: pression statique de référence [Pa]
P_{dyn}	: pression dynamique = $\frac{1}{2} \rho \bar{U}^2$ [Pa]
P_{io}	: pression interne initiale [Pa]
PI	: pression interne dans un volume du comble [Pa]
Q	: débit volumique [$m^3 \cdot s^{-1}$]
$R(t)$	: rayon de courbure de la déformée de l'écran au temps t
R_e	: nombre de Reynolds = $\frac{\bar{U}D}{\nu} = \rho \frac{\bar{U}D}{\mu}$
S	: surface totale d'une paroi perméable [m^2]
s	: surface d'un orifice [m^2]
s_e	: surface effective ouverte d'une paroi perméable [m^2]
$S(i, j)$	: la surface j de l'élément i de la paroi [m^2]
S_i	: nombre de Strouhal [adimensionnel]
t	: temps [s]
T_r	: temps de réponse [s]
T	: durée
T_u^x	: échelle de temps de la composante u dans la direction x [s]
$\bar{U}_{ref}$	: vitesse moyenne de référence [$m \cdot s^{-1}$]
$U(t)$	: composante longitudinale de la vitesse instantanée [$m \cdot s^{-1}$]
$V(t)$	: composante transversale de la vitesse instantanée [m/s]
$W(t)$	: composante verticale de la vitesse instantanée [m/s]
V_o	: volume [m^3]
u_o	: vitesse moyenne de l'écoulement dans l'orifice [m/s]

symboles grecs

α	: pente du toit [degré]
γ	: exposant isentropique = 1.4 [adimensionnel]
δ	: profondeur de l'ouverture [m]

ΔP	: différence de pression d'un côté à l'autre d'un orifice, d'une paroi... [Pascal]
θ	: incidence du vent [degré]
μ	: viscosité dynamique de l'air
ν	: viscosité cinématique = $\frac{\mu}{\rho}$
ξ	: coefficient de perte de charge [adimensionnel] (dépend du nombre de Reynolds R_e)
ξ_0	: coefficient de perte de charge pour $R_e > 10^5$ (constant)
ξ_c	: coefficient de perte de charge de la couverture [adimensionnel]
ρ	: masse volumique de l'air [kg/m^3]
ρ_e	: masse volumique de l'air à l'extérieur du volume [kg/m^3]
ρ_i	: masse volumique de l'air à l'intérieur du volume [kg/m^3]
ρ_o	: masse volumique de l'air liée à P_o la pression atmosphérique [kg/m^3] vent [m/s]
$\Phi(t)$	: angle tangente de la déformée de l'écran à l'appuis au temps t [radian]
$\varphi(t)$	: taux de variation volumique lié à la flexibilité des parois [adimensionnel]
$\psi(t)$	: taux de variation volumique lié à la différence des débits entrant et sortant [adimensionnel]
ω	: fréquence angulaire

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] C. SACRE, P. DUCHENE-MARULLAZ, J. BIETRY -
CSTB Nantes
Collection REEF., CSTB - Paris, 1979
Sciences du bâtiment, 75 p, bibliographie : ref dissem (09346A/DOCB)
- [2] D. DELAUNAY
"La turbulence atmosphérique en mer et par vents forts"
Rapport CSTB Nantes, EN - CLI 87.12 L
- [3] J. WIERINGA
"Updating the Davenport roughness classification"
J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics., 41-44, p 357-368
- [4] M. DUFRESNE DE VIREL, P. JAULIN, J. VILLAIN
"La soufflerie climatique du CSTB. Simulation de la pluie"
Cahiers du CSTB vol 349, n° 2718, 13 p, bibliographie : 10 ref , 1994
- [5] C. SACRE
"Concomitance de la pluie et du vent en France - Approche statistique"
Rapport CSTB Nantes, EN-CLI 82.54 L, N 232, Cahier du CSTB n° 1792, 1982
- [6] C. SACRE
"Concomitance de la pluie et du vent en France - Approche statistique"
Rapport CSTB Nantes, EN-CLI 84.6 R
- [7] D. DELAUNAY, P. DUCHENE MARULLAZ, C. SACRE
"Analyse statistique de la vitesse du vent"
Cours de DEA sciences et techniques du bâtiment - ENPC
- [8] J. GANDEMER, G. BARNAUD, J. BIETRY
CSTB - Nantes
Collection REEF, CSTB - Paris, 1979
Sciences du bâtiment, 106 p, bibliographie : ref dissem (09347A/DOCB)
- [9] N.J. COOK
"The designer's guide to wind loading of building structures - Part 1 and annexe 1 -"
Building Research Establishment - London, Butterworths, 1985, 371 p,
bibliographie : 152 ref (00586N/B520)

- [10] L. KAIROUANI
 "Champ de vitesse, champ de pression autour d'un bâtiment : application aux effets du vent sur les capteurs solaires"
 Rapport CSTB - Nantes EN-ADYM 82.21 L, 1982, 250 p, bibliographie : 28 ref

- [11] J.M. GERMA
 "Note bibliographique sur les sillages et la couche limite atmosphérique"
 Rapport CSTB - Nantes EN-ADYM 79.11 L, 1979

- [12] J.A. PETERKA, J.E. CERMAK
 "Peak pressure duration in separated regions on a structure.
 In : Wind effects on structures
 Preceedngs of wind effects on structures 2nd USA - JAPAN research seminar,
 KYOTO, 9 au 13 septembre 1974, 1976, 163-174, bibliographie : 11 ref
 (01688A/AP02)

- [13] D. LAKEHAL, D. PIERRAT
 "Simulation d'un écoulement turbulent autour d'une maison. Estimation des coefficients de pression sur les parois"
 Rapport CSTB - Nantes, EN-CLI 92.08, 45 p, bibliographie : 16 ref

- [14] C. JANSENS, J. LECOMPTE
 "Couvertures en plaques ondulées en fibre-ciment pour toiture :
 étanchéité à la pluie et au vent"
 1993

- [15] M. DUFRESNE DE VIREL, P. PALIER, J. VILLAIN
 "Etanchéité à l'eau de couvertures en éléments fibre-ciment"
 Rapport CSTB - Nantes, EN-SC 92.12 C, 1992

- [16] AP, NGY SRUN
 "Etude théorique et expérimentale de l'équilibre d'un ménisque cylindrique dans joint ouvert application étanchéité vent et pluie couverture tuile.
 Thèse D. Ing., Paris VI, 180 p, 1977 (02359A/AA03)

- [17] G. VLACHOS
 "Etude de l'entraînement par le vent des films d'eau sur un plan incliné.
 Application aux problèmes de l'étanchéité des joints du bâtiment"
 Thèse D. Ing., Université Paris VI, 156 p, 1987, 75 ref (04754A/DOCB)

- [18] G. ROBINSON, M.C. BAKER
 "Effet de la pluie poussée par le vent sur les bâtiments"
 Conseil National de Recherche du Canada
 NRCC 14792F, DT 445, 54 p, 1982, bibliographie : 37 ref (07367A/C330)

- [19] R.A. HAZELWOOD
"Rain penetration mechanisms for lapped pitched roofs"
Chemistry & industry, 537-540, 1979, bibliographie : 7 ref (14067A/DOCA)

- [20] J. VILLAIN
"Étanchéité à l'eau des couvertures. Etude paramétrique expérimentale"
Rapport CSTB - Nantes, EN-SC 92.29, 1992

- [21] J. GANDEMER
"La recherche sur l'étanchéité des toitures au CSTB Nantes".
IN : Compte rendu du rendez-vous du CSTB : climatologie et toitures
Rapport CSTB - Nantes, EN-SC 91.16, 17 p, 6-12, 1991

- [22] I.R. KILLIP, D.W. CHEETHAM
"The prevention of rain penetration through external walls and joints by means of pressure equalization"
Building environment, 1984, N2, 81-91 (07767A/C330)

- [23] F. DUTRUEL
"Études réalisées au CERIB"
IN : compte rendu du rendez-vous du CSTB : climatologie et toitures
1992, 13-21, (12462A/DOCP)

- [24] R.C. WEAST
"Handbook of chemistry and physics"
63RD ED 1982-83, BOCA RATON, CRC Press, 1983, Pag mult (00043N/B300)

- [25] R. COMOLET
"Mécanique expérimentale des fluides"
Paris, Masson, 1982, 2 vol, (14815P/B250)
voir aussi (14815P1/B250)

- [26] A. BOUSSICAUD
"Calcul des pertes de charge"
Paris : Editions parisiennes chaud-froid-plomberie, 232 p, 1983 (00679N/B250)

- [27] I.E. IDEL'CIK, M. MEURY
"Mémento des pertes de charge. Coefficients de pertes de charges singulières et de pertes de charge par frottement"
Paris, Editions Eyrolles, 494 p, 1986 (19750P/B250)

- [28] B.J. VICKERY
"Gust factors for internal. Pressures in low rise building"
J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 23, 259-271, 1986,
bibliographie : 5 ref (00922A/DOCA)

- [29] A.G. DAVENPORT, D. SURRY
 "The estimation of internal pressures due to wind with application do cladding pressures and infiltration"
 IN : Wind pressure workshop, Bruxelles 1984
 Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, 1984, bibliographie : 7 ref (09775A/DOCA)

- [30] C. KRAMER, H.J. GERHARDT
 "Wind loads on permeable roofing systems"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics., 1983, V 13, N 1-3, 347-358,
 6 th conf. wind eng. (03482A/AK04)

- [31] SCHNUCK, FINKE, JENISCH, OSTER
 Dach atlas - geneigte Dächer
 (atlas des toits - toits inclinés)
 Rudolf Müller GmbH, Köln 1991

- [32] FRICK, KNOLL, NEUMANN, WEINBRENNER
 Baukonstruktionslehre - Teil 2
 (leçon de construction - part 2)
 B.G. Teubner, Stuttgart 1993

- [33] C. KRAMER, H.J. GERHARDT, H.W. KUSTER
 "On the wind-loading mechanism of roofing elements"
 J. Insdutrial Aerodynamics, 4, 1979, 415-427

- [34] R.J. HAZELWOOD
 "Wind loading"
 Fluid Mechanics Research Meeting
 NPL, London, 1976

- [35] M. FAHRTASH, H. LIU
 "Internal pressure of low rise building. Field measurements"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 36, 1191-1200, 1990,
 bibliographie : 6 ref (11794A/DOCA)

- [36] F. ALLARD, Y. UTSUMI
 "Airflow trthrough large openings"
 Energy and buildings, 18, 133-145, 1992

- [37] R.I. HARRIS
 "The propagation of internal pressures in buildings"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 34, n°2, 169-184, 1990
 bibliographie : 5 ref (10664A/DOCA)

- [38] J.P. HOLMES
 "Mean and fluctuating internal pressures induced by wind"
 Proceedings of 5th international conference of wind engineering, Fort Collins, 8 au 14
 juillet 1979

- [39] H. LIU, P.J. SAATHOFF
 "Building internal pressure : sudden change"
 Journal Engineering Mechanics, ASCE, vol 107, n° EM2, 309-322
 bibliographie : 11 ref (03109A/AL04)

- [40] H. LIU, K.H. RHEE
 "Helmholtz oscillation in building models"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 24, 95-115,
 bibliographie : 8 ref (09810A/AL04)

- [41] T. STATHOPOULOS, H.D. LUCHIAN
 "Transient wind-induced internal pressures"
 Journal Engineering Mechanics, ASCE, vol 115, n° 7, 1501-1514,
 bibliographie : 7 ref (10335A/DOCA)

- [42] H.J. GERHARDT, C. KRAMER
 "Wind loads on wind-permeable building facades"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 11, 1-20,
 bibliographie : 15 ref (03932A/DOCA)

- [43] H. LIU
 "Wind tunnel modeling of building internal pressure"
 Transp. Engng. J., Proc ASCE, vol 108, n° 6, 691-696 (03119A/AL04)

- [44] F. HAGHIGHAT, J. RAO, P. FAZIO
 "The influence of turbulent wind on air change rates, a modelling approach"
 Building environment, vol 26, n° 2, 95-109, 1991, 1991, bibliographie : 26 ref
 (11098A/DOCA)

- [45] H. LIU, K.H. RHEE, M. FARTASH
 "Wind induced pressure inside buildings"
 IN: proceedings of advancements in aerodynamics, fluid mechanics, and hydraulics,
 Minneapolis, 3-6 juin 1986, 799-805, 1986, bibliographie : 14 ref (11519A/DOCA)

- [46] R. TARBADAR
 "Etude de la pression interne dans une cavité dotée d'une paroi perméable soumise à un
 écoulement turbulent. Application au cas d'un comble. Analyse bibliographique"
 Rapport CSTB - Nantes - EN SC - 92.24C, 1992

- [47] P.J. SAATHOFF, H. LIU
 "Internal pressure of multi-room buildings"
 Journal Engineering Mechanics, ASCE, vol 109, n° 3, 908-919, 1983,
 bibliographie : 7 ref (00659A/AS09)

- [48] J.B. VICKERY, C. BLOXHAM
 "Internal pressure dynamics with a dominant opening"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 41, n° 1/3, 193-204, 1992
 bibliographie : 10 ref,

- [49] D.D. KERR
 "The rain screen wall"
 Progressive architecture, vol 51, n° 8, 47-52, 1990, bibliographie : 12 ref
 (12247A/DOCA)

- [50] A. BASKARAN
 "A numerical model to evaluate the performance of Pressure Equalized Rainscreen
 walls"
 Building environment, vol 29, n° 2, 159-171, 1994, bibliographie : 24 ref
 (14434A/DOCA)

- [51] P. FAZIO, T. KONTOPIDIS
 "Cavity pressure in rain screen walls"
 Building environment, vol 23, n° 2, 137-143, 1988, bibliographie : 7 ref
 (03941A/AF03)

- [52] J. XIE, G.D. SCHUYLER, H.R. RESAR
 "Prediction of net pressure on pressure equalized cavities"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, vol 44, n 1/3, 2249-2460,
 bibliographie : 3 ref (12550A/DOCA)

- [53] A. CHAIBI
 "Analyse des charges instantanées induites par le vent sur une paroi perméable. Etude
 en vraie
 grandeur, simulation numérique et application aux règles de calcul"
 Doctorat, dynamique fluides transfert, ENSM, Nantes
 Rapport CSTB - Nantes, EN-ECA 91.04, 241 p, 1991, bibliographie : 119 ref

- [54] N. CHINO, Y. IWASA, Y. MATAKI, T. HAGIWARA, H. SATO
 "Internal pressure of double composite exteriors; IN : J. wind engineering"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 38, n° 2-3, 381-391
 bibliographie : 11 ref (11779A/DOCA)

- [55] T. AMATO, K. FUJII, S. TAZAKI
 "Wind loads on permeable roof-blocks in roof insulation systems. IN : 7th international
 conference on wind engineering, AACHEN, 1987 juillet"
 91-100, 1987, bibliographie : 15 ref (1142A/DOCA)

- [56] A.E. HOLDO, E.L. HOUGHTON, F.S. BHINDER
 "Effects of permeability on wind loads on pitched-roof buildings"
 Journal Wind Engineering Industrial Aerodynamics, vol 12, n° 3, 255-279, 1983,
 bibliographie : 15 ref (03483A/DOCA)

- [57] J. RAO, F. HAGHIGHAT
 "Wind induced fluctuating airflow in buildings"
 12th AIVC Conference, Ottawa, Canada, 24-27 septembre 1991

- [58] N.J. COOK
 "The designer's guide to wind loading of building structures - Part 2"
 Building Research Establishment (GBR)
 London, Butterworths, 586 p, 1990, bibliographie : 401 ref

- [59] M. BONIS, J.P. RENAUDEAUX, ERBER
 "La mesure des pressions - Manomètres et capteurs"
 Paris, Masson, 1983, Collection Mesures Physiques, 160 p (00315N/B201)

- [60] F. CORLAIS
 "Etude en soufflerie et in situ du champ de pression induit par le vent derrière les
 bardages et autour d'une structure de section circulaire. 3ème cycle, Dynamique des
 fluides, Nantes, 1987"
 Rapport CSTB - Nantes, EN-ADYM 87.33, 133 p, 1987, bibliographie : 67 ref

- [61] J.D. HOLMES
 "Effect of frequency response on peak pressure measurements"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 17, n° 1, 1-19,
 (00687A/DOCP)

- [62] S.J. GUMLEY
 "A detailed design method for pneumatic tubing systems"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 13, n° 1/3, 441-452,
 bibbliographie : 12 ref (09535A/DOCA)

- [63] J.D. HOLMES, R.E. LEWIS
 "Optimization of dynamic pressure measurement systems. Single point measurements"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 25, n° 3, 249-273, 1987
 bibliographie : 9 ref, 2ND ex note CSIRO 86/12 (03727A/AH06)

- [64] J.D. HOLMES, R.E. LEWIS
 "Optimization of dynamic pressure measurement systems. Parallel tube manifold
 systems"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 25, n° 3, 275-290, 1987
 bibbliographie : 9 ref (03728A/AH06)

- [65] W.G. CHAPIN
 "Dynamic pressure measurements using an electronically scanned pressure module"
 Langly Research Center, Hampton Virginia
 Nasa technical Memo random 84650

- [66] J. VIMAL du MONTEIL
 "Optimisation et automatisation de la technique des mesures de pression instationnaire"
 Rapport CSTB - Nantes, EN ADYM 81-28 L, 1981

- [67] C. SOLLIEC, J. MARY
 "Mesures synchrones de pressions fluctuantes par capteurs piézorésistifs multivoies.
 Application aux essais en soufflerie atmosphérique"
 Rapport CSTB - Nantes, EN-ECA 93.05, 19 p, 1993, bibliographie : 5 ref

- [68] R.N. SHARMA, P.J. RICHARDS
 "The effect of roof flexibility on internal pressure fluctuations"
 Proceeding of Ninth international conference on wind engineering, NEW DELHI,
 1995 9-13 janvier" vol 3, 1127-1138, 1995, bibliographie : 15 ref (14602A/DOCA)

- [69] C. WILLIAMS
 "Methods of including the effect of the surrounding air in the dynamic analysis of air-
 supported structures. IN : the design of air supported stuctures, BRISTOL, 1984 juillet"
 175-189, 1984, bibliographie : 15 ref (12832A/DOCA).

- [70] R.J. KIND
 "Pneumatic stiffness and damping in air-supported structures"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 17, n° 3, 295-304
 (03492A/DOCP)

- [71] M. NOVAK, M. KASSEM
 "Free vibration of light roofs backed by cavities"
 Journal Engineering Mechanics, ASCE, vol 116, n° 3, 579-564, bibliographie : 10 ref
 (12767A/DOCA).

- [72] B.J. VICKERY, P. N. GEORGIU
 "A simplified approach to the determination of the influence of internal pressures on
 the dynamic of large span roofs"
 J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 38, n° 2-3, 357-369, 1991,
 bibliographie : 8 ref (11423A/DOCA)

- [73] M. SOARE
 "Application des équations aux différences finies aux calculs des coques"
 Edition Eyrolles, Paris 1962

ABSTRACT

Generally, the rain penetration through pitched lapped roofs is created by the difference of external and internal pressure, generated by the wind.

In this thesis, a numerical model has been developed for prediction of internal pressure under the elements (the external pressure can be measured on a model in a boundary layer wind-tunnel). Two cases have been studied :

- roof without underlay
- roof with flexible or stiff underlay.

The dynamics of internal pressure is, in general, a complex problem. This is due to the poor knowledge on the leakage paths characteristics. Therefore, full-scale experimental studies have been carried out to characterize the roof wind permeability (test apparatus) and to investigate the effects of windspeed, atmospheric turbulence and rain intensity on this permeability (climatic wind-tunnel).

The analytical results were compared with full-scale results (roof without underlay case), and they matched closely.

Parametric studies (underlay case) have shown that it is possible to reduce considerably the wind loads. Through a complete knowledge of the controlling parameters it will be possible to design and construct pitched lapped roofs, from which the problems of rain penetration is strongly reduced.

RESUME

La pénétration d'eau de pluie à travers une toiture à pentes constituée de petits éléments est principalement liée à la différence de pression externe et interne, générée par le vent sur le toit. Le champ de pression externe est accessible aux mesures, sur maquette en soufflerie atmosphérique.

En revanche, le champ de pression interne ne peut être obtenue qu'en vraie grandeur. Une modélisation numérique de ce dernier a donc fait l'objet de cette thèse. Il s'agit plus précisément de calculer la pression instantanée en sous-face de la couverture, dotée ou non d'un écran qu'il soit souple ou rigide.

L'estimation de la pression interne est délicate faute d'une bonne connaissance des caractéristiques de l'écoulement à travers des parois perméables.

Une campagne de mesures en vraie grandeur a donc été menée pour caractériser la perméabilité à l'air de la toiture pour un revêtement donné (banc de mesures), ensuite pour étudier les effets de la vitesse et de la turbulence du vent et de l'intensité de la pluie sur cette perméabilité (soufflerie climatique).

La pression interne issue du modèle sans écran reproduit bien celle mesurée.

L'étude paramétrique du cas avec écran a montré la possibilité de réduire considérablement la pression différentielle. Une bonne connaissance des paramètres qui influencent le différentiel de pression permet de concevoir des toits à pentes, pour lesquels les problèmes de pénétration d'eau de pluie sont considérablement réduits.

Mots clés :

Pression interne, pression instantanée, modélisation numérique, perméabilité à l'air, étanchéité eau, toiture, toiture deux versants, essai vraie grandeur, essai soufflerie, soufflerie climatique, mesure pression, construction basse, bâtiment habitation.