

EN-CAPE 09.177 C – V0

**Etude en soufflerie des actions du vent sur les
ventelles de la Canopée des Halles de Paris**

Jérôme VINET & Olivier FLAMAND

Département Climatologie – Aérodynamique – Pollution – Epuration

Etude en soufflerie des actions du vent sur les ventelles de la Canopée des Halles de Paris

Jérôme VINET & Olivier FLAMAND

**Département Climatologie – Aérodynamique
Pollution – Epuration**

*Cette étude a été réalisée
à la demande de la Ville de Paris
suivant le marché CSTB en date du 13/02/2009
Marché n°20091020010007 du 27/04/2009
Offre n° 2918*

Nantes, le 23 septembre 2009

Jérôme VINET
Ingénieur du
Département CAPE
Climatologie-Aérodynamique-
Pollution-Epuration

Gérard GRILLAUD
Pilote de Département
Climatologie-Aérodynamique-
Pollution-Epuration
Co-responsable domaine
thématique Vent/Ouvrages

Mots clés : mesure soufflerie, vent, vibration

Nbre de pages : 28

Version n° : 0



CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT
11 RUE HENRI PICHERIT, BP 82341, 44323 NANTES CEDEX 3
Tél : 02.40.37.20.00 Fax : 02.40.37.20.60
Site Web : <http://aerodynamique.cstb.fr>

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	2
2. TECHNIQUES D'ESSAI EN SOUFFLERIE.....	3
2.1 METHODOLOGIE EXPERIMENTALE.....	3
2.2 CARACTERISTIQUES DES MAQUETTES DES VENTELLES DE LA CANOPEE DES HALLES.....	3
2.3 REPRODUCTION DU VENT - ECHELLE DE VITESSE.....	4
2.4 DESCRIPTIF DES MESURES DE LA STABILITE DES VENTELLES	6
2.5 PRESENTATION DES RESULTATS	7
3. RESULTATS D'ESSAIS	8
3.1 MESURE DE LA STABILITE DES TROIS VENTELLES DE LA CANOPEE - EFFET DE L'AMORTISSEMENT STRUCTUREL. - VENT UNIFORME ET TURBULENT	8
3.2 COEFFICIENTS DE FORCE	8
4. CONCLUSION.....	10
FIGURES.....	11

1. INTRODUCTION

Le projet "Canopée" de Patrick Berger et Jacques Anziutti propose pour la rénovation des Halles une vaste couverture fine, élancée et partiellement ouverte aux éléments climatiques qui viendra couvrir le Forum souterrain entre les rue Lescot, Berger et Rambuteau.

Bien qu'inscrit dans l'épaisseur de la rugosité bâtie, ce projet présente des caractéristiques architecturales d'envergure et d'élancement qui le rendent sensible au vent. Ces particularités ont conduit à engager des études en soufflerie pour vérifier le dimensionnement au vent des ventelles qui la composent. Ce rapport s'inscrit dans un programme d'essais complet pour lequel trois études aérodynamiques et deux maquettes ont été nécessaires:

- Une maquette du bâtiment et de son environnement à l'échelle réduite 1/200 a été utilisée pour la mesure des efforts sur la toiture et du confort dans les espaces piétonniers
- Une maquette à l'échelle du 1/50 a servi à mesurer la stabilité aérodynamique des ventelles.

Le sujet du présent rapport est cette troisième partie de l'étude aérodynamique.

Le contenu de ce programme d'études a été défini en concertation avec INGEROP sur la base de la proposition rédigée par le CSTB " Annexe technique : descriptif de l'étude aérodynamique conduite en soufflerie", précisé lors de la réunion à Nantes du mercredi 2 septembre et complété la note de calcul d'INGEROP pour l'avant projet détaillé (fichier HAL_APD_B05_NoticeStructureCanopée.pdf)

2. TECHNIQUES D'ESSAI EN SOUFFLERIE

2.1 Méthodologie expérimentale

Les phénomènes d'instabilité induits par le vent sur les ventelles concernent principalement le mode de flexion vertical. La méthode expérimentale classique pour étudier et prévenir ces phénomènes consiste à utiliser un tronçon représentatif de la structure étudiée, correspondant ici à 71m de la partie centrale des ventelles et à suspendre celui-ci dans la veine d'essais de la soufflerie par un ensemble de ressorts afin de représenter un mode de flexion verticale (figure 1).

Les conditions d'écoulement bidimensionnel, nécessaires pour les études sur maquettes sectionnelles, sont reproduites par le positionnement des maquettes entre les deux flasques parallèles d'un banc de mesure nommé "banc dynamique" (figure 2) qui est situé au centre de la veine d'essai.

Si les tronçons des ventelles (figure 3) ont les propriétés requises de masse imposées par les règles de similitude, il suffit d'observer le comportement de la maquette dans la veine d'essais pour en déduire celui des ventelles réelles.

De manière à bien représenter l'effet d'environnement induit par la présence de la Canopée en aval des 3 premières ventelles, les ventelles suivantes, le sol, ainsi que la partie convergente sous les ventelles sont ajoutés (figures 4 et 5)

Après cette série d'essais sur maquettes de ventelles suspendues, une ventelle (numéro 13) a été fixée de manière rigide à des balances dynamométriques afin de mesurer les efforts moyens engendrés par le vent, exprimés par les coefficients aérodynamiques moyens (figure 6).

2.2 Caractéristiques des maquettes des ventelles de la Canopée des Halles

La géométrie des maquettes sectionnelles des ventelles n°12, 13 et 14 et d'une partie de la Canopée des Halle (figures 4 et 5), à l'échelle réduite du 1/50^{ème}, est déduite des plans 3D fournis par le cabinet d'architecture (Agence Berger-Anziutti). Les caractéristiques de masse de la section courante des trois ventelles sont fournies par INGEROP:

- Masse de la ventelle 12 : 2.76 t/ml
- Masse de la ventelle 13 : 2,79 t/ml
- Masse de la ventelle 14 : 3,36 t/ml

Les maquettes des ventelles, réalisées en frittage de poudre polyamide chargée de billes de verre, sont reliées au banc dynamique par des supports d'adaptation en

aluminium, elles représentent dans le détail la structure, la section courante des trois ventelles (figure 3).

La longueur des trois ventelles est $L=1.42$ m et sa largeur prise comme référence dans les calculs $B=0.2$ m (largeur moyenne au centre de la ventelle 13) correspondant à $B=0.2*50=10$ m à l'échelle 1.

La mesure de la masse des 3 ventelles, des pièces d'adaptation et du système de suspension a donné 8,17 kg, une valeur supérieure de 60% à la valeur déduite par similitude des données du bureau d'études, 5.06 kg. Il est en effet difficile de respecter à échelle réduite la légèreté de la structure réelle.

L'amortissement structurel nominal supposé de la toiture, rapporté à l'amortissement critique pourrait prendre la valeur $\xi_{sr} = 0.32\%$ d'après la réglementation, par exemple l'Eurocode. Cependant des mesures effectuées en particulier par le CSTB sur des ouvrages réels ont montré que l'amortissement effectif pouvait être dans certains cas plus faible : c'est pourquoi il a été décidé de considérer ici une valeur d'amortissement nominal aussi faible que possible $\xi_{sr} = 0.125\%$, afin de détecter les possibilités d'instabilité aérodynamique et de réaliser certains essais avec un amortissement plus important correspondant à la valeur réglementaire $\xi_{sr} = 0.36\%$ pour vérifier la stabilisation du système.

2.3 Reproduction du vent - échelle de vitesse

Les fréquences et déformées modales des premiers modes propres ont été fournies par INGEROP. Seul le mode de flexion verticale à 0.771 Hz a été retenu puisqu'étant le seul dans la gamme des fréquences excitables par le vent avec une énergie importante.

Les relations de similitudes entre l'ouvrage à la vraie grandeur et la maquette sectionnelle font que la fréquence de vibration de la maquette, dont l'échelle géométrique est fixée, donne la similitude en vitesse entre les essais à échelle réduite et la vraie grandeur. Les ressorts utilisés pour suspendre la maquette ont été choisis de manière à obtenir une échelle des vitesses judicieuse.

Le calcul de l'échelle de vitesse se fait, par exemple pour la flexion, suivant la formule :

$$U^* = L^* \cdot f^* = 50 \cdot \frac{0.771}{9.14} = 4.22$$

Le vent cinquanténal sur le site de la Canopée des Halles a été estimé à $\bar{U} = 15.3 \text{ m/s}$ à la hauteur de référence de 15 m par rapport au sol en l'absence du bâtiment, ce qui conduit à étudier une gamme de vitesse de vent de 0 à 4.5 m/s en

soufflerie. Ceci correspond en vraie grandeur à une gamme de vitesse allant de 0 à 19 m/s (soit 0 à 1,25 fois la vitesse cinquanténale).

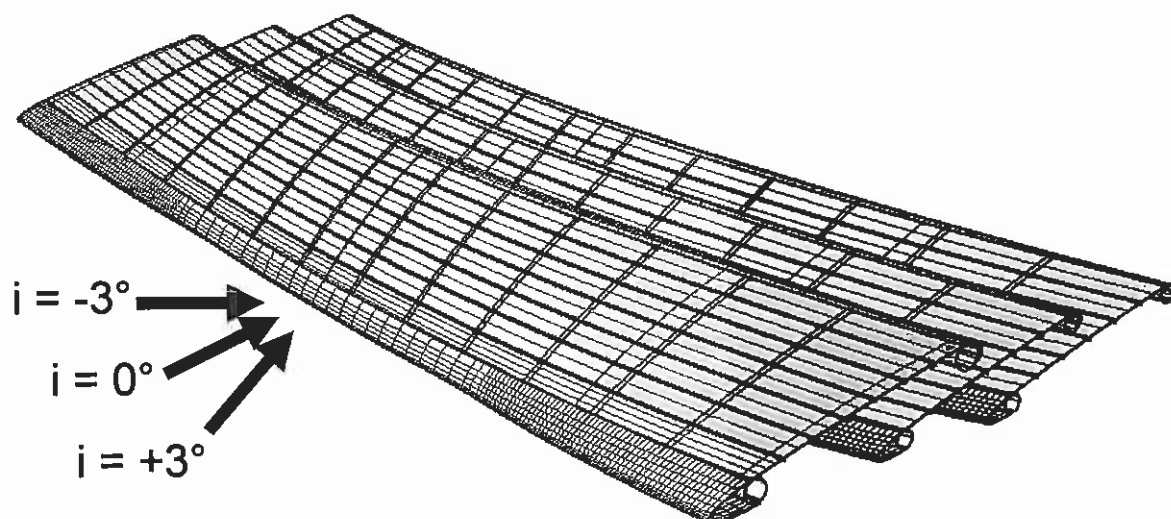
Pour affiner l'analyse, l'influence du bâtiment sur la vitesse du vent au niveau des ventelles a été prise en compte. La référence pour cette démarche a été la maquette au 1/200^{ème}, représentant à la fois l'environnement bâti et la canopée, soumise à un vent turbulent en soufflerie à couche limite atmosphérique. Dans ces conditions d'essais fidèles à la réalité la vitesse du vent a été mesurée à la fois à la hauteur de référence de 7.5cm correspondant à 15m en vraie grandeur et à 10 cm au dessus du sommet de la deuxième ventelle, soit 20m au dessus de la ventelle ou encore 35m au dessus du sol en vraie grandeur. Cette mesure au dessus des ventelles a été réalisée suffisamment haut pour que l'effet du bâtiment ne soit pas sensible. De manière symétrique une sonde anémométrique a été positionnée à 40 cm au dessus des ventelles sur la maquette au 1/50^{ème} pour servir de point de comparaison entre les études aux deux différentes échelles.

Ce jeu de transposition des échelles nous a amené à considérer une évolution des vitesses au dessus des ventelles entre 0 et 5 m/s en soufflerie pour les vents représentatifs des vents forts réels et même au-delà pour vérifier leur stabilité.

Les essais ont porté uniquement sur une direction du vent perpendiculaire à l'axe des ventelles, ce qui correspond pour les essais au 1/200^{ème} à la direction 270°.

Deux types de vent, turbulent et uniforme, ont été reproduits en soufflerie. Le vent uniforme (taux de turbulence inférieur à 1 %) a été utilisé pour l'analyse préalable de stabilité parce qu'il permet de révéler tous les risques potentiels d'instabilités aérodynamiques, notamment le détachement tourbillonnaire ou le galop. Le vent réel sur le site n'est pas uniforme puisque son intensité de turbulence attendue est d'environ 30 %. Un vent turbulent généré par une grille (figure 7) à été utilisé pour vérifier la persistance ou la suppression du détachement tourbillonnaire, ainsi que pour la mesure des coefficients aérodynamiques moyens.

L'analyse des instabilités a été menée pour des incidences de ventelles de 0°, de -3° et de +3° (cf schéma ci-dessous). Les coefficients aérodynamiques moyens ont été mesurés dans une gamme allant de -6° à +6°.



2.4 Descriptif des mesures de la stabilité des ventelles

La maquette était solidaire de deux bras en alliage léger suspendus à 8 ressorts de raideur $K=4020$ N/m. Un câble de retenue maintenait la maquette dans la direction du vent et des dispositifs amortisseurs supplémentaires permettaient de régler l'amortissement structurel des mouvements de flexion à la valeur souhaitée (figure 8). Un jeu minimal (figure 9) de 5 mm, séparait l'extrémité de la maquette de la paroi du banc dynamique. Les déplacements de la maquette étaient mesurés par 4 capteurs optiques à triangulation placés dans les flasques du banc dynamique (figure 10) écartés de 285 mm de l'axe de la maquette. Ces déplacements, ainsi que la vitesse du vent mesurée par un tube de Pitot et un anémomètre à hélices, ont été discrétisés à une cadence de 200 Hz, chaque acquisition durant 30 secondes dans le cas d'une croissance par paliers successifs de la vitesse. Ces signaux de déplacement ont ensuite été combinés pour recréer les signaux temporels de déplacement vertical (flexion).

La bonne similitude en masse de la maquette est utile pour permettre une reproduction précise du phénomène de détachement tourbillonnaire. Ici la masse plus élevée obtenue par le choix des matériaux ne crée pas de perturbation significative sur le comportement de la maquette vis-à-vis de l'excitation par les tourbillons alternés. L'amortissement structurel du montage est lui aussi un paramètre essentiel pour la bonne modélisation des vibrations résultantes.

L'incidence des ventelles a été mesurée très précisément à l'aide d'un inclinomètre électronique (figure 11), avant et après chaque essai de même que les fréquences et amortissements structurels (figure 12) de manière à vérifier que les caractéristiques dynamiques du montage restent stables dans le temps.

Etude en soufflerie des actions du vent sur les ventelles de la Canopée des Halles de Paris

2.5 Présentation des résultats

Pour les mesures de stabilité sur montage souple, des enregistrements ont été réalisés à des vitesses croissantes par palier en soufflerie. A chaque palier de vitesse un enregistrement de la vitesse du flux et du déplacement des ventelles en flexion a été réalisé pendant 30 secondes. Pour chacun de ces enregistrements les valeurs de la moyenne, de l'écart type, du minimum et du maximum de chaque déplacement ont été calculés. Ces valeurs ont ensuite été transposées à la vraie grandeur par le jeu des lois de similitude et tracées sous forme de graphique donnant le déplacement en fonction de la vitesse moyenne du vent au niveau des ventelles (figures 13 à 15).

D'autres acquisitions en continu des déplacements de la maquette ont été réalisées pour des montées ou des descentes de vitesses de vent elles aussi continues (figures 16 à 18). Cette méthode qui a l'avantage d'être plus rapide à mettre en œuvre expérimentalement donne des résultats voisins de ceux de la méthode par paliers, les vitesses de vent présentées sont aussi celles de la vraie grandeur à la hauteur des ventelles. Les différences entre les deux méthodes sont surtout sensibles lorsque l'excitation par le détachement tourbillonnaire entraîne de grandes amplitudes pour une gamme de vitesse réduite ; dans ce cas l'amplitude maximale n'est pas atteinte lors d'une variation continue de la vitesse puisque la stabilisation du phénomène nécessite un temps supérieur à celui accordé. Mais en tout état de cause si une excitation par le détachement tourbillonnaire ou le galop existait la méthode de variation continue de la vitesse permettrait de la signaler.

Cette présentation sous forme d'augmentation continue de la vitesse permet de comparer le comportement des trois ventelles en vent uniforme lorsque la vitesse est croissante ou décroissante, comparaison du comportement en vent uniforme et en vent turbulent et pour finir la différence de comportement avec un amortissement structurel réduit et un amortissement nominal.

Pour une question de facilité de la représentation, ces déplacements instantanés sont représentés positifs ; en réalité ils sont bien négatifs en valeur moyenne.

Enfin, les coefficients aérodynamiques moyens sont représentés en fonction de l'angle d'inclinaison du flux en degrés (figure 19 et 20) pour les deux cas de la ventelle n°13 isolée ou insérée dans son environnement, l'angle positif correspondant de manière classique à un flux ascendant.

3. RESULTATS D'ESSAIS

3.1 Mesure de la stabilité des trois ventelles de la Canopée - effet de l'amortissement structural - vent uniforme et turbulent

Pour l'inclinaison $+3^\circ$ (figure 13), le détachement tourbillonnaire génère des déplacements en flexion très nets entre 4 et 6,5 m/s, les valeurs de déplacement en flexion restant inférieures à 1,5 cm. A 11.5 et à 13.3 m/s, de très légères flexions sont également visibles. En ce qui concerne la stabilité à très haute vitesse de vent, de légères flexions apparaissent au-delà de 25 m/s et deviennent significatives pour des vitesses supérieures à 40 m/s (144 km/h), qui est une valeur très élevée (2 fois la vitesse maximale de la gamme) et parfaitement improbable pour ce site et à cette hauteur. On peut donc considérer que la stabilité des ventelles n'est pas un problème aux plus fortes vitesses de vent attendues sur le site. L'excitation par le détachement tourbillonnaire par contre représente un risque de vibration d'amplitude non négligeable, mais avec une probabilité d'occurrence faible eut égard à la valeur des vitesses du vent nécessaires. Le détachement tourbillonnaire agissant sur la flexion apparaît également lors de l'acquisition en montée (pas lors de la descente) entre 5 et 10 m/s (figure 16). L'ajout d'amortisseurs ($\xi=0.35\%$) permet d'éliminer le mode de flexion. La conclusion est identique lorsque le vent devient turbulent.

Pour l'inclinaison 0° (figure 14), les constats sont similaires (flexion autour de 5m/s, entre 10 et 15 m/s et au-delà de 25 m/s) lors de la montée par palier et un effet notable (déplacement en flexion inférieur à 5 mm cependant) apparaît entre 10 et 15 m/s lors de la montée et surtout lors de la descente en continu. A nouveau un amortissement voisin de 30% tout comme la turbulence du vent annihilent les effets du détachement tourbillonnaire

Les problèmes étant identifiés et résolus pour les incidences $+3^\circ$ et 0° , l'analyse par paliers à -3° montrant que les effets étaient moindres (figure 15), seule la vérification de l'action du vent turbulent a été opérée pour cette inclinaison (figure 18).

3.2 Coefficients de force

Les forces appliquées par le vent turbulent sur la ventelle ont été mesurées en fixant les deux extrémités de la maquette à des balances dynamométriques (figures 6 et 19). De la valeur moyenne des forces F_x (dans la direction du vent) et F_y (verticale ascendante) exprimées dans un repère lié à la ventelle on déduit l'expression des coefficients aérodynamiques moyens :

$$C_x = \frac{\bar{F}_x}{\frac{1}{2} \rho U^2 BL}, \quad C_y = \frac{\bar{F}_y}{\frac{1}{2} \rho U^2 BL},$$

B étant la largeur de la ventelle au centre, ici B=20 mm sur la maquette ;

L étant la longueur de la maquette, ici L=1.42 m ;

ρ étant la densité de l'air, $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$

Lorsque la ventelle pesée est dans son environnement (une ventelle en amont, les autres et la Canopée en aval) les coefficients de traînée sont négatifs, ils varient entre -0.25 et -0.05 alors que les coefficients de portance sont positifs et compris entre 0.08 et 0.34, pour des incidences de vent comprises entre -6° et $+6^\circ$ (figure 20 et tableau 1). Un phénomène d'aspiration liée à la ventelle amont lors du contournement de celle-ci par le vent est à l'origine de ce comportement inhabituel.

incidence	Cx	Cy
-6	-0.19	0.26
-4	-0.24	0.34
-2	-0.25	0.34
0	-0.22	0.31
2	-0.13	0.22
4	-0.09	0.14
6	-0.05	0.08

Tableau 1 : Coefficients de force de la ventelle dans son environnement

Lorsque la ventelle n°13 est seule (hors environnement), les coefficients de traînée sont positifs et relativement constants entre 0.78 et 0.89 alors que les coefficients de portance sont négatifs et compris entre -1.09 et -0.90 (figure 21 et tableau 2).

Incidence	Cx	Cy
-6	0.89	-1.09
-4	0.88	-1.06
-2	0.87	-1.03
0	0.85	-0.99
2	0.81	-0.94
4	0.81	-0.95
6	0.78	-0.90

Tableau 2 : Coefficients de force de la ventelle seule

Ces résultats ne sont pas transposables à la ventelle n°14 qui aura certainement un coefficient de traînée positif dans les deux cas. Ils ne sont pas exploitables pour d'autres ventelles que la n°13, ni pour d'autres directions du vent incident.

CONCLUSION

Les mesures réalisées en soufflerie sur une maquette sectionnelle représentant les ventelles de la Canopée des Halles de Paris, ont montré que celles-ci pouvaient être considérées comme stables. La recherche de stabilité aux inclinaisons $+3^\circ$, 0° et -3° a montré une légère sensibilité des ventelles au détachement tourbillonnaire, en vent uniforme, conduisant à des déplacements de flexion peu importants dans la gamme de vitesse considérée (entre 0 et 20 m/s environ) pour un amortissement structural minoré. Avec un amortissement ⁷² structural nominal l'excitation par le détachement tourbillonnaire des ventelles diminue significativement. De même avec un écoulement turbulent le système est moins sensible au détachement tourbillonnaire.

Les coefficients aérodynamiques moyens de la ventelle n°13 ont été mesurés. Ils seront difficilement utilisables pour le calcul du comportement dynamique des ventelles au vent turbulent puisque les effets d'interaction entre ventelles sont prédominants.

FIGURES



Figure 1 : Principe de la maquette sectionnelle suspendue

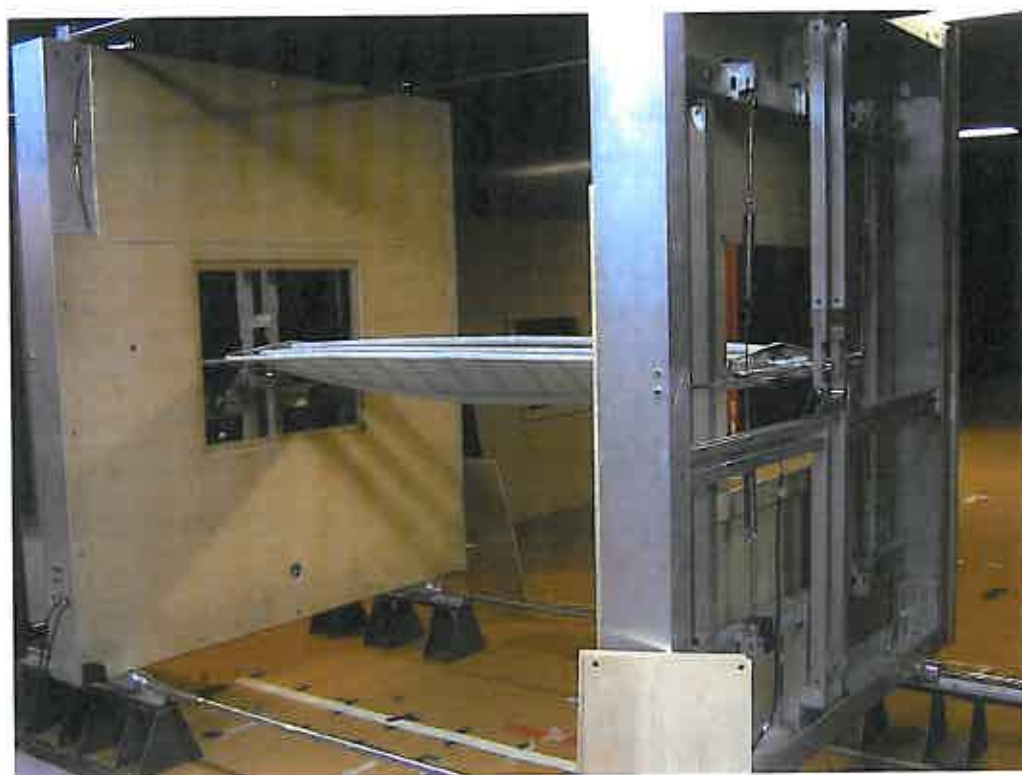


Figure 2 : Banc dynamique dans la veine d'essai

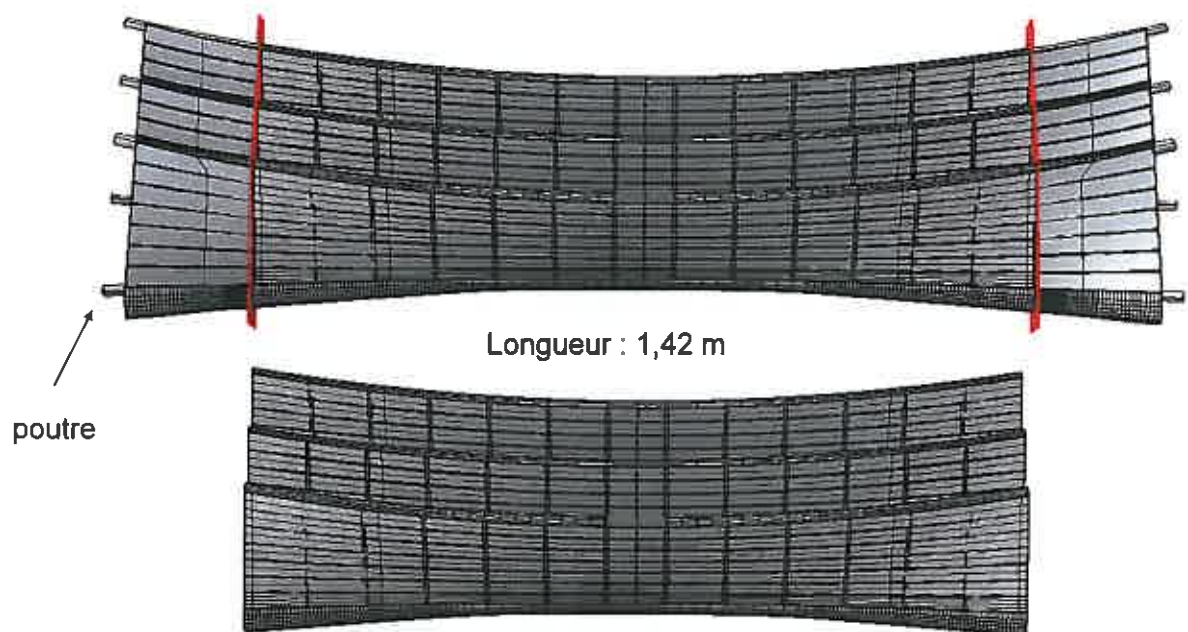


Figure 3 : Maquette sectionnelle des 3 ventelles en veine

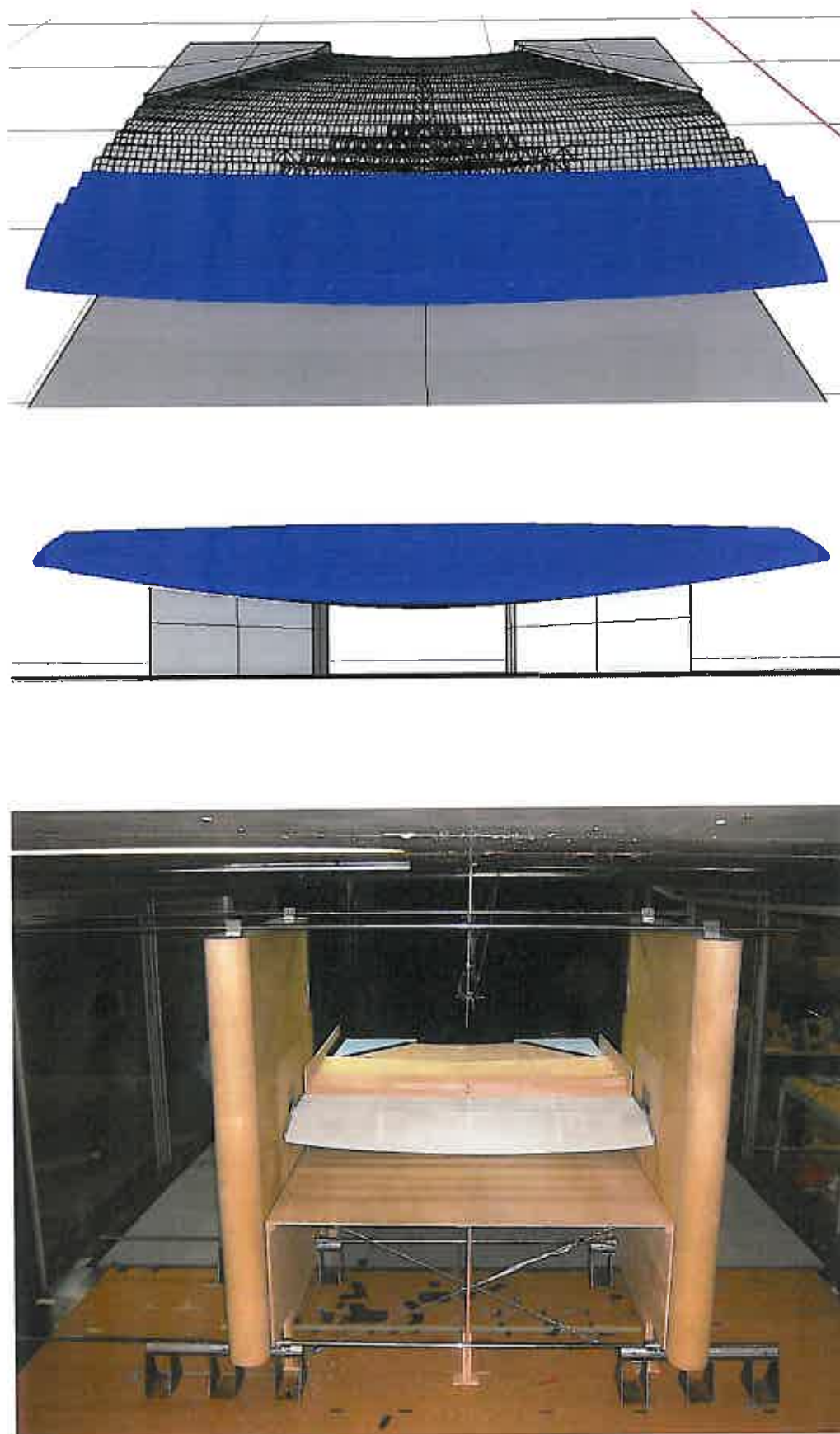


Figure 4 : Maquette sectionnelle des 3 ventelles en veine dans son environnement
Etude en soufflerie des actions du vent sur les ventelles de la Canopée des Halles de Paris

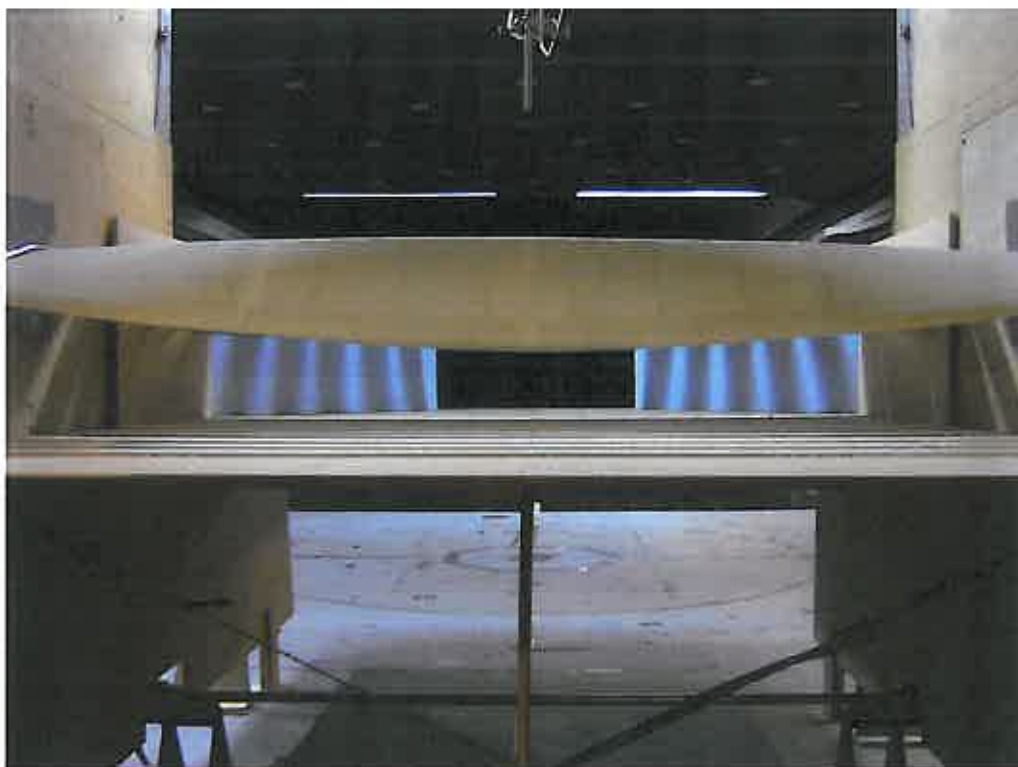


Figure 5 : Maquette sectionnelle des 3 ventelles en veine dans son environnement



Figure 6 : Montage rigide de la maquette de la ventelle n°13 sur des balances dynamométriques placées dans les flasques du banc dynamique pour la mesure des efforts moyens.



**Figure 7 : Grille générant une turbulence homogène dans la veine d'essais
Etude en soufflerie des actions du vent sur les ventelles de la Canopée des Halles de Paris**

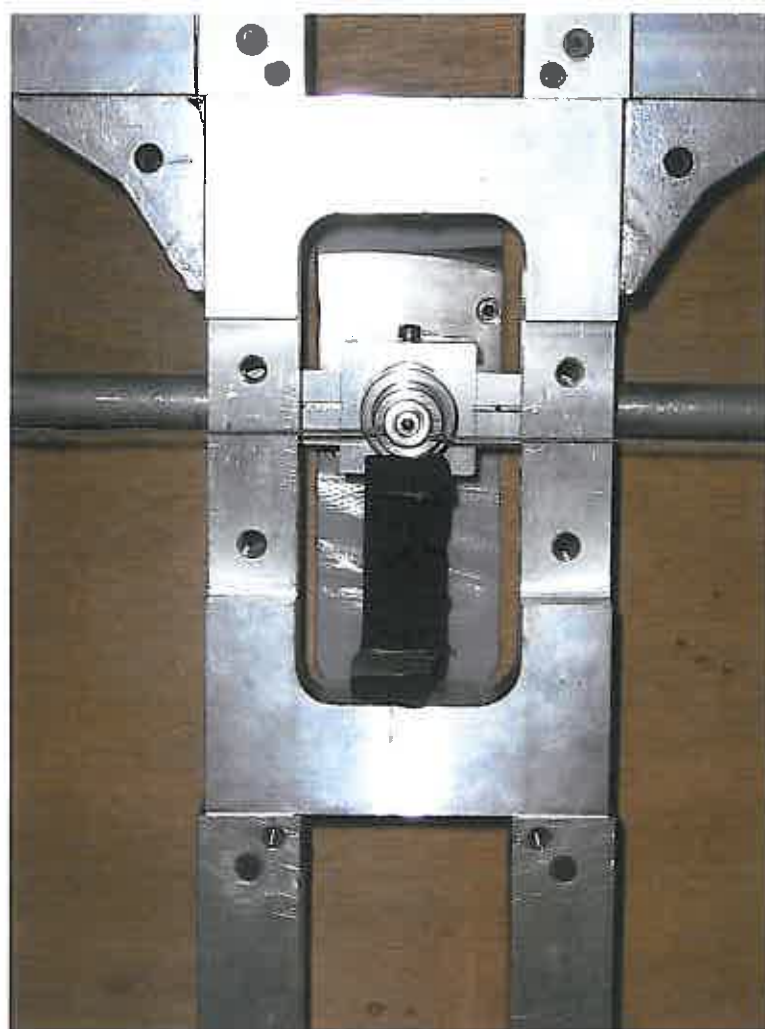


Figure 8 : Dispositif à base d'élastomère permettant le réglage de l'amortissement



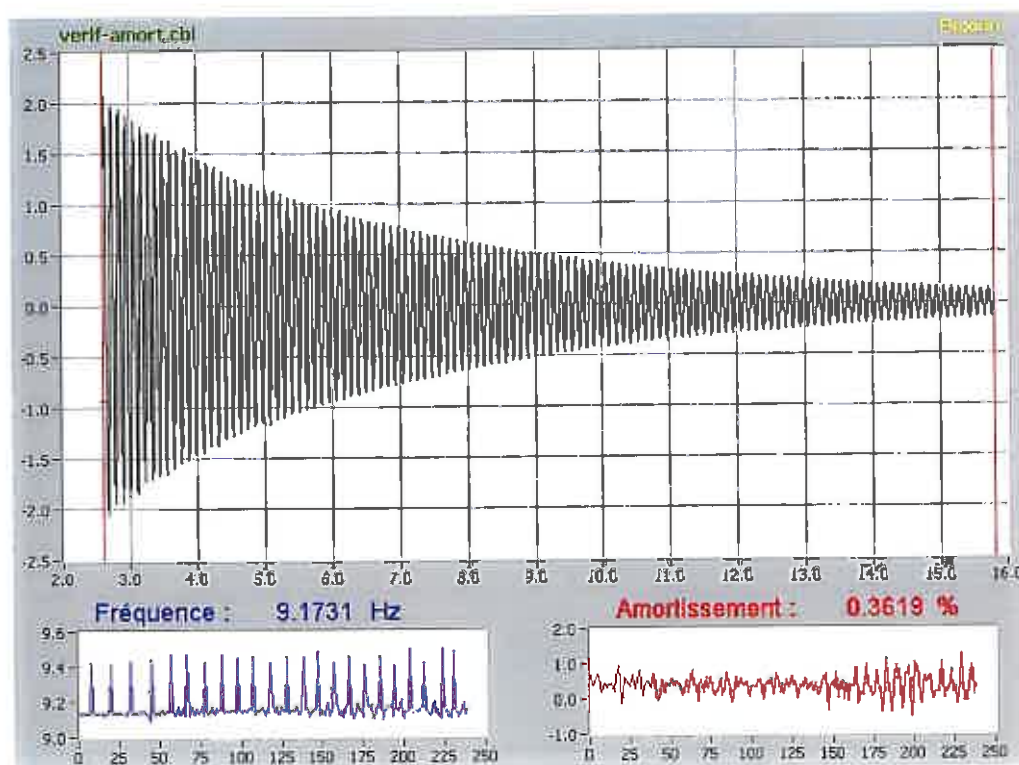
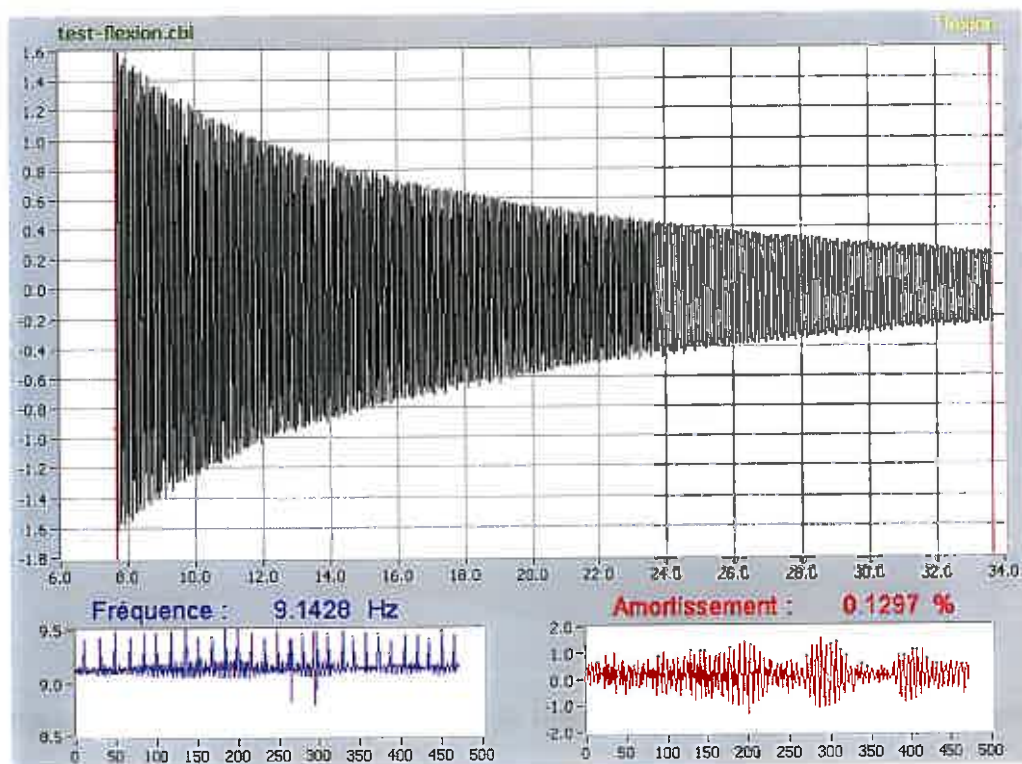
**Figure 9 : Jeu entre l'extrémité de la maquette et la paroi du banc dynamique
3 ventelles en oscillation libre (haut) et 1 ventelle pesée (bas)**



Figure 10 : Capteur laser mesurant le déplacement vertical de la maquette



Figure 11 : Réglage précis de l'incidence avant et après chaque série d'essais



**Figure 12 : Calcul de l'amortissement dans le domaine temporel
à l'aide d'un logiciel dédié**

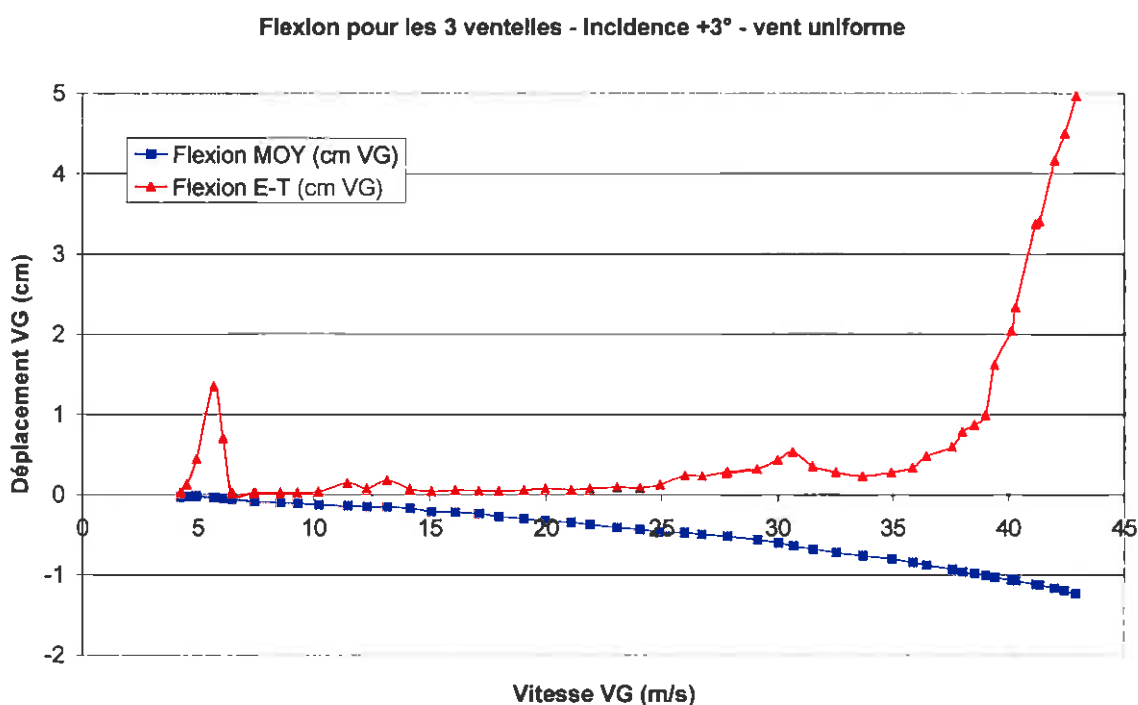
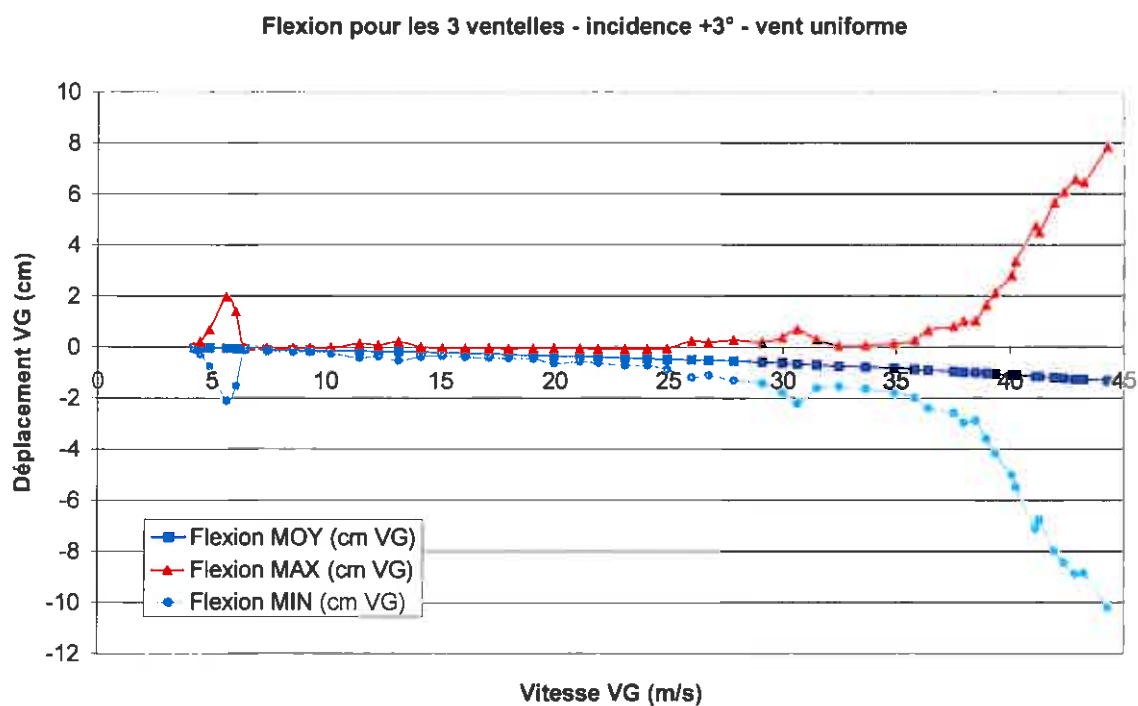
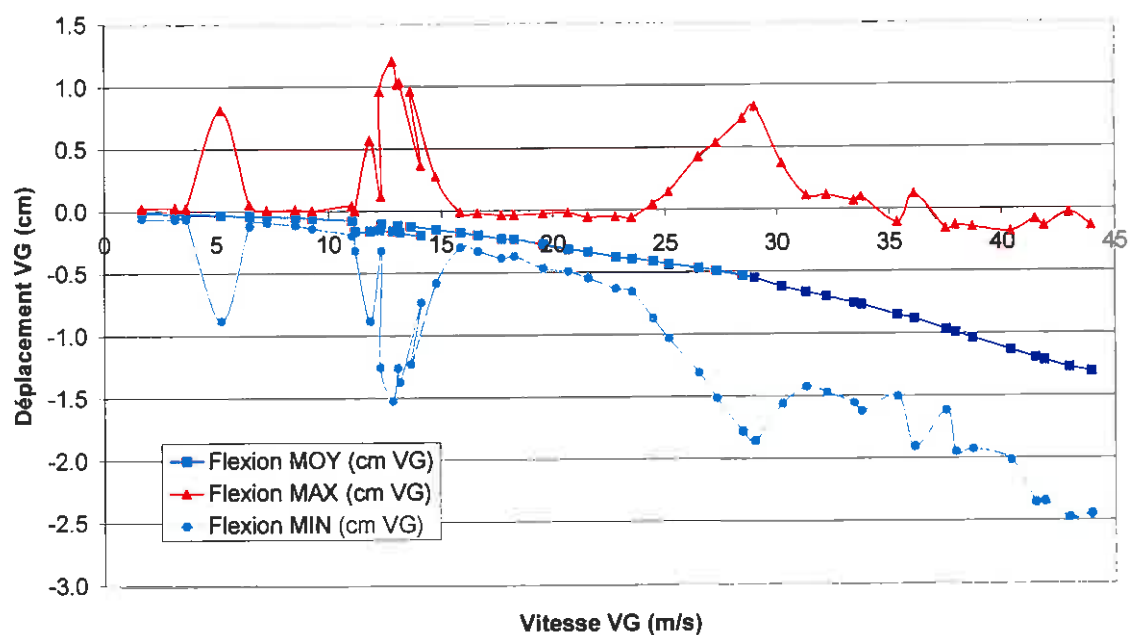


Figure 13 : Mesure de la stabilité des 3 ventelles en vent uniforme à l'incidence +3°, augmentation de la vitesse par paliers.

Flexion pour les 3 ventelles - incidence 0° - vent uniforme



Flexion pour les 3 ventelles - incidence 0° - vent uniforme

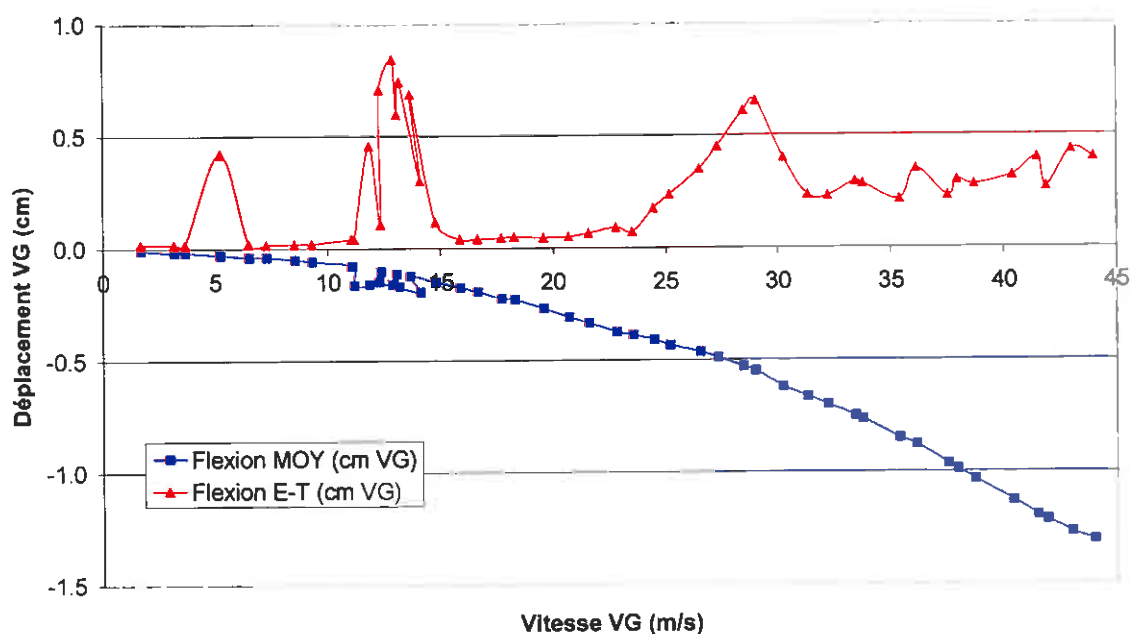


Figure 14 : Mesure de la stabilité des 3 ventelles en vent uniforme à l'incidence 0°, augmentation de la vitesse par paliers.

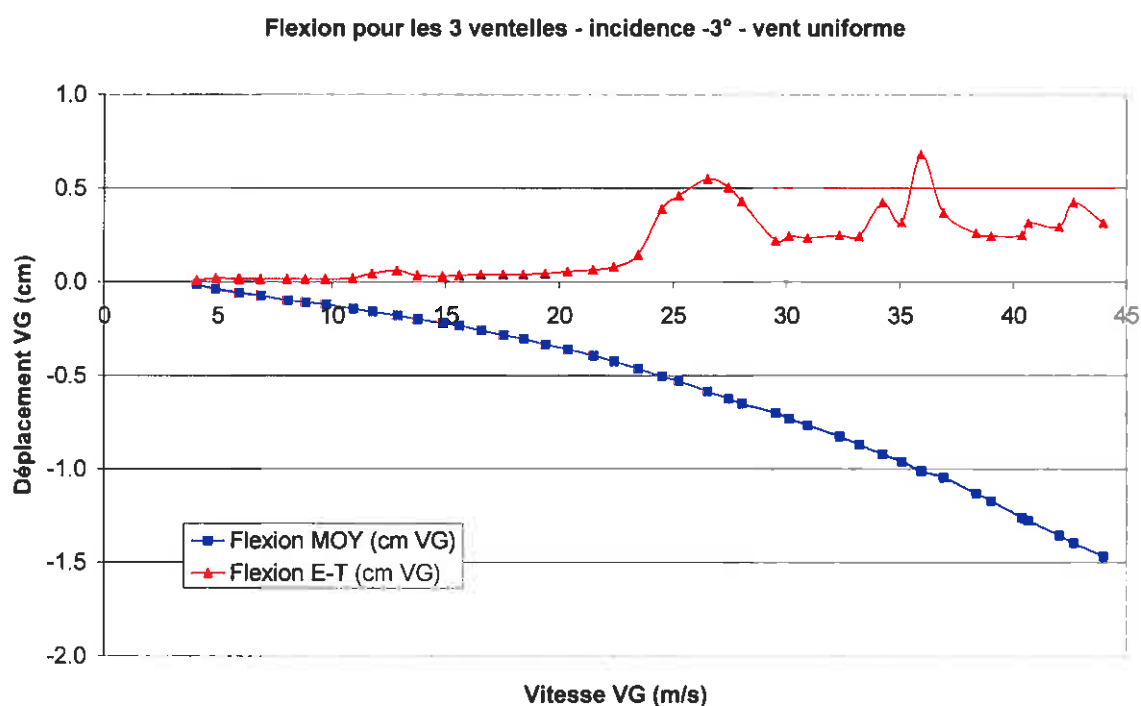
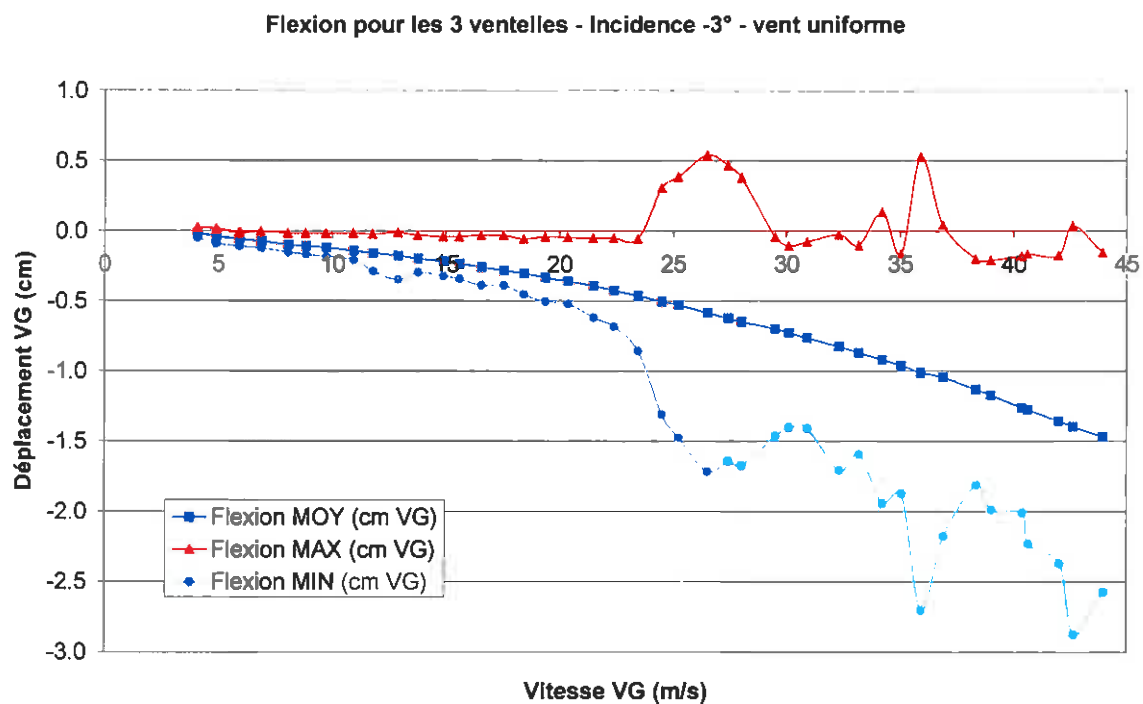


Figure 15 : Mesure de la stabilité des 3 ventelles en vent uniforme à l'incidence -3°, augmentation de la vitesse par paliers.

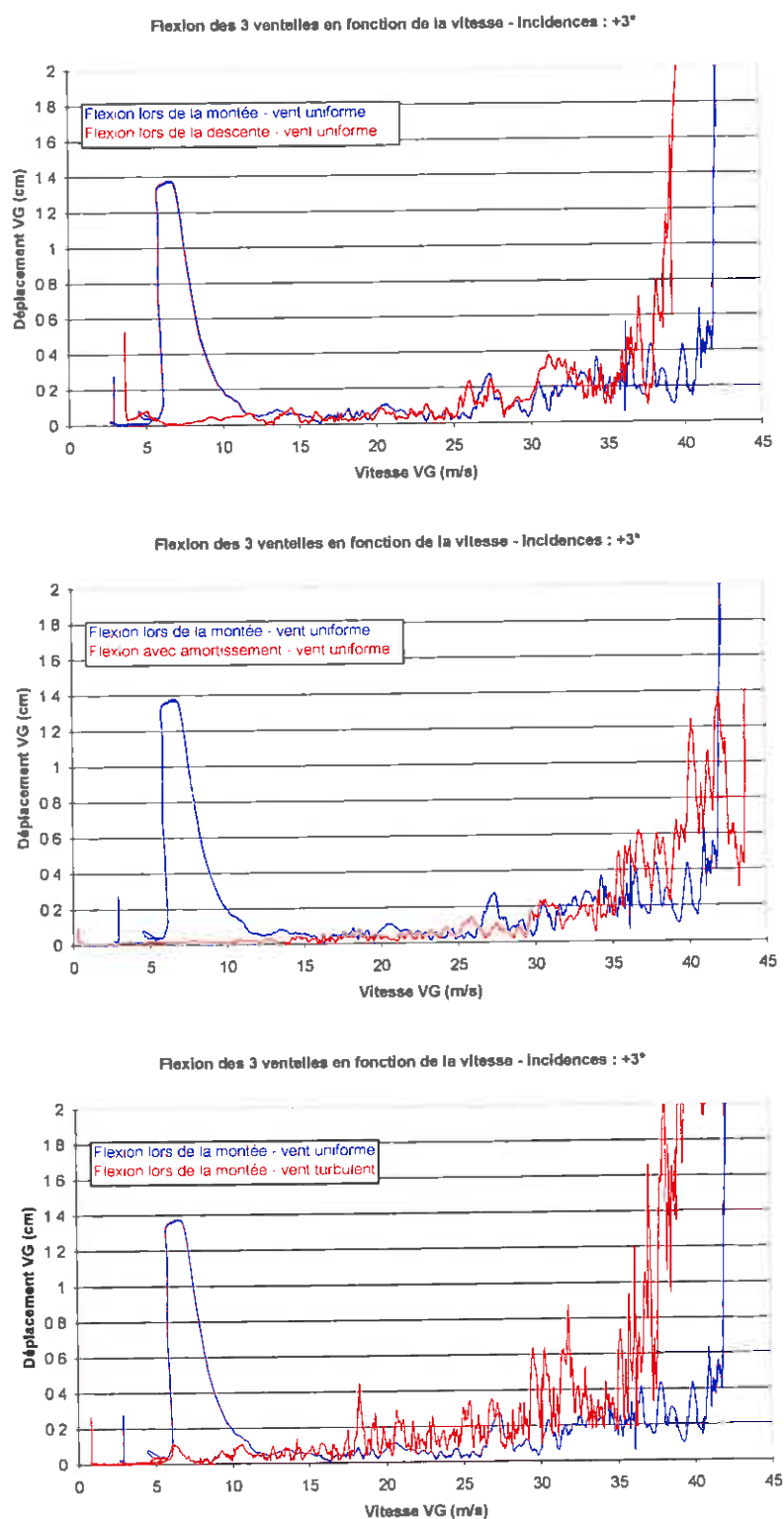


Figure 16 : Mesure en continue (montée et descente, en haut) de l'influence de l'amortissement (milieu) et de la turbulence du vent incident (bas) sur la stabilité en flexion des 3 ventelles de la Canopée pour une incidence de +3°. Le signe de l'échelle des déplacements est inversé.

Etude en soufflerie des actions du vent sur les ventelles de la Canopée des Halles de Paris

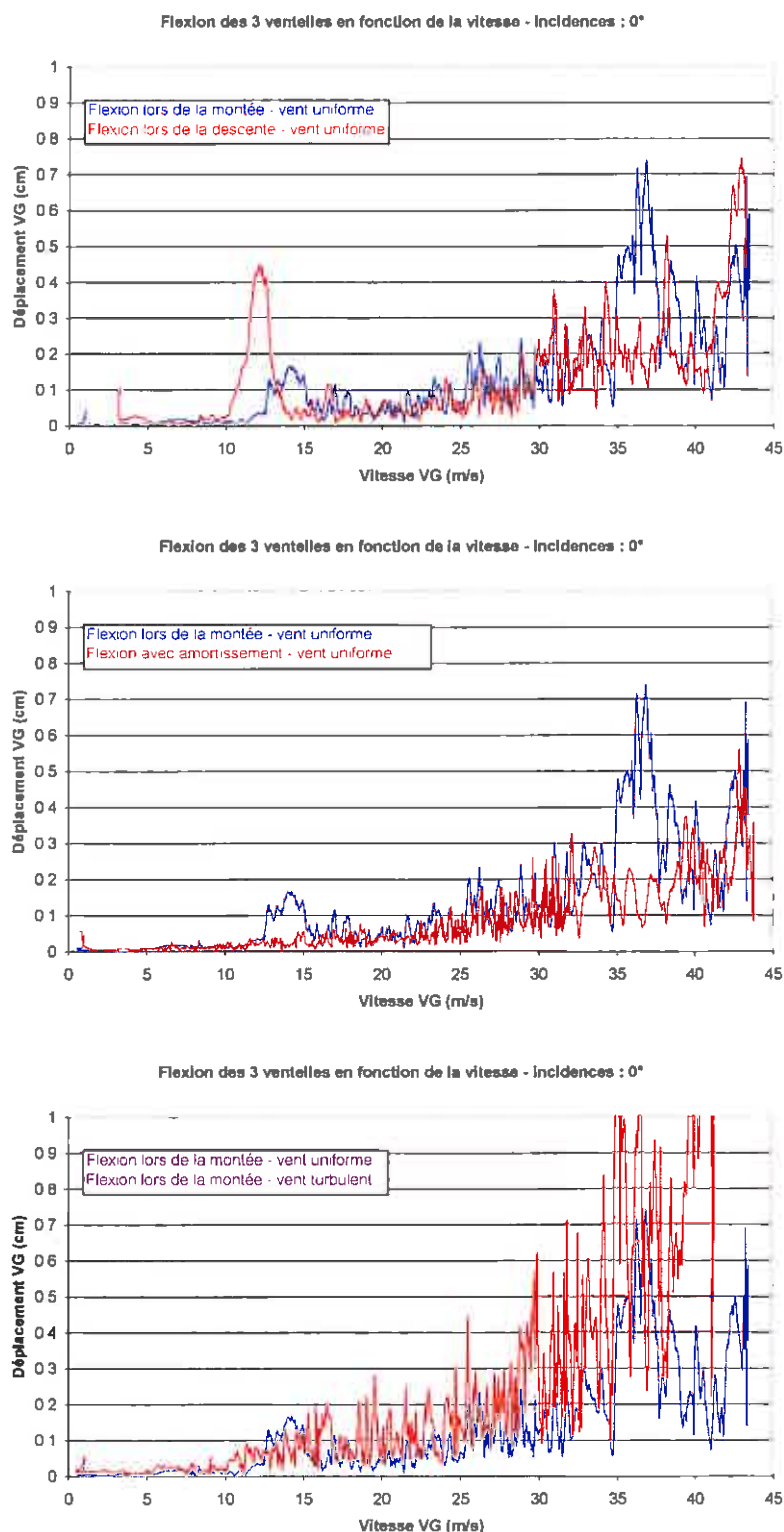


Figure 17 : Mesure en continue (montée et descente, en haut) de l'influence de l'amortissement (milieu) et de la turbulence du vent incident (bas) sur la stabilité en flexion des 3 ventelles de la Canopée pour une incidence de 0°. Le signe de l'échelle des déplacements est inversé.

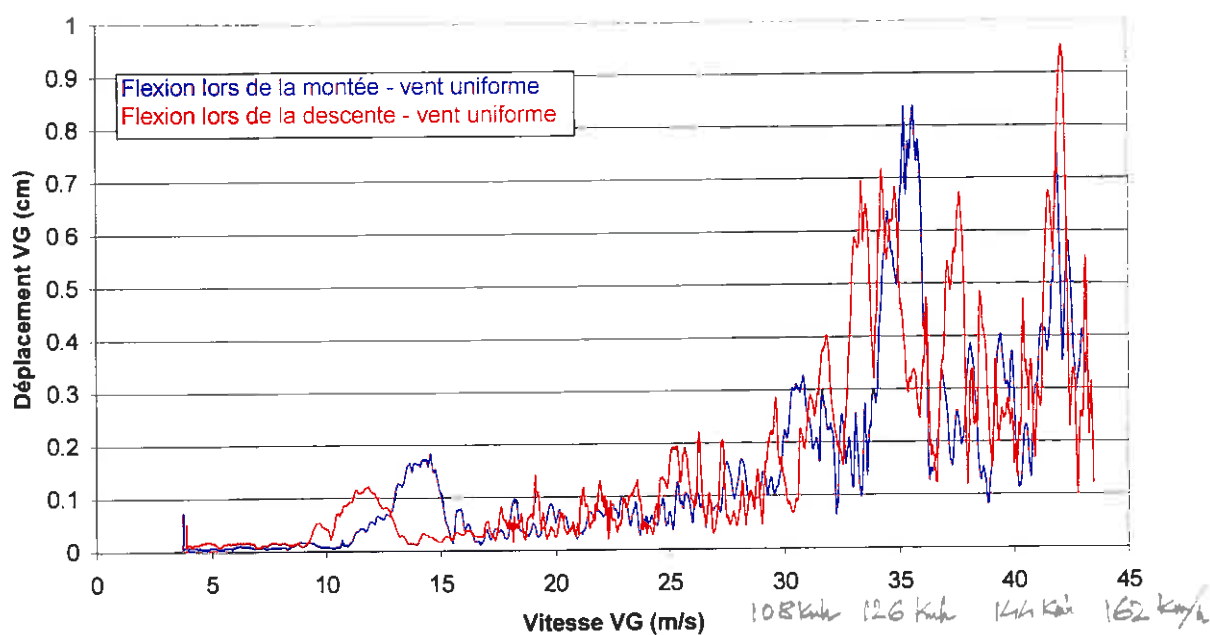
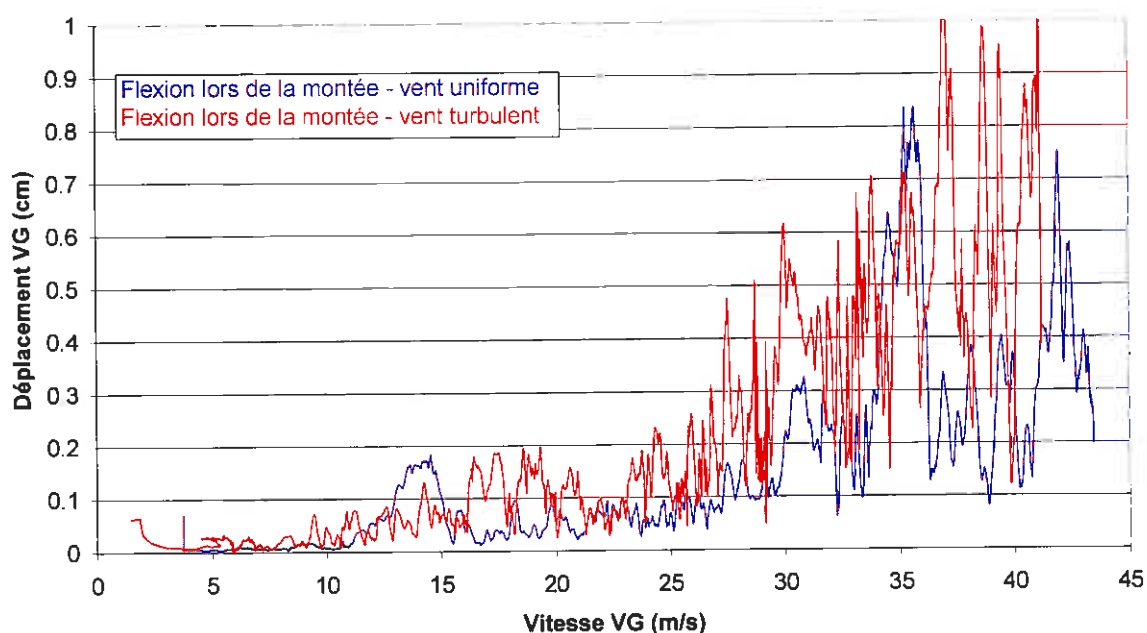
Flexion des 3 ventelles en fonction de la vitesse - Incidences : -3° Flexion des 3 ventelles en fonction de la vitesse - incidences : -3° 

Figure 18 : Mesure en continue (montée et descente, en haut) de l'influence de la turbulence du vent incident (en bas) sur la stabilité en flexion des 3 ventelles de la Canopée pour une incidence de -3° . Le signe de l'échelle des déplacements est inversé.

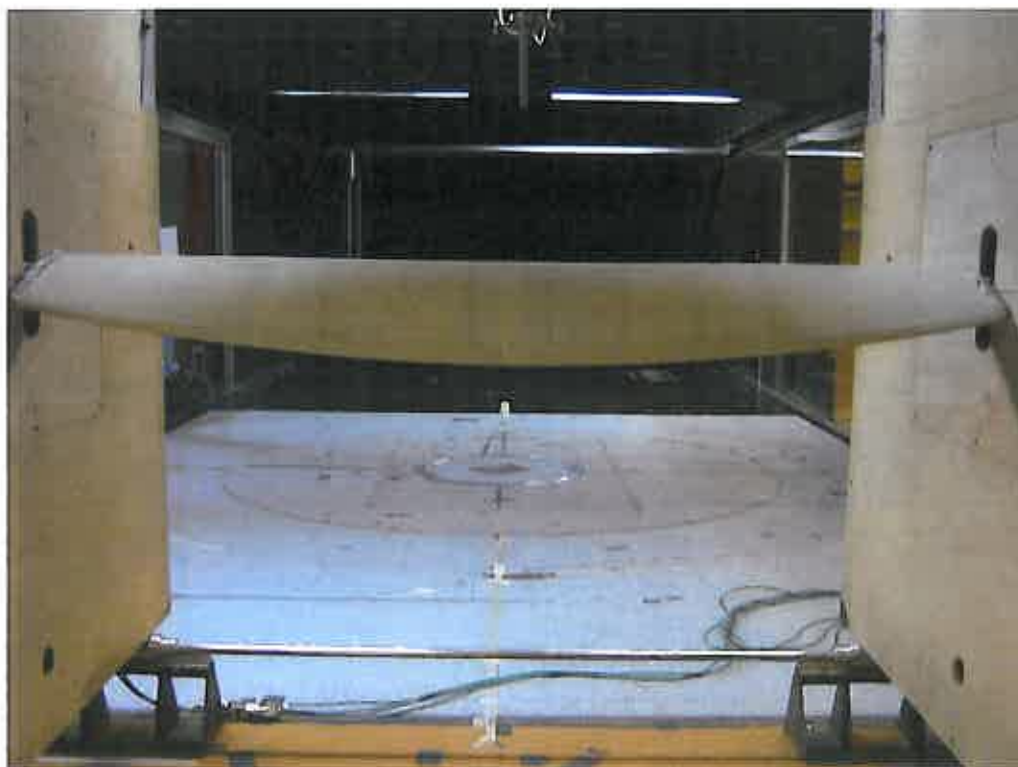


Figure 19 : Mesure des coefficients aérodynamiques par pesée sur une ventelle dans son environnement (haut) et sur une ventelle seule (bas)

Etude en soufflerie des actions du vent sur les ventelles de la Canopée des Halles de Paris

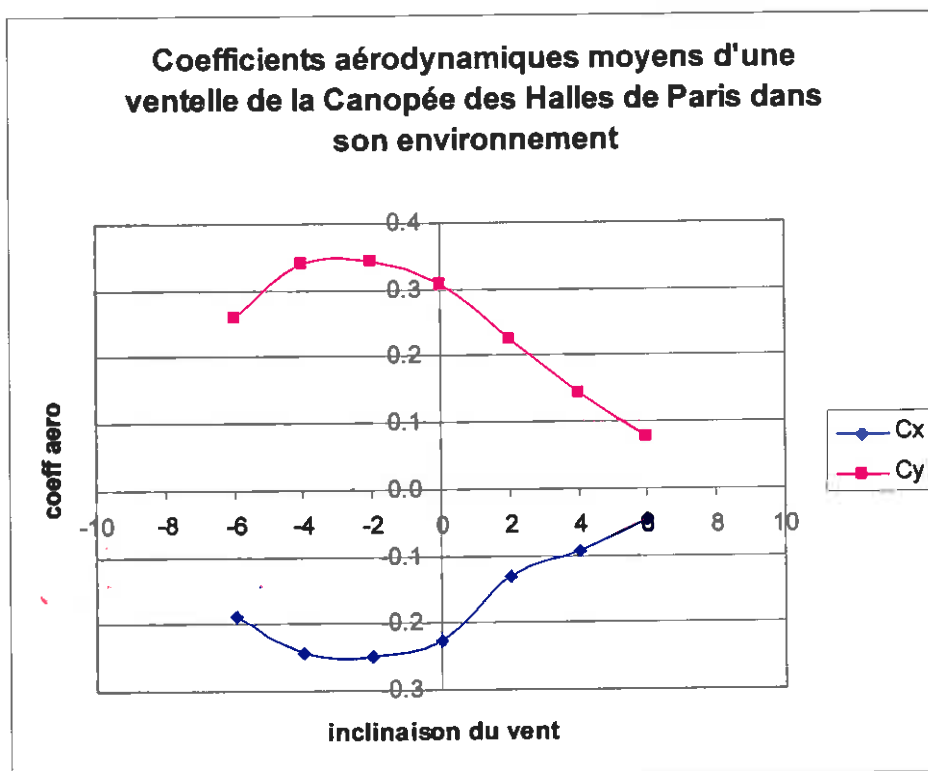


Figure 20 : Coefficients aérodynamiques moyens pour la ventelle dans son environnement (présence des autres ventelles et de la Canopée)

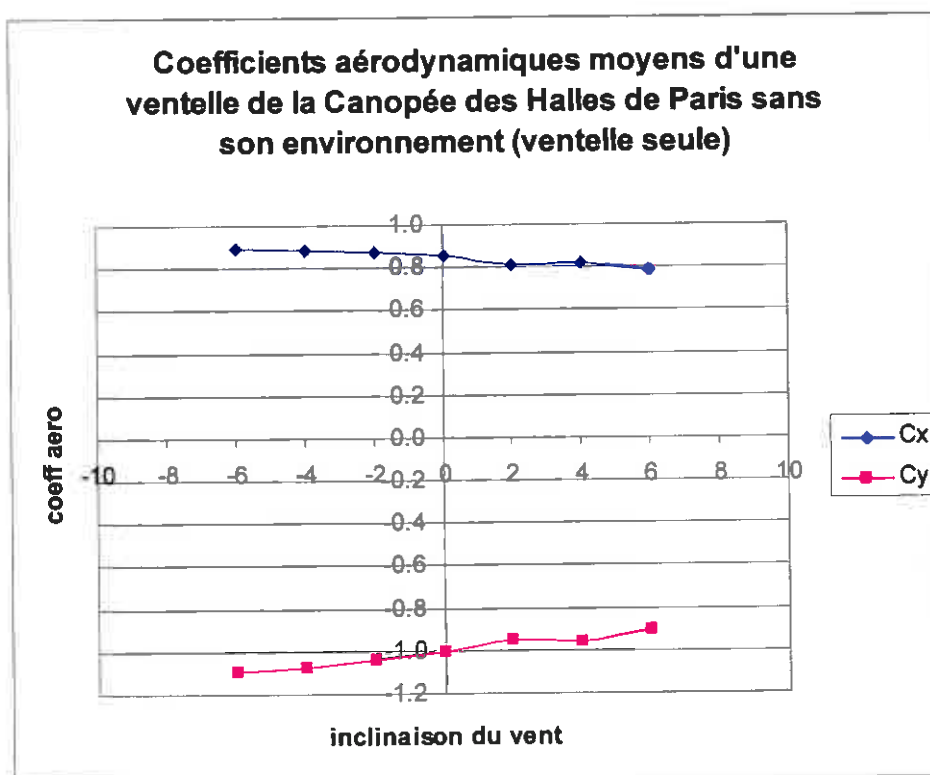


Figure 21 : Coefficients aérodynamiques moyens pour une ventelle seule
Etude en soufflerie des actions du vent sur les ventelles de la Canopée des Halles de Paris