



Evaluation multicritère des produits

Dimensionnement au vent des façades double-peau

AGUINAGA Sylvain

Programme 2023

Diffusion : Publique



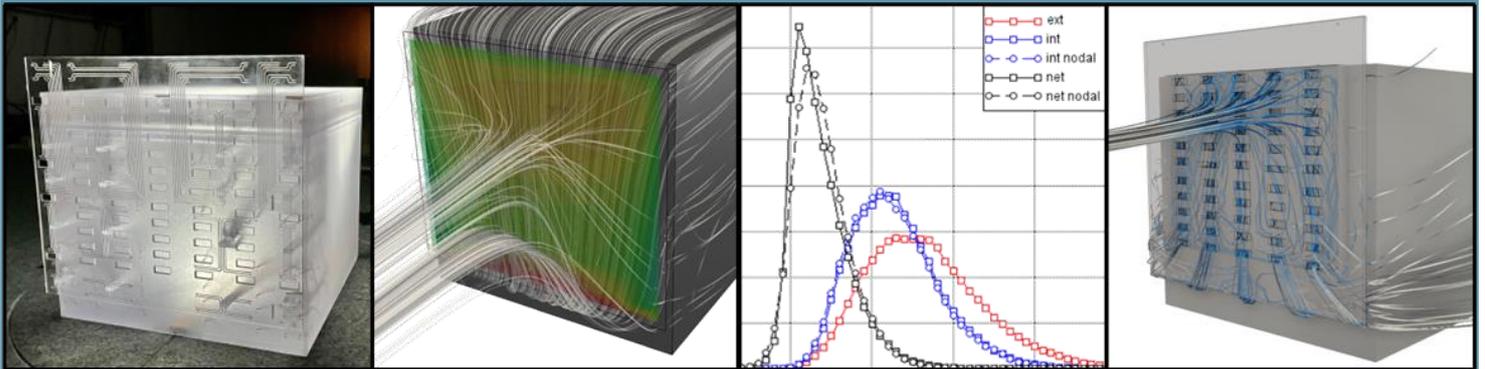
Ce texte est distribué sous les termes de la licence [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Centre scientifique et technique du bâtiment

Siège social > 84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée cedex 2

Tél. : +33 (0)1 64 68 82 82 – www.cstb.fr

Marne-la-Vallée / Paris / Grenoble / Nantes / Sophia Antipolis



CSTB
le futur en construction

Evaluation multicritère des produits

**Dimensionnement au vent
des façades double-peau**

AGUINAGA Sylvain

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, DC2A, Etablissement de Nantes

Domaine d'Action Stratégique : Bâtiments et villes face au changement climatique

30/11/23

Mots clés :

dimensionnement au vent, façades double-peau, turbulence couche limite atmosphérique, simulation numérique, simulation en soufflerie

Pour citer ce rapport:

AGUINAGA. S, *Dimensionnement au vent sdes façades double-peau*, CSTB, 2023

TABLE DES MATIERES

1	Introduction : Contexe et stratégie de l'étude	6
1.1	Façade double-peau et dimensionnement au vent.....	6
1.2	Rapide état de l'art académique	9
1.3	Problématique d'ingénierie	12
1.3.1	Approche réglementaire	12
1.3.2	Mesure en soufflerie à Couche Limite Atmosphérique	13
1.3.3	Simulation numérique en Mécanique des fluides	13
1.4	Stratégie de l'étude.....	14
2	Pressions totales, pressions statiques, pertes de charges et équilibrage en pression	15
2.1	Pressions totales et statiques	15
2.2	Pertes de charges.....	17
2.3	Equilibrage en pression	17
3	Expérimentation Modèle	20
3.1	Configuration modèle et modularités envisagées.....	20
3.2	Modèle de vent pour le dimensionnement des charges au vent.....	26
3.3	Soufflerie à Couche Limite Atmosphérique	27
3.3.1	Soufflerie NSA	27
3.3.2	Gradient de vent et de turbulence.....	28
3.4	Maquette et métrologie	31
3.4.1	Maquette du bâtiment.....	31
3.4.2	Localisation des prises de pression	31
3.4.3	Capteurs de pression et conduites pneumatiques	32
3.5	Extrapolation Vraie Grandeur et mesure des efforts de pointe	36
3.6	Coefficient de pression moyens et de pointes.....	37
3.7	Similitude et dépendance au nombre de Reynolds	38
4	Charges au vent sur la façade double-peau.....	40
4.1	Peau segmentée verticalement.....	40
4.1.1	Cas de référence	40
4.1.2	Effet de la hauteur du bâtiment.....	46
4.2	Peau ouverte sur les 4 pans	52
4.2.1	Cas de référence	52
4.2.2	Effet de la direction du vent	56
4.2.3	Effet de la hauteur du bâtiment.....	63
4.3	Peau segmentée horizontalement	66
4.3.1	Segmentations pleines	66
4.3.2	Segmentations poreuses	69
4.4	Effet de l'épaisseur de la lame d'air	70

4.5	Effet de porosité de la façade double-peau.....	74
4.5.1	Porosité uniforme	74
4.5.2	Porosité localisée	79
4.5.3	Peau poreuse entièrement recoupée.....	82
4.6	Peau périphérique	91
4.7	Synthèse sur les charges au vent	94
4.7.1	Charges maximales toutes configurations confondues	95
4.7.2	Mécanismes de l'équilibrage en pression	96
5	Modélisation Nodale	97
5.1	Approche nodale et code MATHIS.....	98
5.2	Modèle nodal de la lame d'air	99
5.2.1	Discrétisation de la lame d'air	99
5.2.2	Calcul de la pression statique dans la lame d'air	100
5.2.3	Limitations intrinsèques du modèle.....	101
5.3	Résultats	102
5.3.1	Peau segmentée verticalement	102
5.3.2	Peau ouverte sur 4 pans.....	110
5.3.3	Peau segmentée horizontalement	115
5.3.4	Peau poreuse	119
5.3.5	Peau poreuse entièrement recoupée.....	124
5.4	Synthèse sur le modèle nodal.....	126
6	Application pratique au dimensionnement au vent des façades double-peau	127
6.1	Application des résultats de l'étude au problème d'ingénierie	127
6.1.1	Dimensionnement majorant.....	127
6.1.2	Optimisation de l'évaluation des charges.....	128
6.2	Stratégies de dimensionnement au vent en fonction du type de façade double-peau 129	
6.2.1	Double-peau entièrement recoupée (recoupement étanche)	129
6.2.2	Double-peau recoupée type canal (horizontal / vertical)	130
6.2.3	Double-peau ouverte sur 3 ou 4 pans.....	131
6.2.4	Synthèse	132
6.3	Réflexions quant à la conception des façades double-peau vis-à-vis du dimensionnement au vent	133
7	Conclusions et perspectives	134

1 INTRODUCTION : CONTEXTE ET STRATEGIE DE L'ETUDE

1.1 FAÇADE DOUBLE-PEAU ET DIMENSIONNEMENT AU VENT

Cette étude concerne les façades de double-peau. Il s'agit d'éléments de façade détachés de la façade principale du bâtiment, et donc exposés à l'air libre sur leurs deux faces. Elles diffèrent des acrotères et autres façades en drapeau, exposées elles aussi au vent sur leur deux faces, du fait que la façade double-peau reste à distance proche de la façade du bâtiment, constituant ainsi une lame d'air.

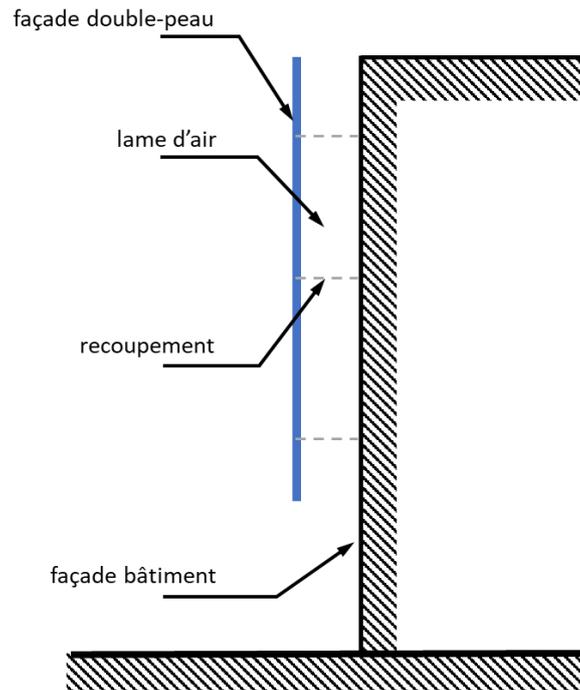


Figure 1 - terminologie de la façade double-peau

Ces façades ont plusieurs fonctionnalités. Elles peuvent avoir un objectif esthétique, pour habiller la façade du bâtiment. Mais elles sont aussi et surtout utilisées comme des éléments de régulation thermique du bâtiment. En hiver, la lame d'air peut capter l'énergie solaire par effet de serre, afin de réchauffer le bâtiment. Au contraire en été, la lame d'air peut se comporter comme un moteur aéraulique, via la convection naturelle, permettant ainsi de rafraîchir le bâtiment.

Il existe un très grand nombre de typologies de façades double-peau différentes, et on renverra le lecteur aux travaux de thèse de Vaglio [1] qui propose de faire une classification des différentes configurations géométriques possibles.

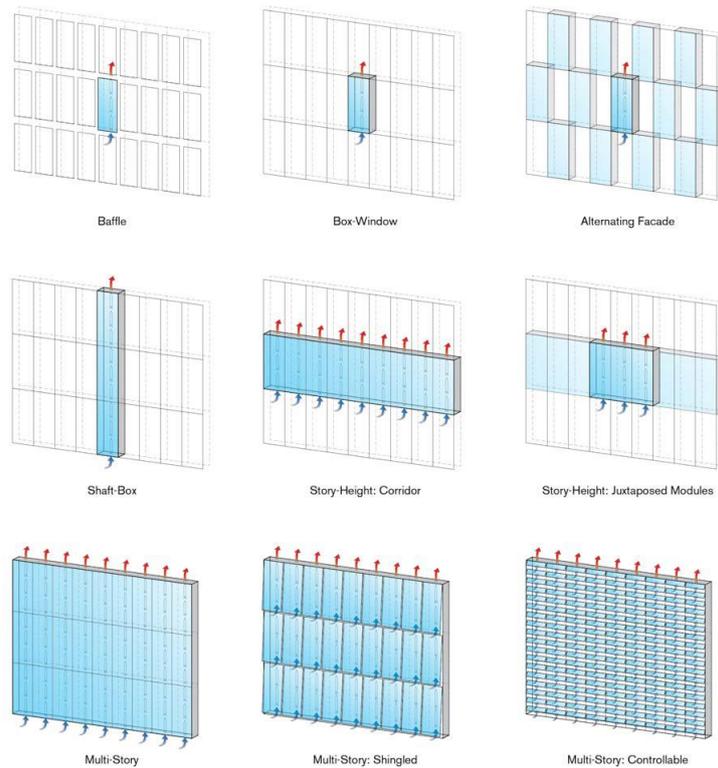


Figure 2 – différentes typologie de façade double-peau selon Vaglio [1]

Un paramètre clé de la façade double-peau va être la segmentation (ou partitionnement) de la lame d'air par des recouvrements. Ces recouvrements vont avoir un impact significatif sur la façon dont l'air peut circuler dans la lame d'air.

L'autre paramètre clé de la géométrie de la façade double-peau va être sa porosité. En effet suivant comment la façade va être constituée, en verre, en tôle perforée, sous forme de tuile imbriquées, etc... sa perméabilité à l'air va fortement varier.

Cette étude s'intéresse au dimensionnement des efforts générés par le vent sur la façade double-peau, en vue d'évaluer sa résistance face à une tempête cinquantennale. C'est une problématique d'ingénierie de plus en plus importante, du fait que de plus en plus de bâtiments sont aujourd'hui équipés de façades double-peau.

L'effort exercée par le vent sur la façade double-peau va résulter de la différence entre la pression p_{ext} appliquée par le vent sur la face externe de la façade, et la pression p_{int} appliquée sur la face interne de la façade. On notera le différentiel de ces deux pressions :

$$p_{net} = p_{ext} - p_{int}$$

Si $p_{ext} > p_{int} \Rightarrow p_{net} > 0$ on considère la façade double-peau en compression.

Si $p_{ext} < p_{int} \Rightarrow p_{net} < 0$ on considère la façade double-peau en arrachement.

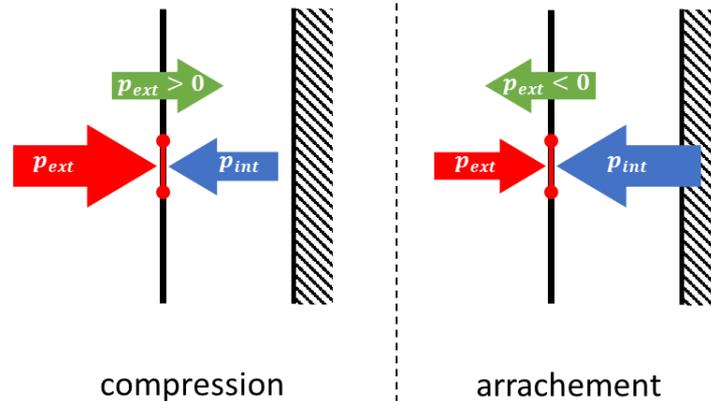


Figure 3 – terminologie et conventions de signe sur les différentiels de pression

On exprimera la plupart du temps ces pressions sous la forme de coefficients de pression :

$$c_p = \frac{p}{p_{dyn_ref}} = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2}$$

Avec p_{dyn_ref} une pression dynamique de référence de l'écoulement, associée à une vitesse de référence U_{ref} prise en amont du bâtiment (cf §3.6 pour plus détail).

La difficulté dans l'évaluation du différentiel de pression va principalement résider dans celle à mesurer la pression de part et d'autre de la façade de façon synchrone.

L'importance de la synchronisation de cette mesure s'explique par les fluctuations très importantes des signaux de pression. Ces fluctuations sont générées par les échelles de la turbulence de Couche Limite Atmosphérique. Ces échelles sont du même ordre de grandeur, voire plus grandes que la taille du bâtiment. Ainsi vont cohabiter au sein du même écoulement des instationnarités à l'échelle du bâtiment, générées par son propre sillage, et des instationnarités à l'échelle de la Couche Limite Atmosphérique. Cette superposition des dynamiques rend particulièrement complexe l'estimation des pressions de pointe, induites par les plus grandes instationnarités (toutes échelles combinées), et qui peuvent être plus de deux fois supérieures à la pression moyenne.

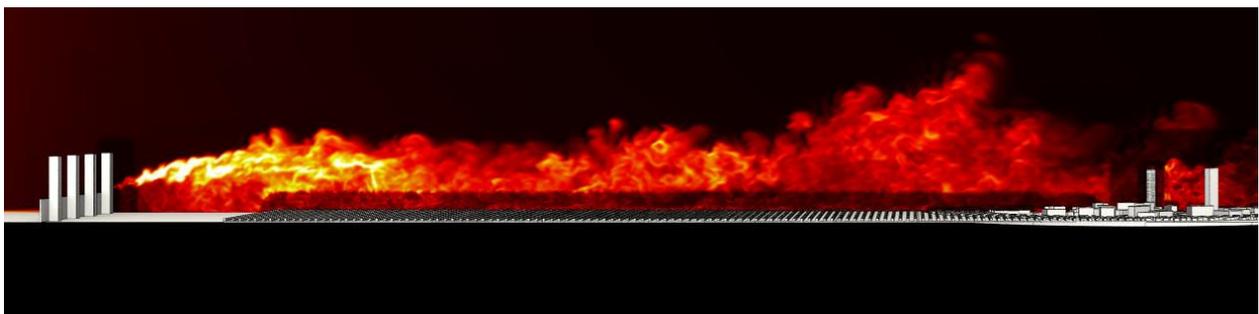


Figure 4 -illustration de la turbulence de Couche Limite Atmosphérique (source inconnue)

Ainsi, selon la façon dont vont se propager ces fluctuations de pression à l'intérieur de la lame d'air, il peut exister des variations très importantes dans le temps du différentiel de pression p_{net} , qu'il faut être à même de capter le plus fidèlement possible.

Le dimensionnement au vent de la façade double-peau va alors essentiellement consister en la bonne détermination de l'équilibrage en pression instantané de la lame d'air, en fonction des fortes fluctuations de pression qui vont s'appliquer en ses différentes ouvertures.

Cet équilibrage va dépendre des caractéristiques propres de la double-peau, mais aussi de la façon dont l'écoulement va se structurer autour du bâtiment, et ainsi générer des différences de pressions aux bornes de la lame d'air. Sans trop rentrer dans les détails des mécanismes sous-jacents à cet équilibrage pour le moment, la Figure 5 se propose d'illustrer deux configurations d'équilibrage très différentes.

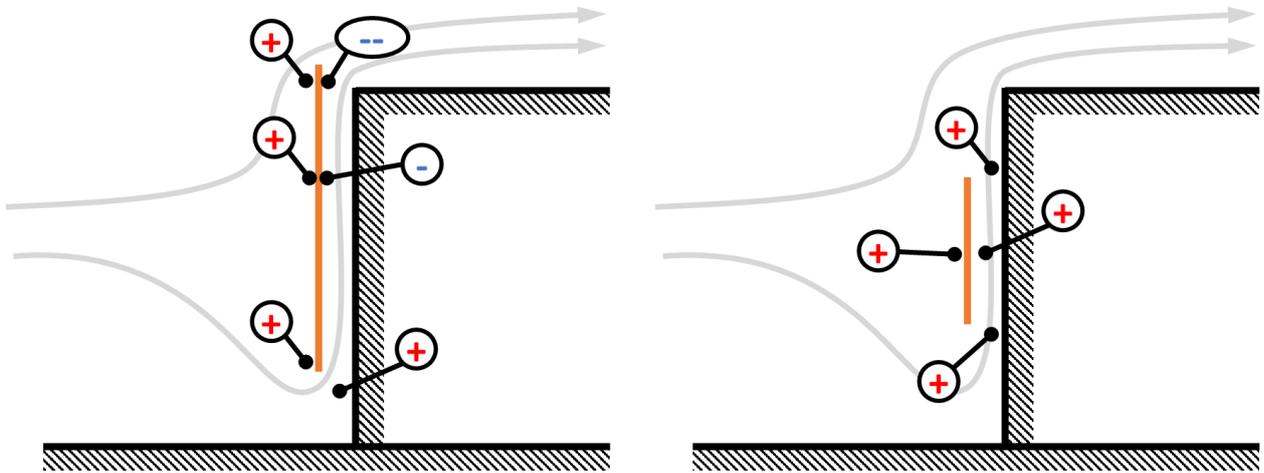


Figure 5 - illustration de deux cas extrêmes d'équilibrage en pression de la lame d'air

Dans la configuration de gauche, la façade dépasse légèrement du bâtiment. Le contournement de la partie en drapeau de la double-peau va générer des pressions négatives en haut de la lame d'air. En pied de façade, le point d'arrêt de l'écoulement du vent va créer des pressions positives, et on peut donc s'attendre à ce que la lame d'air s'équilibre à une pression intermédiaire, certainement négative. Ainsi la lame d'air serait en dépression, alors que la double-peau est disposée face au vent, ce qui peut sembler à priori contre-intuitif. La pression négative sur la face interne va alors se combiner à la pression positive sur la face externe, augmentant ainsi significativement les efforts appliqués sur la double-peau par rapport à une façade normale.

Dans la configuration de droite, où la double-peau ne remonte pas jusqu'en haut du bâtiment, on peut s'attendre à ce que les pressions aux bornes de la lame d'air soient similaires, et proches de la pression d'arrêt exercée par le vent sur l'ensemble de la façade. La pression dans la lame d'air va donc s'équilibrer à une valeur proche de celle appliquée sur l'ensemble de la façade, et surtout proche de la valeur appliquée sur la face externe de la double peau. Les efforts sur chaque face vont alors se compenser, conduisant à un effort net certainement très faible, ce qui peut également sembler contre-intuitif pour un élément de façade disposé sur la face au vent du bâtiment.

Ce premier exemple permet alors d'illustrer le fait que de faibles variations géométriques peuvent engendrer de très grandes variations des charges au vent sur la façade double-peau.

1.2 RAPIDE ETAT DE L'ART ACADEMIQUE

On se propose dans un premier temps de faire une rapide revue bibliographique de l'état de l'art sur le sujet. Le but étant principalement de positionner cette étude par rapport à des travaux déjà réalisés dans le monde académique. L'état de l'art sur le dimensionnement au vent des façades double-peau est assez réduit.

La première étude significative sur le sujet remonte à 1994 et est proposée par Gerhardt & Janser [2]. Leur étude, principalement basée sur des essais en soufflerie, met en évidence la problématique de l'équilibrage en pression dans une peau perforée, en fonction de la géométrie de la lame d'air et des dimensions du bâtiment, qui vont modifier le champ de pressions appliquées sur la façade du bâtiment et aux bornes de la lame d'air. L'étude

comprends également des mesures terrains réalisée sur un bâtiment à Berlin, montrant une bonne adéquation avec les résultats en soufflerie. L'étude se focalise sur des différentiels de pressions moyen sur la façade, et n'explore pas les effets d'instationnarité.

La seconde étude largement citée sur le sujet date de 2008, et est proposée Marques da Silva & Gloria Gomes [3]. Cette étude, réalisée sur une maquette en soufflerie, met en évidence l'équilibrage en pression de la lame d'air d'une grande façade double-peau pleine et non recoupée. Ils mettent notamment en évidence la mise en dépression de la lame d'air, telle qu'évoqué dans le paragraphe précédent. Les auteurs mettent notamment en évidence les effets de la direction du vent sur l'équilibrage en pression de la lame d'air, mais également l'effet apporté par le prolongement de la double-peau sur les autres façades du bâtiment. Ici encore, l'aspect instationnaire n'est pas abordé.

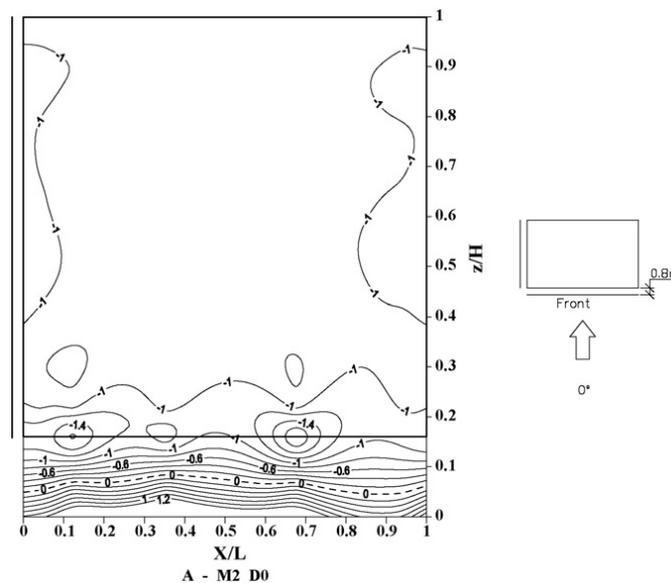


Figure 6 - cartographie du champ de pression sur la façade d'un bâtiment protégée par une double-peau d'après, Marques da Silva & Gloria Gomes 2008 [3].

Les travaux de thèse de Vaglio [1] constituent également une excellente référence pour illustrer la problématique du dimensionnement au vent des façades double-peau. Ses travaux incluent notamment une revue bibliographique intéressante et une description détaillée des différentes topologies existantes de double-peau, illustrée par une revue d'un très grand nombre de bâtiments de par le monde équipés de telles façades. Vaglio propose également une première tentative de modélisation par simulation numérique de type CFD (Computational Fluid Dynamics) de l'écoulement dans une double peau, en étudiant notamment l'impact de la géométrie de la façade et de sa porosité. Le modèle se heurte aux limites inhérentes à ce genre de modélisation, et ne prend pas en compte les effets d'instationnarité de la turbulence de Couche Limite Atmosphérique. Vaglio clôture ses travaux avec des recommandations intéressantes et pragmatiques quant à la conception des façades double-peau afin d'optimiser les efforts générés par le vent.

Dans les travaux plus récents que l'on peut retrouver dans la littérature, ceux de Jafari et Alipour [4] en 2021 tentent d'optimiser la géométrie d'une façade double peau en vue de réduire les efforts globaux du bâtiment. Leurs travaux se basent sur des simulations CFD, associées à des algorithmes génétiques d'optimisation. Ils ne s'attardent pas sur le dimensionnement de la peau en elle-même, mais juste sur son impact sur les charges globales. Hu et al [5] proposent une étude similaire en 2017 via des mesures sur maquette en soufflerie. Ils explorent notamment l'impact de la présence d'une façade double-peau, disposée sur la face au vent du bâtiment, sur la réponse dynamique des efforts globaux en prenant en compte les phénomènes aéroélastiques à l'échelle du bâtiment. Hu et al [6] reprennent cette géométrie en 2019, en s'intéressant cette fois aux chargements sur les

façades. Leurs mesures montrent alors que la présence de la double-peau va largement modifier le chargement au vent sur la façade, comme l'avait montré Marques da Silva et Gloria Gomes. Leurs mesures de pression sont complétées par des mesures de vitesse de l'écoulement par PIV à proximité de la façade. S'ils mesurent le spectre du signal de pression sur la façade, ils n'évaluent pas pour autant l'impact de la double-peau les chargements de pointe.

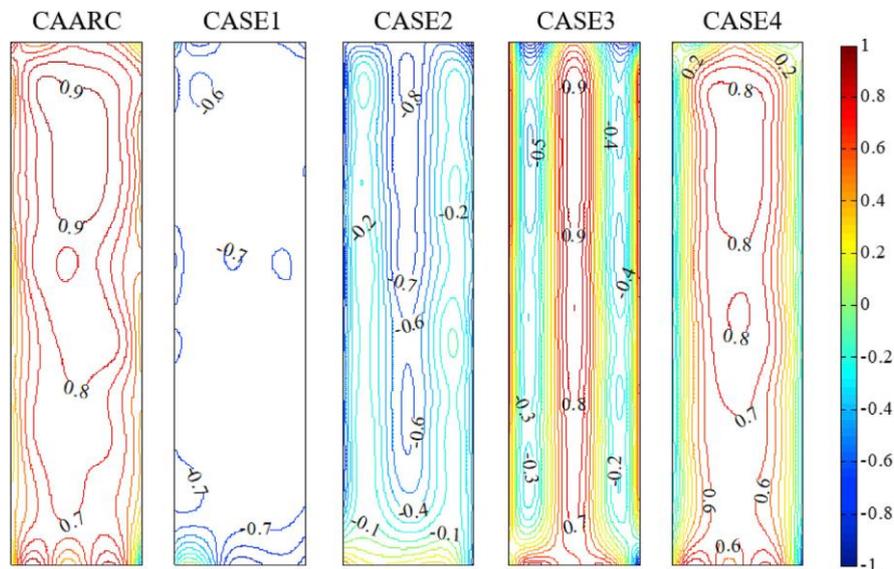


Figure 7 – modification du chargement au vent de la façade du fait de la présence d'une façade double-peau d'après Hu et al [6]

Kemper & Fiedmann [7] présentent en 2019 une étude très intéressante sur des façades double-peau poreuse de type grillage. L'étude est assez complète avec une caractérisation des pertes de charge de la grille sur un banc dédié, avec confrontation des résultats à une expérimentation terrain. L'étude considère alors une maquette en soufflerie afin de mesurer les charges sur une double-peau poreuse habillant toute la façade d'un bâtiment. Les mesures permettent alors d'obtenir une cartographie des charges différentielles nettes sur la façade. Les auteurs explorent également la question des chargements de pointe induits par les plus grandes turbulences de la Couche Limite Atmosphérique, mais uniquement par extrapolation des chargements moyens via les règles de l'Eurocode [8].

Pomaranzi et al [9] proposent en 2020 une étude similaire, avec des mesures en soufflerie des chargements sur une façade poreuse. Les auteurs considèrent deux échelles de maquettes différentes afin de mesurer l'impact de ce paramètre sur la modélisation. Cette étude est particulièrement intéressante du fait que les auteurs s'attardent sur l'évaluation des charges instationnaires sur la double-peau, avec notamment le tracé de distribution du signal de pression (PDF Probability Density Function) de chaque côté de la façade. Ces tracés permettent ainsi de mettre en évidence la différence de dynamique de part et d'autre de la façade.

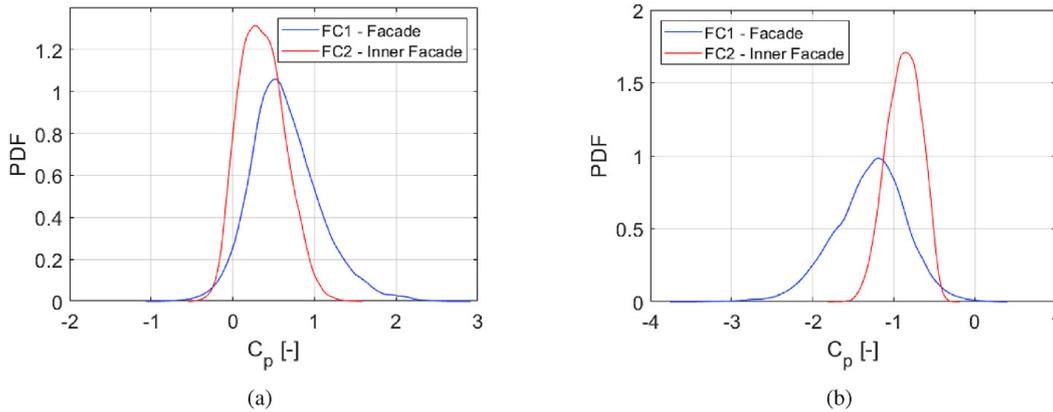


Figure 8 -PDF du signal de pression de part et d'autre de la façade double-peau, d'après Pomaranzi et al [9]

Afin de montrer que le sujet est toujours d'actualité on pourra citer enfin les très récents travaux de Skvorc et Kozmar [10] datant de 2023. L'étude s'intéresse à l'impact d'une peau à porosité variable sur les chargements, locaux et globaux, d'une tour. Elle repose sur une expérimentation en soufflerie, pour laquelle plusieurs typologies de vent, urbain ou rase campagne, sont considérées.

1.3 PROBLEMATIQUE D'INGENIERIE

Le paragraphe précédent a donc permis de montrer que le monde académique s'intéresse aux différentes problématiques induites par la présence d'une façade double-peau sur un bâtiment. On se propose à présent de revenir au problème d'ingénierie qui a motivé cette étude, la résistance au vent de la double-peau en elle-même, et de voir quels sont les moyens techniques à disposition permettant de l'adresser.

1.3.1 Approche réglementaire

Les façades double-peau ne sont que sommairement abordés dans l'Eurocode (§7.2.10) [8]. Les règles de « pression exercée sur les murs comportant plusieurs parois » ne permettent pas alors de prendre en compte la complexité des écoulements générés par ces façades. L'Eurocode précise d'ailleurs que ces règles « ne s'appliquent pas lorsque des entrées d'air mettent en communication la lame d'air avec des faces du bâtiment autres que la face sur laquelle le mur est situé ».

Pour dimensionner les façades double-peau actuellement construites, il s'avère que les contrôleurs techniques s'appuient sur un document intitulé « *Fiche Technique n°45 Tableaux des Pressions de vent W50 applicables aux façades légères et déterminées selon l'Annexe Nationale NF EN 1991-1-4/NA* » [11] qui, comme son nom l'indique, s'appuie lui-même sur les résultats de l'Eurocode.

Cette fiche a également été reprise dans le cadre du programme RAGE (Règle de l'Art Grenelle Environnement 2012) [12]. Ces fiches préconisent un dimensionnement basé sur un coefficient de pression $c_{p_{net}} = -1.5$. Cette valeur semble résulter d'une combinaison d'un coefficient d'arrachement $c_{p_{ext}} = -1.3$ prescrit sur la face extérieure de la double peau, et correspondant à l'arrachement maximal d'une façade classique, et d'une valeur de $c_{p_{int}} = +0.2$ prescrite dans la lame d'air, valeur qui semble être reprise de l'équilibrage en pression classique de l'intérieur d'un bâtiment. Ce raisonnement est représentatif des limitations de l'interprétation des valeurs de l'Eurocode. En effet, bien que ce $c_{p_{net}}$ résulte d'un assemblage de coefficients issus de l'Eurocode, il n'est pas du tout représentatif de la réalité des écoulements d'air circulant autour de la double peau.

De fait l'approche réglementaire, en l'état, ne semble pas être en mesure de répondre complètement au problème d'ingénierie.

1.3.2 Mesure en soufflerie à Couche Limite Atmosphérique

La soufflerie à Couche Limite Atmosphérique est aujourd'hui l'outil le plus à même de reproduire les instationnarités de l'écoulement du vent, et leur impact sur les chargements au vent des bâtiments et des structures. Les freins principaux à son utilisation restent le prix de l'étude, le temps d'exécution, et la disponibilité des moyens d'essais. La métrologie associée à la mesure des pressions de pointe est mature, et permet de proposer des évaluations fiables des charges de pointe sur les façades des bâtiments. Cependant la mesure des charges au vent sur les façades double-peau en soufflerie n'est pas sans poser de difficultés.

Ces difficultés sont surtout inhérentes à l'échelle des maquettes de bâtiments qui sont testées en soufflerie. Cette échelle est choisie en fonction de la taille du bâtiment et de son environnement immédiat. Elle varie généralement entre le 1/100 et le 1/300. Pour de telles échelles, une lame d'air de 20cm d'épaisseur va avoir en pratique une taille inférieure à 2mm sur la maquette. La difficulté est alors d'aller mesurer la pression dans un espace aussi restreint. En effet les prises de pression qui équipent les maquettes ont un diamètre de 1.6mm, soit l'ordre de l'épaisseur de la lame d'air. A cela il faut ajouter les connexions pneumatiques qui permettent de transmettre les signaux de pression aux capteurs. Leur présence risque alors de créer des obstructions significatives, qui vont modifier l'écoulement et l'équilibrage en pression de la lame d'air.

Aussi, les mesures sur les façades double-peau qui sont actuellement effectuées en soufflerie ne concernent que des sections de bâtiments reproduites à grande échelle. Ces simulations s'intéressent surtout au comportement local des éléments de façades double-peau, notamment quand celles-ci sont ajourées. Elles ne permettent pas de reproduire les effets d'équilibrage de pression sur de grandes façades double-peau à l'échelle du bâtiment. Aussi et surtout, ces maquettes sectionnelles ne permettent pas de restituer l'interaction du bâtiment avec l'ensemble des échelles de la turbulence de Couche Limite Atmosphérique qui vont conditionner fortement les chargements de pointes sur la façade.

1.3.3 Simulation numérique en Mécanique des fluides

La simulation numérique en mécanique des fluides, encore appelée CFD (Computational Fluid Dynamics) n'est pas soumise à ces problématiques d'échelle. Elle peut alors être perçue comme une solution séduisante afin de mesurer les différentiels de pression sur les éléments des façades double-peau. Elle est en effet à même de pouvoir modéliser le volume d'air compris entre la façade du bâtiment et la façade double-peau, et ainsi simuler l'équilibrage en pression de la lame d'air en fonction de la structuration de l'écoulement à l'échelle du bâtiment.

Dans le cadre d'une application industrielle, les simulations reposent généralement sur une approche aux écoulements moyens (RANS Reynolds Average Navier Stokes) où les effets de la turbulence sur l'écoulement moyen sont mimés par un modèle de turbulence. Dans ce cas, la CFD est alors incapable de restituer correctement les effets d'instationnarité, et de mesurer des charges de pointe sur les éléments de façade. Raison pour laquelle le CSTB ne propose que des pré-dimensionnements des charges aux vents par simulation numérique.

Pour circonvenir à l'absence d'information sur l'instationnarité du vent avec les approches moyennes, on a alors généralement recours à des artifices issus de l'approche réglementaire qui permettent d'estimer des charges de pointes, via une extrapolation des charges moyennes par un facteur multiplicatif basé sur la turbulence du vent amont. La démarche est proche de celle proposée par Kemper et Feldmann [7]. Cela étant, cet artifice induit soit des charges trop conservatrices, dans le cadre de coefficients de pression moyens élevés, soit pas assez sécuritaires, dans le cas de coefficients de pression moyens faibles.

Un rapport d'étude émis par un Bureau d'Etude faisait ainsi état de charges au vent nulles sur les éléments d'une façade double-peau à porosité élevée. En effet, l'équilibrage en pression de la lame d'air entraîne un $c_{p_{net}}$ nul en moyenne sur les éléments au centre de la façade. Or une extrapolation aux pointes d'un coefficient moyen nul par un coefficient multiplicatif, entraîne in fine un coefficient de pointe lui aussi nul. La simulation n'est pas en elle-même fautive, mais dans son interprétation du résultat, le Bureau d'Etude aurait dû souligner que ce résultat était inhérent aux limitations de la modélisation mise en œuvre, et proposer alors des charges plus conservatives.

Le mirage que la CFD peut ainsi pallier les lacunes de l'approche normative fait en sorte qu'il y a un risque que beaucoup de Bureaux d'Etudes orientés CFD s'engouffrent dans la brèche, afin de pouvoir répondre aux demandes croissantes des contrôleurs techniques et des Maîtrises d'Œuvre. Sans le recul nécessaire, ceci peut conduire à des problèmes de sous-dimensionnement des éléments de façade double-peau. Certains BE proposent quand même de répondre à cette problématique via l'utilisation de simulations numériques instationnaires dites aux « grandes échelles » (LES, DES...) afin de pallier aux limitations des approches moyennes RANS. Cela étant, les temps de calculs de ces simulations sont réduits afin de répondre aux impératifs industriels du projet. De fait, en l'état, les résultats de ces simulations ne sont certainement pas assez fiables pour prétendre à mesurer correctement les charges de pointes sur une façade double-peau.

En conclusion, la CFD est un outil très intéressant permettant d'anticiper l'impact de configurations géométriques induisant des chargements élevés sur les éléments de façade double-peau. C'est notamment un formidable outil pédagogique permettant de comprendre ces écoulements, qui conduisent parfois à des phénomènes contre-intuitifs. En revanche elle n'est pas à même, dans un contexte industriel, de mesurer correctement les charges de pointe exercées par le vent sur les éléments de façade double-peau.

Cette limitation de la CFD n'est pas propre aux seules façades double-peau, elle relève globalement du dimensionnement au vent des bâtiments et des structures. C'est pour cela que l'approche par simulation numérique est complémentaire de la mesure des charges au vent dans une soufflerie à Couche Limite Atmosphérique.

1.4 STRATEGIE DE L'ETUDE

Cette étude se positionne alors par rapport à l'état de l'art académique, et du problème d'ingénierie qui vient d'être exposé, avec pour objectifs :

- d'améliorer les connaissances quant à la problématique du dimensionnement au vent des façades double-peau, en complément des travaux académique pré-citées. Elle s'intéressera plus particulièrement aux mécanismes de l'équilibrage en pression de la lame d'air, en prenant notamment en compte l'aspect instationnaire induit par les turbulences à grande échelle de la Couche Limite Atmosphérique.

- d'apporter des éléments de réponse au problème d'ingénierie de l'évaluation des charges nettes de pointe, générées par la turbulence à grande échelle de la Couche Limite Atmosphérique. Le but étant de pouvoir pallier aux limitations évoquées au paragraphe précédent.

L'étude se structure autour d'une expérimentation modèle en soufflerie à Couche Limite Atmosphérique. Une maquette d'un bâtiment de référence parallélépipédique est reproduite à l'échelle du 1/100, et immergée dans un écoulement représentatif du vent en milieu urbain. L'échelle relativement importante de la maquette permet d'éviter l'écueil de représentativité géométrique de la lame d'air évoquée précédemment. La maquette se veut alors la plus modulaire possible, afin de pouvoir étudier facilement l'impact de variations géométriques de la double-peau sur l'équilibrage en pression de la lame d'air. La maquette est alors

instrumentée en capteurs de pression, permettant de remonter aux fluctuations de pression sur l'ensemble de la façade double-peau.

Dans un premier temps, une analyse détaillée des résultats des mesures réalisées en soufflerie sera effectuée, en explorant l'impact des variations géométriques de la façade double-peau, et ce afin d'illustrer pédagogiquement les mécanismes physiques à l'œuvre dans l'équilibrage en pression de la lame d'air. L'analyse des mesures est assistée en cela par des visualisations des écoulements par simulation numérique.

Dans un second temps, une tentative de modélisation de cet équilibrage en pression sera proposée à l'aide d'une approche numérique nodale, afin de restituer les fluctuations de pression à l'intérieur de la lame d'air, à partir des seules mesures des fluctuations de pression à l'extérieur de la façade double-peau. En plus d'apporter des informations intéressantes quant à la physique sous-jacente à l'équilibrage en pression, cette méthodologie pourrait ouvrir la voie vers de nouvelles méthodes de dimensionnement des façades double-peau pour des géométries de bâtiments complexes. Elle constituerait alors une piste intéressante pour résoudre le problème d'ingénierie du dimensionnement des façades double-peau.

La dernière partie de l'étude a pour objectif de dresser un cadre d'application pratique des résultats obtenus, en vue de répondre au problème d'ingénierie du dimensionnement au vent des façades double-peau.

2 PRESSIONS TOTALES, PRESSIONS STATIQUES, PERTES DE CHARGES ET EQUILIBRAGE EN PRESSION

Compte tenu du fait que la problématique du dimensionnement au vent des façades double-peau repose principalement sur une problématique d'équilibrage en pression de la lame d'air, il semble important, en préambule de l'étude, de rappeler et d'expliciter les notions de pression totale, pression statique et de pertes de charges.

2.1 PRESSIONS TOTALES ET STATIQUES

La pression totale est la somme des pressions dites statiques et dynamiques

$$p_{tot} = p_{stat} + p_{dyn}$$

La pression statique est celle qui va générer les efforts sur les façades, et donc la quantité qui et à prendre en compte pour les questions de dimensionnement au vent.

La pression dynamique est liée directement à la vitesse de l'écoulement U et sa masse volumique ρ de par la relation :

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} \rho U^2$$

La pression totale s'écrit donc :

$$p_{tot} = p_{stat} + \frac{1}{2} \rho U^2$$

La formule est analogue à celle traditionnellement utilisée en mécanique pour caractériser une énergie totale comme une somme d'une énergie potentielle et d'une énergie cinétique. La pression statique est donc assimilable à une énergie potentielle de l'écoulement.

Dans une analogie hydraulique, la pression statique peut être vue comme la hauteur de chute d'un cours d'eau, et la vitesse comme le débit du cours d'eau.

Dans une analogie à l'électricité, la pression statique peut être vue comme une tension électrique et la vitesse comme une intensité électrique.

Le théorème de Bernoulli permet alors de proposer une première relation très simplifiée entre la pression et la vitesse, en faisant une analogie à la conservation de l'énergie mécanique totale, disant que la pression totale se conserve. Ainsi entre deux points A et B d'un écoulement :

$$p_{tot_A} = p_{tot_B}$$

$$p_{stat_A} + \frac{1}{2}\rho U_A^2 = p_{stat_B} + \frac{1}{2}\rho U_B^2$$

On peut illustrer ce théorème avec deux exemples d'applications. Le premier est le point d'arrêt d'un écoulement sur la façade d'un bâtiment. Au loin, et en considérant une pression statique nulle (référence de pression), on considère que la pression totale est égale à la pression dynamique. Au point d'arrêt, la vitesse du vent est nulle. Ainsi la pression dynamique est alors totalement répercutée en pression statique, créant ainsi un effort exercé par le vent sur la façade.

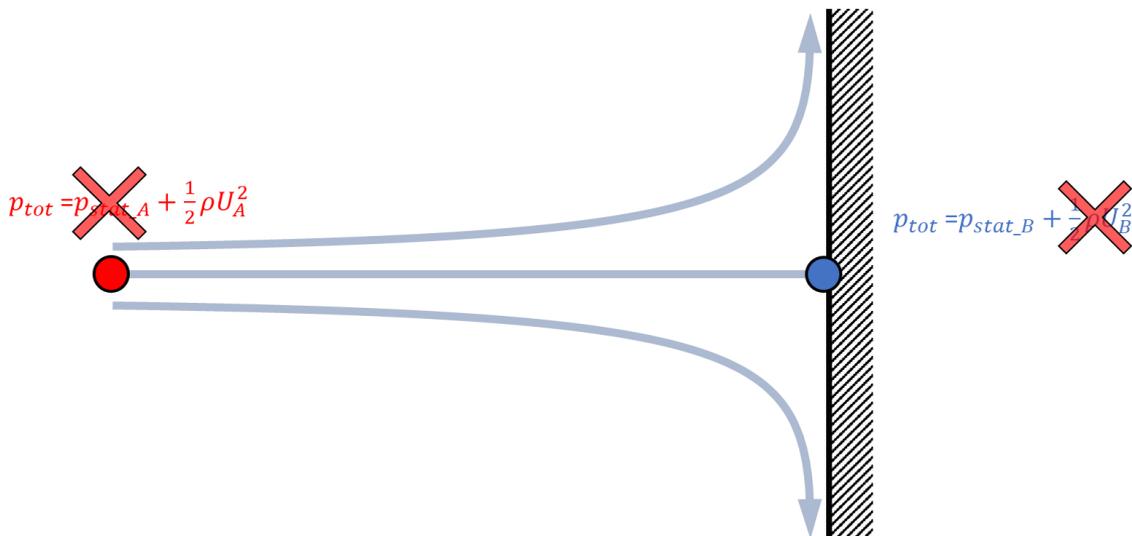


Figure 9-conservation de la pression totale sur un point d'arrêt

Le deuxième exemple est l'écoulement dans un canal à section constante. De par l'hypothèse fondamentale de la conservation de la masse dans l'écoulement, la vitesse dans le canal se conserve ($S_A = S_B \Rightarrow U_A = U_B$). Ainsi l'application directe du théorème de Bernoulli conduirait donc à une conservation de la pression statique dans le canal :

$$p_{tot_A} = p_{tot_B} \Rightarrow p_{stat_A} = p_{stat_B}$$

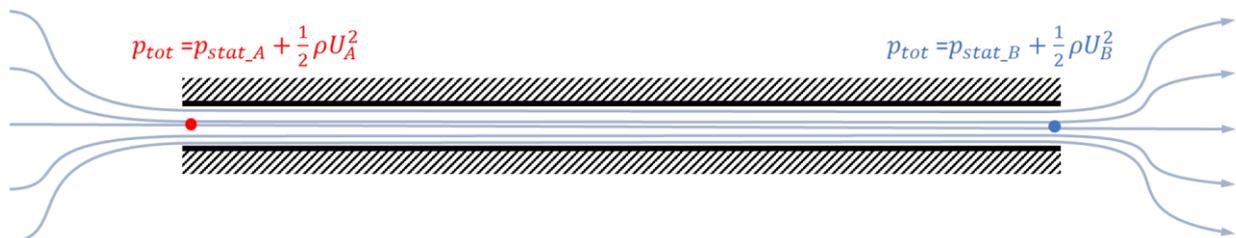


Figure 10- conservation de la pression totale dans une conduite

2.2 PERTES DE CHARGES

Le théorème de Bernoulli est pratique et permet d'expliquer simplement bon nombre de phénomènes en mécanique des fluides. Il repose cependant sur des hypothèses fortes de fluide parfait. Or un fluide, étant donné sa viscosité, va générer des pertes d'énergie du fait des frottements aux parois, ou des fortes variations de vitesse en entrée et en sortie de canal. Ces pertes d'énergie peuvent se traduire sous forme de pertes de charge dans l'équation de conservation de la pression totale :

$$p_{tot_A} = p_{tot_B} + \Delta p_{pertes}$$

Les pertes de charge dans un canal sont souvent modélisées par une relation quadratique à la vitesse de l'écoulement, couplée à un coefficient de perte de charge :

$$\Delta p_{pertes} = \frac{1}{2} \xi \rho U^2$$

Dans une analogie à l'électricité, le coefficient de perte de charge peut alors être assimilé à une résistance électrique qui dissipe de l'énergie par effet Joule. L'évolution de la pression totale aux bornes du tube devient alors :

$$p_{tot_A} = p_{tot_B} + \frac{1}{2} \rho \xi U^2$$

Dans une canalisation à section constante ($S_A = S_B$) et du fait de la conservation du débit ($U_A = U_B$) :

$$\Rightarrow p_{stat_A} - p_{stat_B} = \frac{1}{2} \rho \xi U^2$$

Ainsi la différence de pression statique aux bornes du canal sera proportionnelle au coefficient de pertes charge et au carré de la vitesse (relation quadratique). Elle peut être vue comme l'énergie motrice nécessaire pour vaincre les pertes d'énergie générées par la viscosité du fluide. Plus la différence de pression aux bornes du canal est élevée, et plus la vitesse dans le canal sera importante.

2.3 EQUILIBRAGE EN PRESSION

Cette relation entre la perte de charge et la vitesse dans la conduite peut ensuite être appliquée pour déterminer l'évolution de la pression tout du long de la canalisation. La Figure 11 se propose de discrétiser le canal précédant en 4 points. La pression en ces 4 points va évoluer entre la valeur p_{stat_A} et p_{stat_B} du fait des pertes de charge dans chaque section du canal (pertes par frottement), mais également des pertes de charges à l'engoncement et au refoulement du canal (pertes de charges dites de singularité). L'évolution de la pression dans le canal va alors résulter d'un équilibre en pression qui dépend des pertes de charges dans chaque section et de l'établissement de l'écoulement dans la conduite.

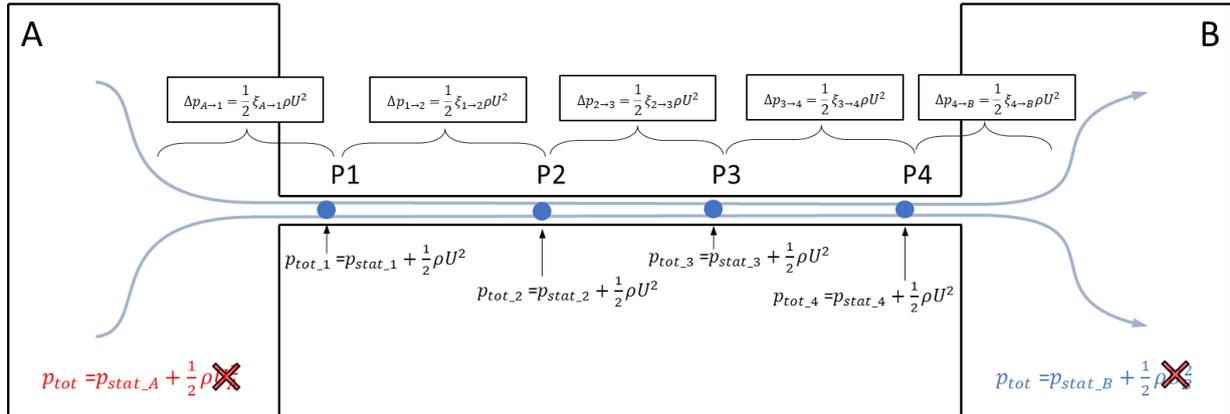


Figure 11 – évolution de la pression du fait de pertes de charges dans un canal

À titre d'exemple, la Figure 12 et le Tableau 1 présentent des simulations de l'évolution de la pression dans un canal de 0.01m² de section, soumis à un différentiel de pression de 100Pa. 4 simulations sont réalisées en faisant varier la section d'entrée et de sortie du canal, conduisant ainsi à 4 scénarios différents pour l'évolution de la pression dans la conduite.

#simu	PA (Pa)	PB (Pa)	section A (m ²)	section B (m ²)	P1 (Pa)	P2 (Pa)	P3 (Pa)	P4 (Pa)	vitesse(m/s)
1	100	0	0.01	0.01	65	56	47	46	1.50
2	100	0	0.01	0.005	97	96	95	95	0.49
3	100	0	0.005	0.01	8	7	6	6	0.53
4	100	0	0.005	0.005	56	55	54	54	0.37

Tableau 1 -évolution de la pression statique dans un canal

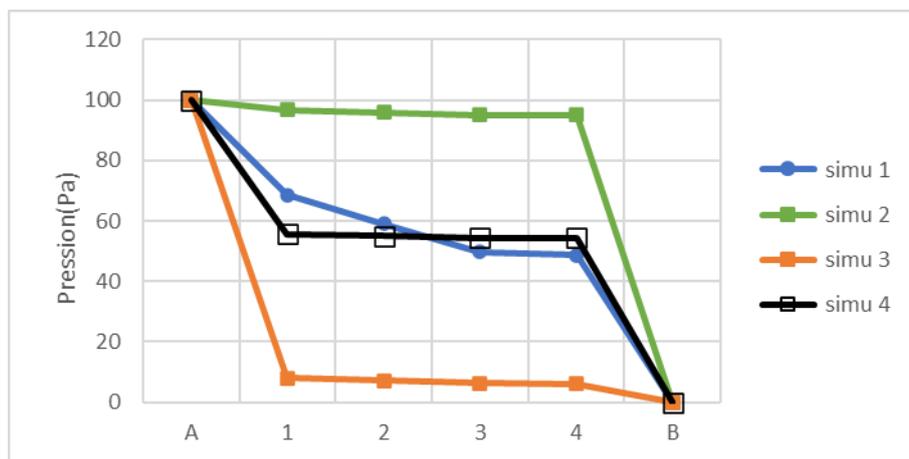


Figure 12 -Evolution de la pression statique dans un canal

Dans le cas où les sections d'entrée et de sortie sont identiques, la pression dans le canal va s'équilibrer à une valeur moyenne des pressions à ses bornes, autour de 50Pa. Dans le cas où les sections d'entrée et de sortie sont petites (simulation 4), les pertes de charges d'entrée/sortie vont limiter fortement le débit dans le canal. La pression est alors quasiment constante dans le canal (pas de pertes par frottement du fait d'un faible débit). Quand les sections d'entrée et de sortie font la taille du canal, la figure montre alors une variation continue de la pression dans la conduite du fait des pertes de charges par frottement tout du long de la

canalisation. Quand une des deux sections d'entrée/sortie est plus petite que l'autre, l'analyse montre alors que la pression dans le canal va s'équilibrer à une valeur proche de la section la plus grande.

Ainsi on peut observer quatre configurations très différentes de l'équilibrage en pression du canal de par la seule modification des sections d'entrée/sortie du canal.

Cet exemple permet ainsi d'illustrer les mécanismes qui seront à l'œuvre dans les problématiques d'équilibrage en pression, et qui sont au cœur de l'analyse des charges au vent sur la façade double-peau.

3 EXPERIMENTATION MODELE

On se propose à présent dans ce paragraphe de décrire l'expérimentation modèle qui sert de support à la compréhension des mécanismes de l'équilibrage en pression de la lame d'air, et de la génération des charges sur une façade double-peau.

3.1 CONFIGURATION MODELE ET MODULARITES ENVISAGEES

L'expérience modèle repose sur une façade double-peau apposée sur l'une des façades d'un bâtiment cubique de 40m de côté. Ce bâtiment est reproduit en maquette à l'échelle du 1/100. La maquette mesure donc 40 cm de côté. On différenciera par la suite l'échelle maquette de la Vraie Grandeur notée VG. Dans sa configuration de référence, la façade double-peau recouvre toute la largeur de la façade du bâtiment et s'étend d'une hauteur de 5m à partir du sol jusqu'au sommet de la façade du bâtiment. Elle est dégagée de la paroi du bâtiment d'une distance de 2m Vrai Grandeur, soit 20mm échelle maquette. La façade double-peau et le bâtiment sur lequel est adossée possèdent plusieurs modularités géométriques.

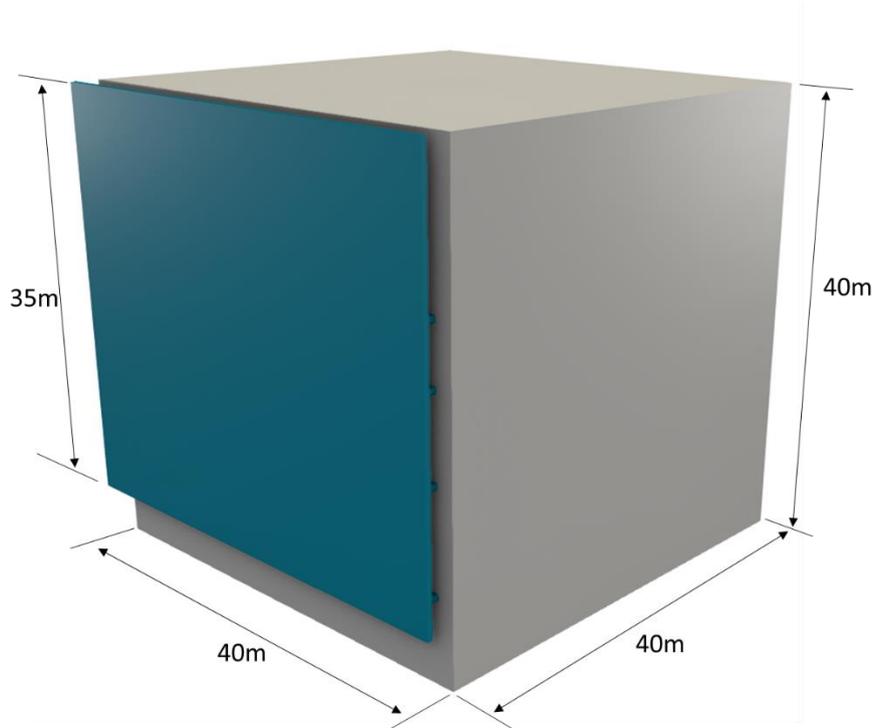


Figure 13 -configuration de référence de l'expérimentation modèle

La première modularité repose sur la hauteur du bâtiment qui peut être soit abaissée à une hauteur de 35m, la double-peau débordant alors de 5m de la toiture, soit relevée à une hauteur de 45m, la façade double-peau s'arrêtant alors à 5m du sommet de la façade du bâtiment. La configuration de base est appelée « niveau », les deux autres sont respectivement appelées « bas » et « haut » tel qu'illustré Figure 14.

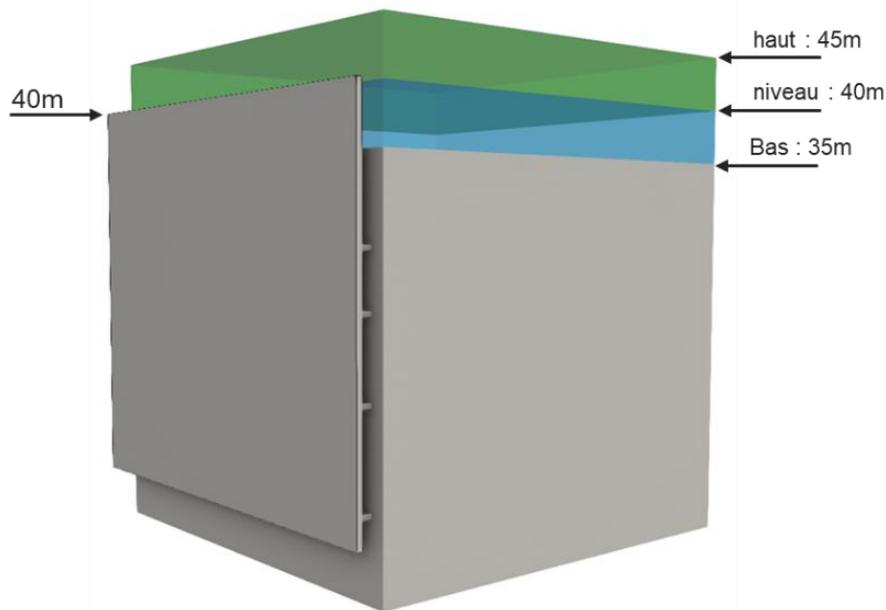


Figure 14 – modularité de la hauteur du bâtiment

La seconde modularité concerne l'épaisseur de la lame d'air qui peut être ajustée de façon continue. 4 épaisseurs ont été étudiées : 50cm, 1m, 2m et 3m tel qu'illustré Figure 15

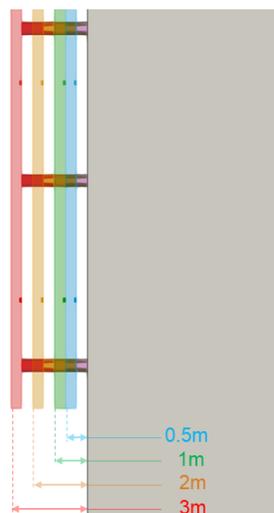
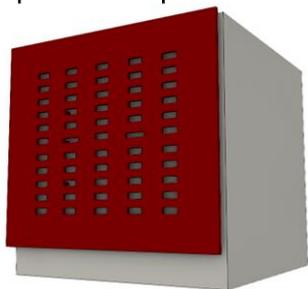


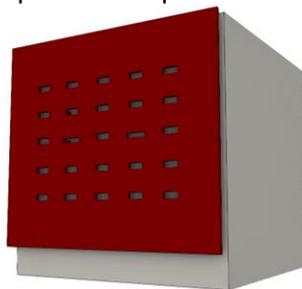
Figure 15 - modularité de l'épaisseur de la lame d'air

Une porosité de la façade double-peau peut également être simulée par l'agencement de lumières à travers la façade. Chaque lumière peut être occultée de façon indépendante, ouvrant ainsi la voie à de multiples possibilités d'aménagement de cette porosité. Dans le cadre de cette étude, les lumières ont été aménagées de façon à créer une porosité répartie de 15% et de 8% de la surface de la double-peau. Une troisième configuration a également été étudiée avec une porosité équivalente à 3% de la surface de la double-peau, mais extrêmement localisé en haut et en bas de la façade, telle que présentée dans la Figure 16.

>porosité répartie 15%



>porosité répartie 8%



>porosité localisée 3%

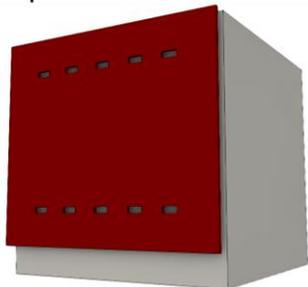


Figure 16 - modularité de la porosité

La lame d'air peut ensuite être segmentée sur toute son épaisseur, tel qu'illustré Figure 17. Cette segmentation vise ainsi à compartimenter la lame d'air de façon étanche, modifiant son équilibre en pression.

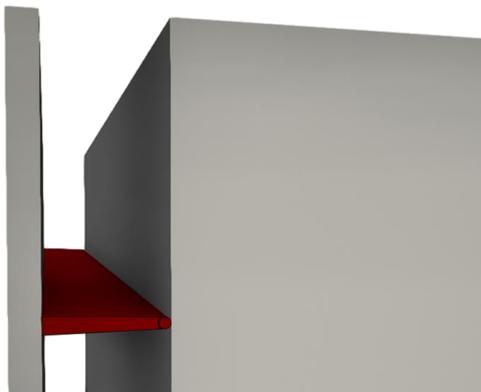


Figure 17- principe de segmentation de la lame d'air

La segmentation peut être effectuée de façon verticale telle que présentée Figure 18. Des lames de séparation sont disposées à une distance de 5m de chaque bord de la façade, et courent sur toute la hauteur de la façade double-peau.

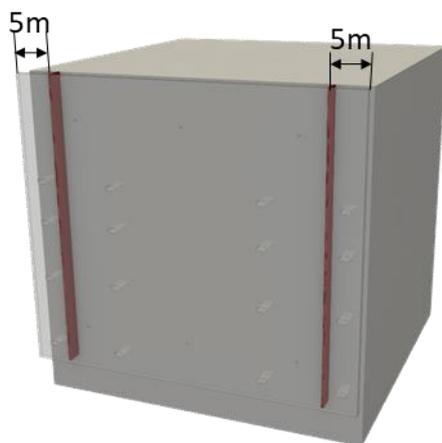


Figure 18 – segmentation verticale

La segmentation peut ensuite être effectuée de façon horizontale. Deux configurations ont été étudiées, tel que présenté Figure 19. La première impose une séparation qui court sur toute la largeur de la façade, localisée à une hauteur de 5m de la limite inférieure de la façade double-peau. La seconde configuration place la séparation une distance de 5m de la partie supérieure de la façade double peau.

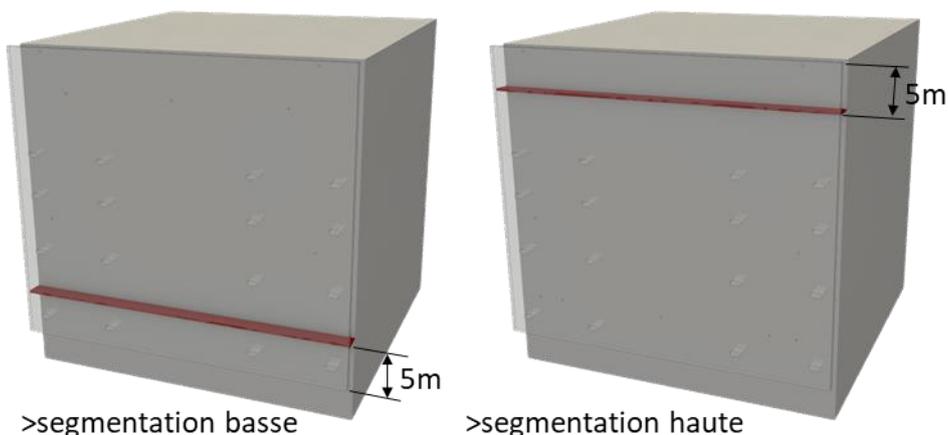


Figure 19 – segmentation horizontale

La porosité de ces segmentations horizontales peut être ajustée via l'aménagement de lumières conduisant à des porosités de 8% ou 15% tel que présenté Figure 20.



Figure 20 - porosité des segmentation verticales

Une dernière configuration dite « segmentation pourtour » permet de segmenter une partie de la façade double-peau sur ces 4 côtés tels que présentés Figure 21. Cette configuration peut s'avérer notamment intéressante quant associée à une porosité de la façade double-peau.

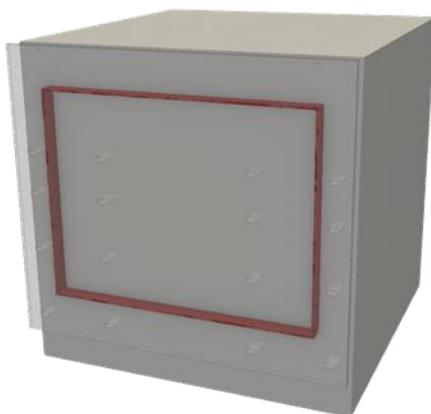


Figure 21 – segmentation pourtour

Enfin, une dernière modularité permet d'étendre la façade double-peau sur les 4 façades du bâtiment dans une configuration appelée double-peau périphérique.

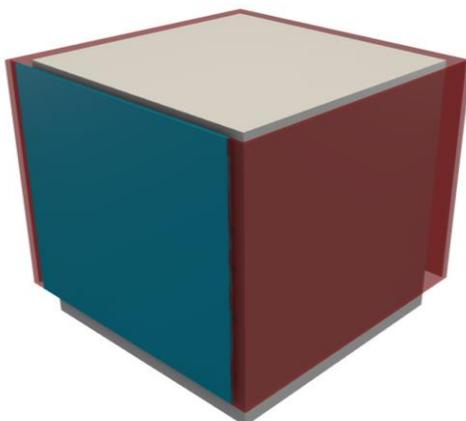


Figure 22 – double peau-périphérique

Ces modularités peuvent être combinés l'une avec l'autre, pouvant ainsi générer un très grand nombre de configurations géométriques. Un principe de nomenclature a alors été défini permettant de décrire facilement chacune des configurations géométriques testée. Elle est présentée Figure 23.

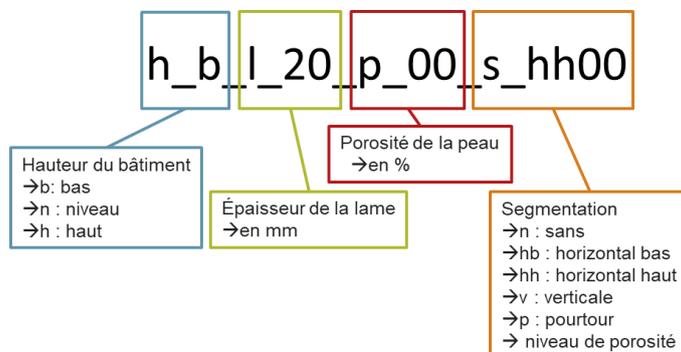


Figure 23 - principe de de nomenclature permettant de décrire une configuration géométrique reposant sur la combinaison de modularités

Un total de 45 configurations géométriques différentes en été ainsi étudiées, et sont répertoriés dans le Tableau 2.

# config	Hauteur bâtiment	Largeur lame (m Vraie Grandeur)	Porosité peau	Segmentation
1	bas	2	plein	non
2	niveau	2	plein	non
3	haut	2	plein	non
4	bas	2	plein	horiz haut plein
5	niveau	2	plein	horiz haut plein
6	haut	2	plein	horiz haut plein
7	bas	2	plein	horiz bas plein
8	niveau	2	plein	horiz bas plein
9	haut	2	plein	horiz bas plein
10	bas	2	plein	vert
11	niveau	2	plein	vert
12	haut	2	plein	vert
13	bas	2	plein	horiz haut poreux 08%
14	haut	2	plein	horiz haut poreux 08%
15	bas	2	plein	horiz haut poreux 15%
16	haut	2	plein	horiz haut poreux 15%
17	haut	0.5	plein	non
18	niveau	0.5	plein	non
19	bas	0.5	plein	non
20	niveau	1	plein	non
21	haut	1	plein	non
22	niveau	3	plein	non
23	haut	3	plein	non
24	bas	périphérique	plein	non
25	haut	périphérique	plein	non
26	bas	2	plein	pourtour
27	haut	2	plein	pourtour
28	bas	2	poreux 8%	pourtour
29	haut	2	poreux 8%	pourtour
30	bas	2	poreux 15%	pourtour
31	haut	2	poreux 15%	pourtour
32	bas	2	poreux 15%	non
33	haut	2	poreux 15%	non
34	niveau	2	poreux 15%	non
35	bas	2	poreux 8%	non
36	haut	2	poreux 8%	non
37	niveau	2	poreux 8%	non
38	haut	2	poreux 3%	non
39	niveau	2	poreux 3%	non
40	haut	2	poreux 3%	vert
41	bas	2	poreux 3%	vert
42	niveau	2	poreux 3%	vert
43	haut	2	poreux 15%	vert
44	bas	2	poreux 15%	vert
45	niveau	2	poreux 15%	vert

Tableau 2 - liste des configuration géométriques étudiées

3.2 MODELE DE VENT POUR LE DIMENSIONNEMENT DES CHARGES AU VENT

Afin de rapprocher l'expérimentation modèle du cadre de l'application industrielle pour le dimensionnement au vent des bâtiments, il a été choisi de baser le modèle du vent incident au bâtiment conformément à l'Eurocode [8] et à son Annexe Nationale NF EN 1991-1-4/NA.

Le vent naturel est un signal fluctuant dans le temps : il varie en intensité et en direction. La vitesse instantanée du vent peut s'exprimer par l'expression :

$$u(t) = U + u'(t)$$

où U est la valeur moyenne de la vitesse sur la période d'observation T , et $u'(t)$ la fluctuation de vitesse autour de cette moyenne.

La turbulence est caractérisée par l'écart type σ de la fluctuation longitudinale de la vitesse du vent $u'(t)$ sur la période T , selon l'expression

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u'^2(t) dt} = \sqrt{u'^2}$$

L'intensité de turbulence est alors donnée par l'expression

$$I = \frac{\sigma}{U}$$

Les données de vitesse moyenne et de turbulence varient avec la hauteur. Cette distribution est fonction de la rugosité du sol et de sa topographie, et est donc caractéristique de "l'histoire" du vent.

La croissance de la vitesse moyenne avec la hauteur peut être modélisée pour une hauteur z supérieure à une valeur minimum z_{min} par une loi logarithmique qui s'exprime par l'expression

$$U = k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) V_{b,0} \text{ pour } z > z_{min}$$

Où z est l'altitude exprimée en mètres, z_0 est le paramètre de rugosité du site, $z_{0,II}$ est le paramètre de rugosité du terrain de catégorie II, k_r est le facteur de terrain fonction de la rugosité définie par : $k_r = 0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07}$ et $V_{b,0}$ est la vitesse moyenne mesurée à la station météorologique de référence à 10 mètres de hauteur. Pour $z < z_{min}$, la valeur à z_{min} est conservée.

Le gradient de turbulence peut quant à lui être modélisé par la relation

$$I(z) = \frac{k_l}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

Où le coefficient de turbulence k_l s'exprime par la formule : $k_l = 1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log(z_0) + 3)^6$

Le profil de vitesse moyenne permet alors de définir une pression dynamique moyenne exercée par le vent telle que :

$$\overline{p_{dyn}} = \frac{1}{2} \rho U^2$$

Avec ρ la masse volumique de l'air prise égale à 1.225 kg/m³ en accord avec l'Annexe Nationale de l'Eurocode.

L'Eurocode propose alors une modélisation des pressions de pointe basée directement sur l'intensité de turbulence du vent est définie telle que :

$$\widehat{p_{dyn}} = (1 + 7I) \overline{p_{dyn}}$$

L'Annexe nationale de l'Eurocode propose une carte des vents permettant de choisir une valeur de la vitesse de référence de période de retour 50 ans $V_{b,0}$ en fonction de la localisation du projet. Dans le cadre de cette étude on choisira $V_{b,0} = 24m/s$ qui est par exemple la valeur prescrite sur la ville de Paris.

Cette vitesse est entendue dans un espace plat, dégagé, de rugosité type II et mesurée à une altitude de 10m du sol. Dans le cadre de cette étude on choisira un environnement urbain assimilé à une rugosité IIIb tel que défini dans le Tableau 3 issu de l'Annexe Nationale de "l'Eurocode vent". Ce tableau fournit également les valeurs de z_0 associée en fonction de la nature du site. Ces valeurs de rugosité permettent alors, à partir des formules précédentes, de transposer la vitesse du vent de référence $V_{b,0}$ pour toute altitude et tout type de rugosité.

Classe	Nature du terrain	z_0	z_{min}
0	Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer ; lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins 5km	0.005	1
II	Rase campagne, avec ou non quelques obstacles isolés (arbre, bâtiment, etc.) séparés les uns des autres de plus de 40 fois leur hauteur	0.05	2
IIIa	Campagne avec des haies ; vignobles ; bocage ; habitat dispersé	0.20	5
IIIb	Zones urbanisées ou industrielles ; bocage dense ; vergers	0.50	9
IV	Zones urbaines dont au moins 15 % de la surface est occupée par des bâtiments de hauteur moyenne supérieure à 15m, forêts	1	15

Tableau 3 : Paramètres de rugosité de terrain

Ainsi dans le cadre de cette étude, et en définissant une hauteur de référence $h_{ref} = 40m$, pour un environnement de rugosité IIIb, on retrouve les valeurs de référence suivantes :

$$\begin{aligned} \bar{U}(z = h_{ref}) &= 23.5m/s \\ I(z = h_{ref}) &= 21\% \\ \overline{p_{dyn}}(z = h_{ref}) &= 338Pa \\ \overline{\hat{p}_{dyn}}(z = h_{ref}) &= 835Pa \end{aligned}$$

3.3 SOUFFLERIE A COUCHE LIMITE ATMOSPHERIQUE

L'objectif de cette expérimentation modèle est d'étudier l'évolution de l'équilibrage en pression de la lame d'air de la façade double-peau en prenant en compte l'instationnarité naturelle du vent généré par la turbulence de Couche Limite Atmosphérique. Pour ce faire, la maquette est alors placée dans la veine d'essai de la soufflerie de la Couche Limite Atmosphérique du CSTB.

3.3.1 Soufflerie NSA

La soufflerie NSA (Nouvelle Soufflerie Atmosphérique) du CSTB est une soufflerie dite à Couche Limite Atmosphérique. Ce type de soufflerie se distingue par des veines d'essais très longues dans lesquelles on dispose des rugosités, obstacles permettant de générer la turbulence représentative de la Couche Limite Atmosphérique.

Les dimensions de la veine d'essais sont de 4m de large par 2m de haut (ajustable à 2.5m) pour 14m de long. Elle est équipée d'un plateau tournant en son centre permettant de placer la maquette à différentes incidences de vent. La vitesse maximale dans la veine d'essai est de 20m/s.

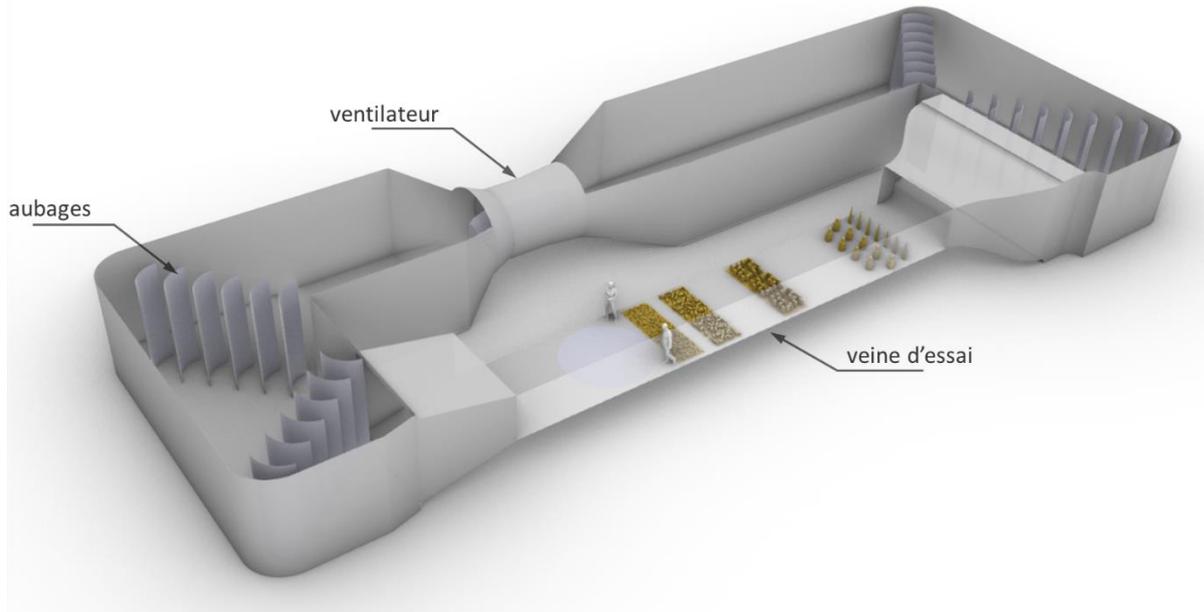


Figure 24 - Plan 3D de la Soufflerie à Couche Limite Atmosphérique du CSTB

3.3.2 Gradient de vent et de turbulence

La grande longueur de la veine d'essai permet donc de disposer en amont de la maquette des rugosités de différentes tailles qui vont générer une turbulence représentative de celle du vent naturel. La turbulence ainsi créée est la superposition de tourbillons de différentes tailles et de différentes intensités. Les grandes rugosités sont positionnées le plus en amont, elles vont générer de grands tourbillons qui vont perdurer dans le temps. A l'inverse, les petites rugosités vont créer des petits tourbillons qui vont disparaître plus rapidement. Le but est alors de positionner l'ensemble de ces rugosités sur toute la longueur de la veine de façon à combiner les différentes tailles de tourbillons à l'endroit même de la maquette.

Afin de reproduire une turbulence caractéristique du site étudié, du vent marin au vent urbain, à l'échelle désirée, l'agencement de ces rugosités va différer d'un projet à l'autre. Il est alors nécessaire, en amont des essais, d'effectuer une mesure du gradient de vitesse moyenne et d'intensité turbulente afin de s'assurer qu'il est conforme au profil Eurocode recherché pour le projet considéré. On va donc chercher à retrouver les valeurs du modèle vent décrites §3.2.

La mesure du gradient de vitesse est effectuée à l'aide d'un tube de Pitot dit « rapide » à une fréquence d'acquisition élevée pour remonter à une information sur la turbulence de l'écoulement. Elle est effectuée au centre de la veine d'essai, à l'endroit où sera positionné la maquette, en l'absence de la maquette. Cette caractérisation permet de s'assurer que le profil de vent souhaité est bien établi au niveau de la maquette. La mesure du gradient est menée de façon itérative, en adaptant la taille et la position des rugosités, de façon à obtenir les gradients de vitesse moyenne et de turbulence désirés.

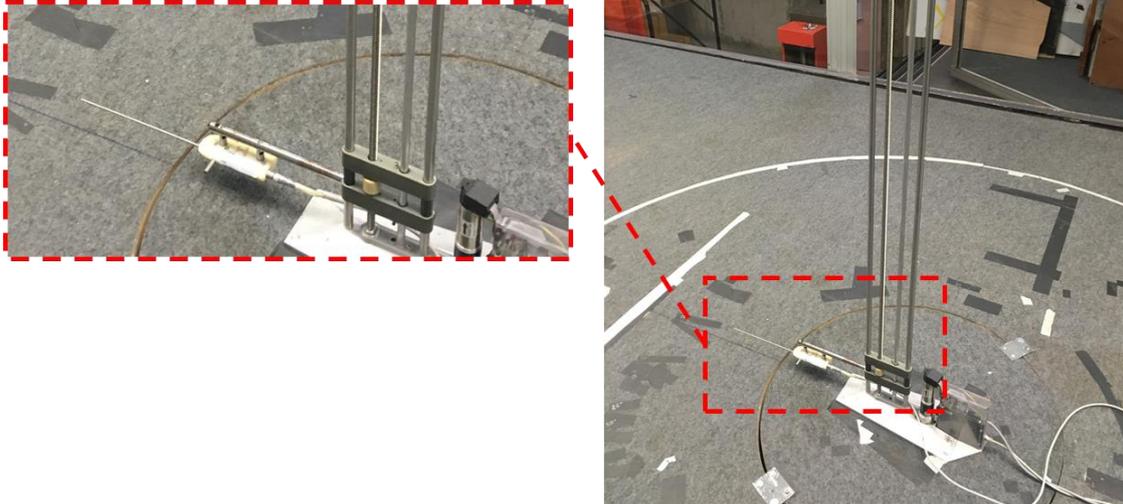


Figure 25 - Mesure du gradient de vitesse et de turbulence à l'aide d'un Pitot rapide sur un support robotisé

La Figure 26 présente la disposition de rugosités retenue pour générer le profil de vent sur la maquette.



Figure 26 – Rugosités positionnées en amont de la maquette

La Figure 27 présente le profil de pression dynamique de pointe mesuré au centre de la veine. Elle présente également l'interpolation d'un profil Eurocode rugosité IIIb. Cette interpolation permet de calculer un coefficient de passage entre la pression mesurée en soufflerie et la pression Vraie Grandeur (VG). La Figure 28 présente également les profils de vitesse moyenne et d'intensité turbulente associés. Elle compare les profils mesurés à ceux proposés par l'Eurocode pour des rugosités de type rase campagne (rugo II), où de type urbain (rugo IIIb). La comparaison confirme que le gradient ainsi généré en soufflerie correspond bien à celui d'un environnement urbain.

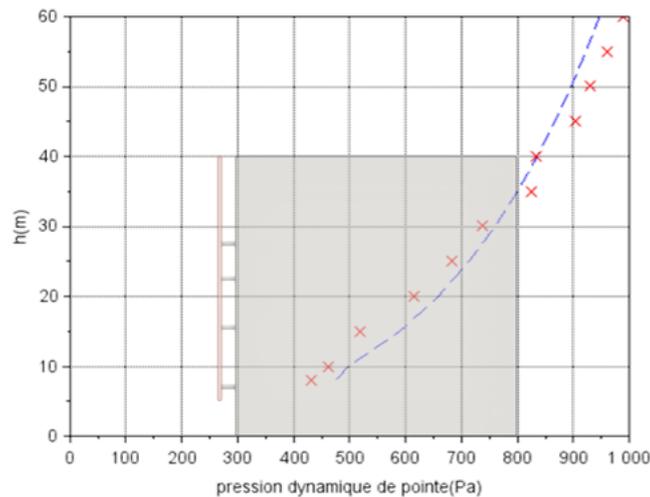


Figure 27 - Gradient de pression dynamique de pointe mesurés en soufflerie

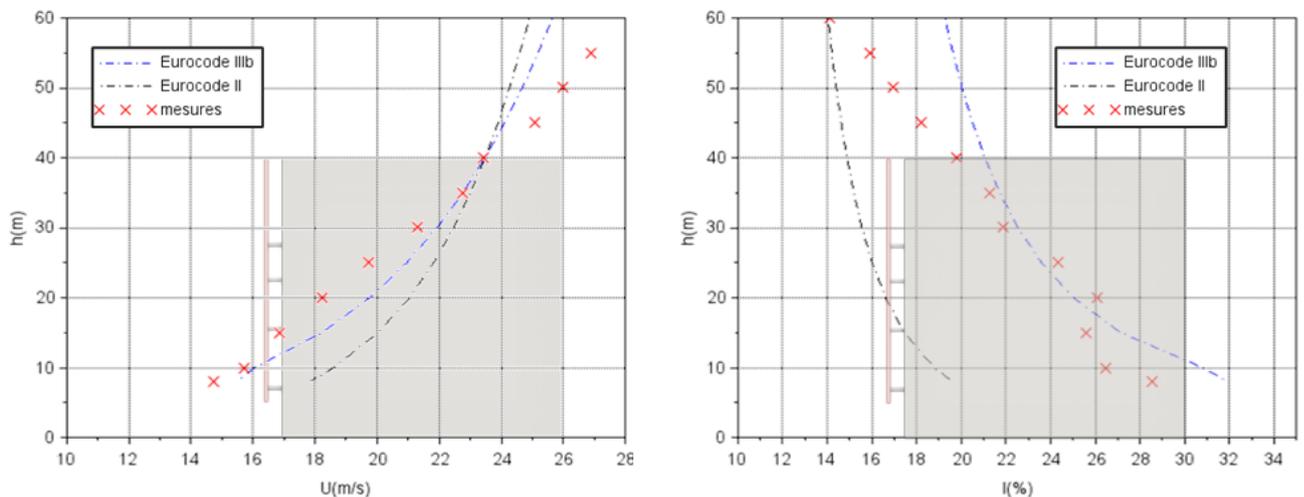


Figure 28 - Gradients de vitesse et de turbulence mesurés en soufflerie - Comparaison aux profils Eurocode rase campagne (rugo II) et urbain (rugo IIIb)

Pendant les essais, la vitesse du vent est enregistrée par un tube de Pitot, fixé au plafond au-dessus de la maquette, et dégagé des perturbations aérodynamiques générées par cette dernière. Ce tube de Pitot est également présent pendant les mesures du gradient. Ces mesures permettent alors de déduire un coefficient de recalage permettant de déduire une vitesse de référence à une hauteur de 40m à partir de la vitesse mesurée par le Pitot au plafond de la soufflerie pendant les essais. Ce coefficient de recalage est égal à 0.588 dans le cadre de ces essais.

3.4 MAQUETTE ET METROLOGIE

3.4.1 Maquette du bâtiment

La maquette du bâtiment a été réalisée à l'échelle du 1/100 dans les ateliers du CSTB. Elle est constituée de plaques de plexiglas dépolies. Elle est fixée directement au sol du plateau tournant de la veine d'essai tel que présenté Figure 29. La partie supérieure de la maquette est amovible, et un jeu d'entretoises de différentes hauteurs permet d'ajuster la hauteur du bâtiment.

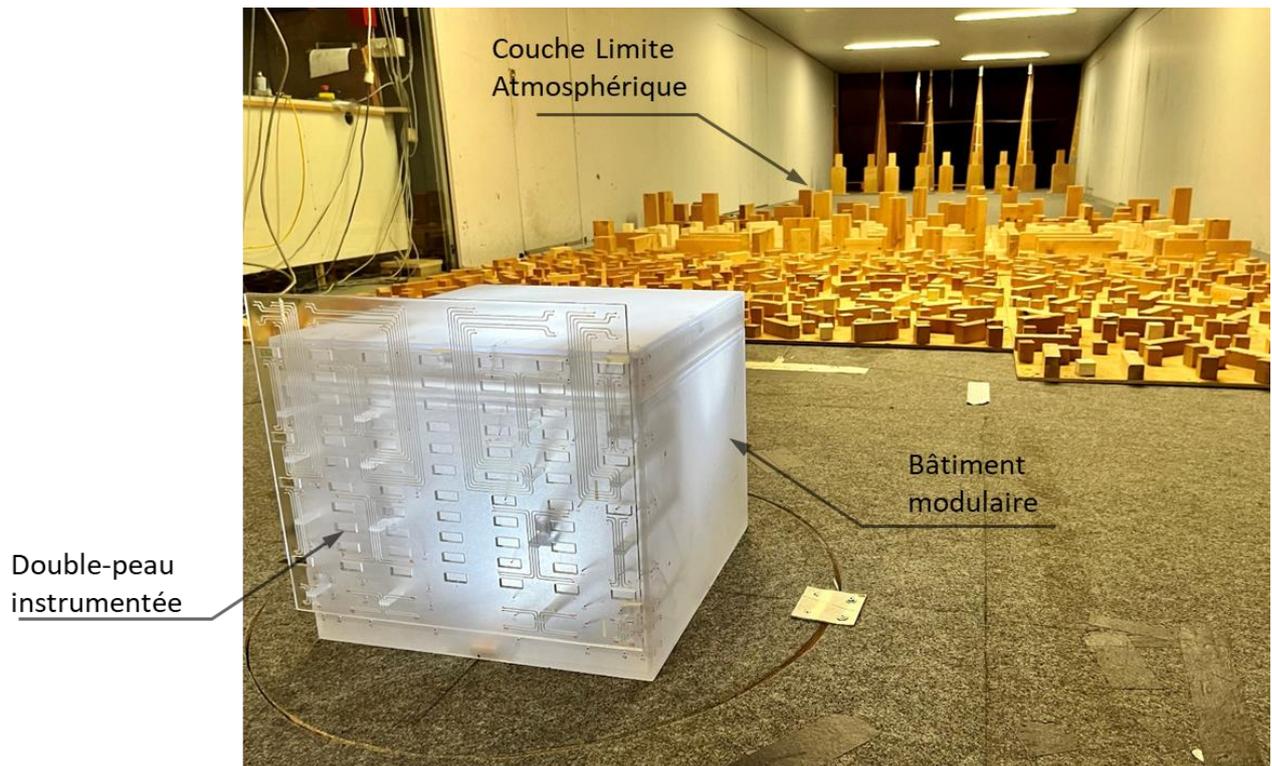


Figure 29- maquette du bâtiment et de sa façade double-peau en soufflerie

La maquette de la double peau, tout comme celles des segmentations, ont été réalisées en impression 3D dans une résine transparente via une technique d'impression par stéréolithographie. La façade double-peau est équipée de 16 tiges qui coulisent dans des alésages usinés sur la façade du bâtiment, permettant ainsi d'ajuster de manière continue l'épaisseur de la lame d'air dans la double peau.

3.4.2 Localisation des prises de pression

La maquette est équipée de 240 prises de pression qui sont réparties comme présentée Figure 30 :

- 64 prises de pression réparties sur la face externe de la façade double-peau
- 64 prises de pression réparties sur la face interne de la façade double-peau
- 112 prises de pression réparties sur la façade du bâtiment

Sur la façade double-peau, les pressions internes et externes sont localisées aux mêmes endroits de la façade, constituant ainsi 64 doublets de prises qui mesurent une différence de pression instantanée de part et d'autre de la double-peau. Des prises de pression sont également positionnées sur la façade du bâtiment, en face des prises de pression localisées

sur la façade double-peau. Elles permettront ainsi de voir s'il existe une différence de pression (moyenne et/ou instantanée) dans l'épaisseur de la lame d'air.

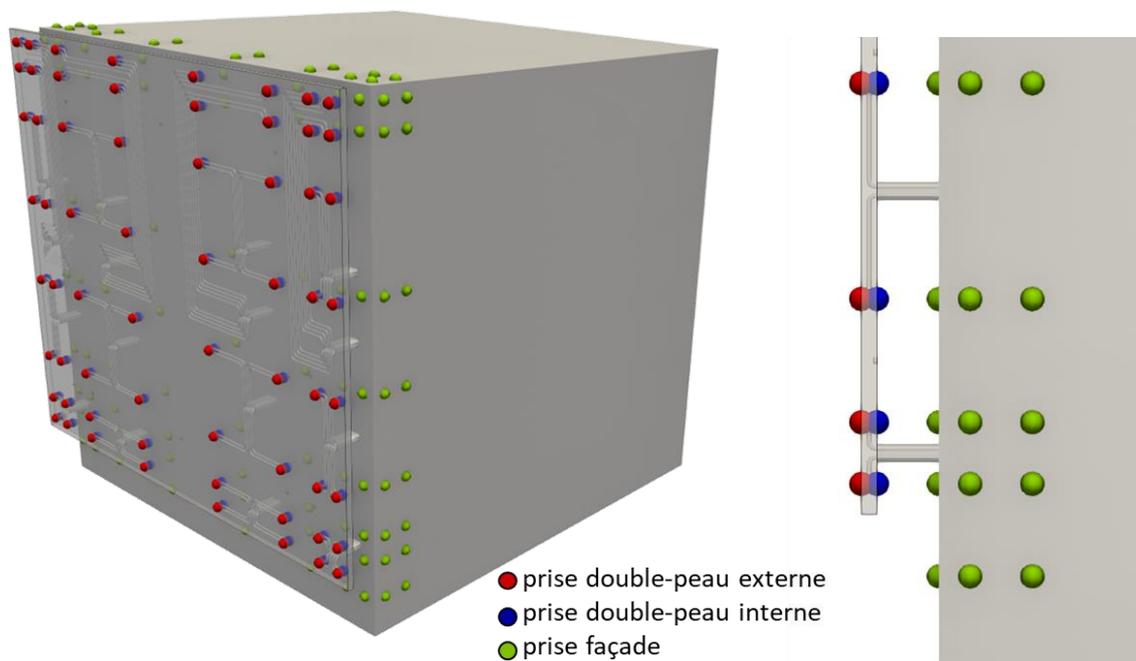


Figure 30 – répartition des prises de pression sur le bâtiment

3.4.3 Capteurs de pression et conduites pneumatiques

La pression à l'extrémité de chaque prise de pression est mesurée à l'aide de capteurs de pressions synchrones PSI (cf Figure 31). Ils permettent de mesurer de façon synchrone 32 voies de pression à une fréquence d'échantillonnage de 512Hz. 8 capteurs de 32 voies sont donc ici utilisés afin de faire l'acquisition des 240 prises de pression sur la maquette. La pression est alors transmise des prises vers les capteurs via des connexions pneumatiques constituées de tubes de vinyle de 1.5 m de long et de diamètre intérieur 1.4mm. Une fonction de déconvolution est alors utilisée afin de prendre en compte la propagation de l'onde de pression dans ces tubes, et corriger ainsi la réponse fréquentielle du signal de pression acquis par les capteurs.



Figure 31 – capteur de pression PSI 32 voies

Afin d'éviter que la présence des tubes pneumatiques reliés aux prises de pression de la façade double-peau ne perturbent l'écoulement dans la lame d'air, ils ont directement été

imprimés en 3D dans l'épaisseur de la maquette de la façade. Les 128 connexions pneumatiques sont alors acheminées à l'intérieur de la maquette du bâtiment à travers les 16 tiges de support de la façade. En sortie des tiges support, le signal de pression est alors transmis vers les capteurs de pression à l'aide de tubes vinyles normaux.

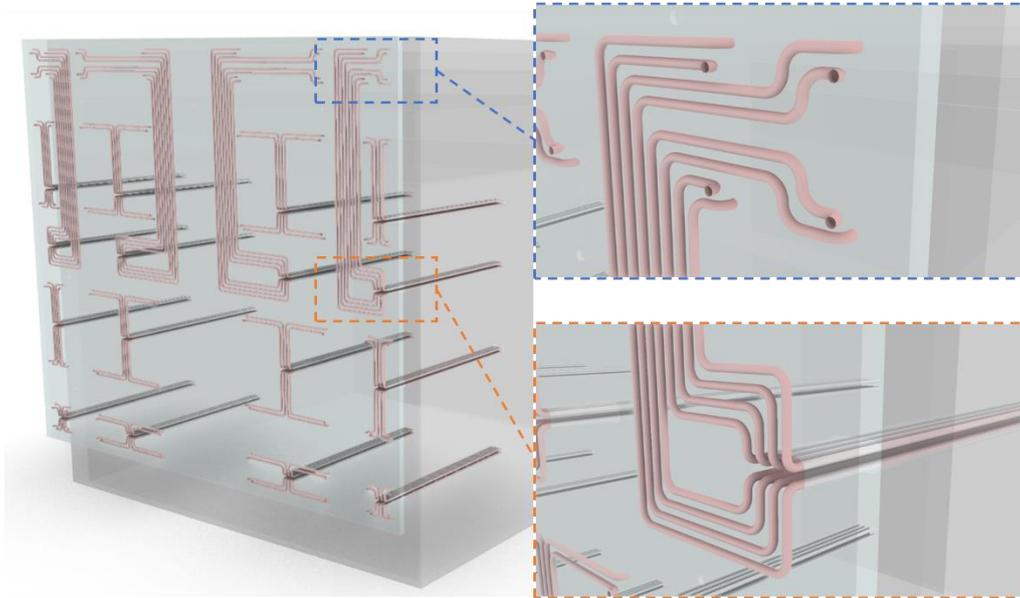


Figure 32 - CAO des connexions pneumatiques imprimées en 3D dans la maquette la façade double-peau

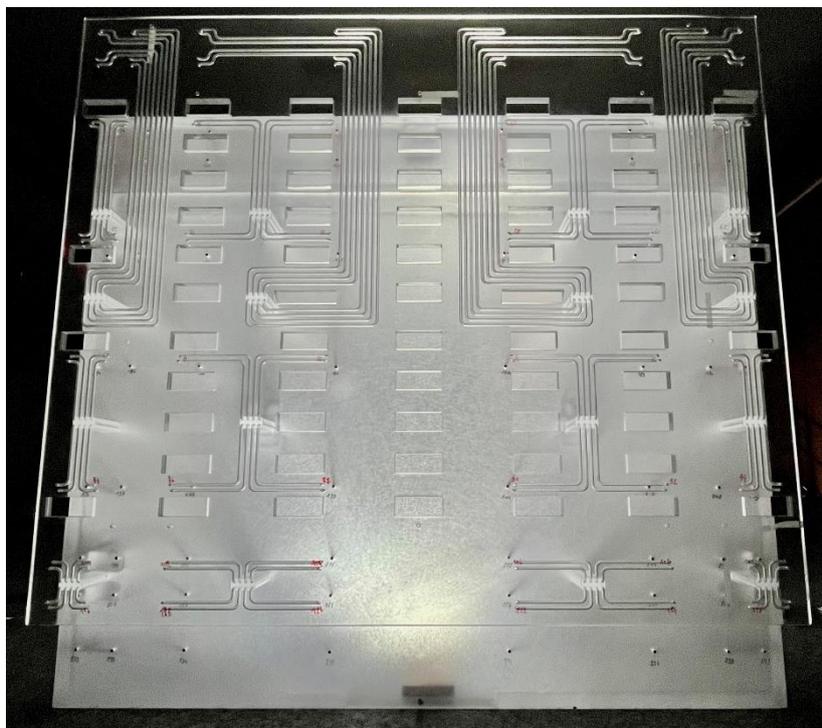


Figure 33 - photo de l'ensemble du circuit pneumatique imprimé en 3D

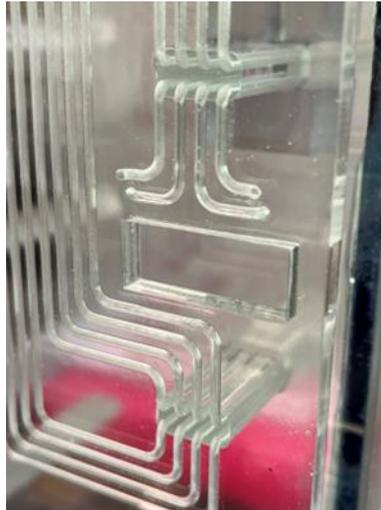


Figure 34- vu de détail du circuit pneumatique imprimé en 3D, avec les prises de pressions en façade, et l'acheminement des pressions via les tiges supports.

L'impression en 3D des connexions pneumatiques permet de limiter l'encombrement de la lame d'air, grâce à la seule présence des 16 tiges de support, sans impacter l'aérodynamique de la lame d'air par ailleurs. Si elle permet alors de garder une très bonne représentativité de l'écoulement, l'utilisation de ces connexions imprimées en 3D lignes n'est pas sans risques :

- risque que les connexions pneumatiques ne se bouchent lors de l'impression en 3D de la maquette
- risque que la succession de virages et le que le rallongement du circuit pneumatique ne perturbent la dynamique du signal de pression

La résolution des nouvelles imprimantes en 3D permet de s'assurer que les tubes de 1.5mm de diamètre ne soient pas complètement bouchés lors de l'impression de la pièce. Elles permettent également de réaliser de façon très propre des coudes à grand diamètre de courbure qui limitent les problématiques de la propagation de l'onde de pression dans le circuit pneumatique.

La Figure 35 trace les signaux temporels de deux prises de pression situées dans la lame d'air, au milieu de la façade double peau. La prise « bleue » correspond à la prise interne de la façade double-peau, avec un signal de pression transporté au travers d'une connexion pneumatique imprimée en 3D. La prise « rouge » correspond à la prise sur la façade du bâtiment, avec un signal de pression transporté par une simple connexion pneumatique traditionnelle. L'acquisition est faite pour une configuration géométrique où les deux prises de pression sont censées voir le même signal. Le tracé des signaux temporels montre qu'effectivement les deux signaux sont superposés. L'analyse spectrale effectuée sur toute la longueur de l'acquisition, ainsi que la densité de probabilité (PDF) des valeurs de pression montre également que les deux signaux sont identiques. Ceci permet alors d'entériner que la connexion pneumatique imprimée en 3D ne perturbe en rien l'acquisition du signal de pression.

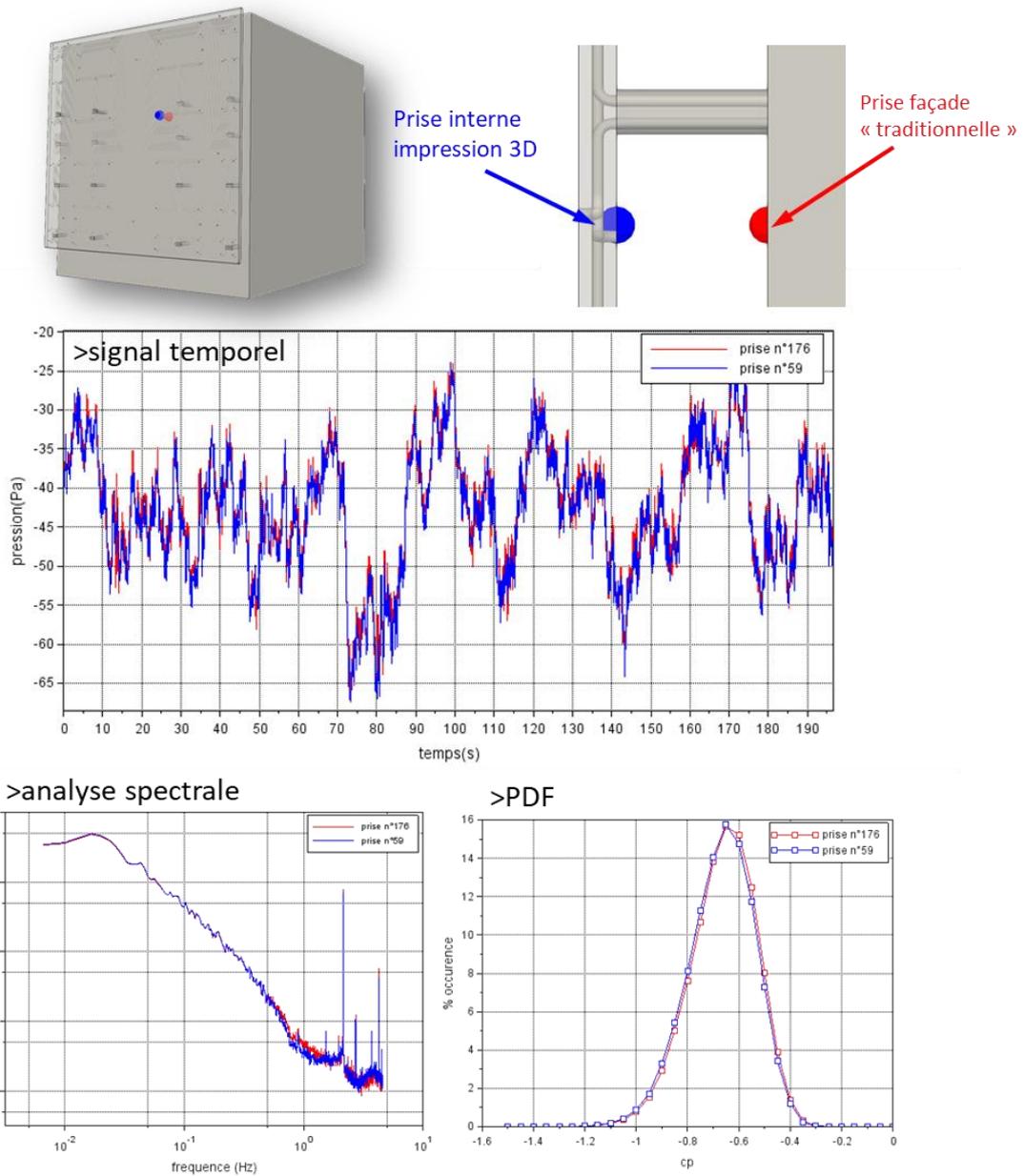


Figure 35 - comparaison des signaux de pression transportés par une connexion pneumatique imprimée en 3D et une connexion pneumatique « traditionnelle »

3.5 EXTRAPOLATION VRAIE GRANDEUR ET MESURE DES EFFORTS DE POINTE

La mesure de la pression sur la façade est réalisée à une fréquence de 512Hz pendant une durée de 5mn échelle soufflerie. Afin de transposer la dynamique de l'écoulement de l'échelle maquette à l'échelle réelle, il est nécessaire de définir une échelle géométrique et une échelle de vitesse. Ces deux échelles permettront alors de définir également une échelle de temps.

L'échelle géométrique est définie par l'échelle de la maquette :

$$S_{geo} = \frac{h_{VG}}{h_{maquette}} = 100$$

L'échelle de vitesse est le ratio entre la vitesse du vent à la hauteur de référence (ici 40m) mesurée en soufflerie et celle prescrite par l'Eurocode :

$$S_{vitesse} = \frac{U_{VG,z=40m}}{U_{maquette,z=40m}}$$

Dans le cadre de ces essais, l'objectif est d'arriver à une vitesse de 10m/s au sommet du bâtiment.

Les échelles géométriques et de vitesse sont donc imposées par les paramètres de la simulation en soufflerie. Elles permettent alors de déduire une échelle de temps :

$$S_{temps} = \frac{t_{VG}}{t_{maquette}} = \frac{S_{geo}}{S_{vitesse}}$$

Le Tableau 4 synthétise les différents facteurs d'échelles pour une vitesse de vent de 10m/s au sommet du bâtiment :

échelle maquette		100
vitesse de vent à 40m	maquette (m/s)	10.0
	VG (m/s)	23.5
échelle vitesse		2.4
échelle de temps		43
Temps d'acquisition	maquette (mn)	5
	VG (mn)	213
fréquence d'acquisition	maquette (Hz)	512
	VG (Hz)	12.0

Tableau 4 – Facteurs d'échelles et extrapolation des grandeurs caractéristiques à la Vraie Grandeur pour la maquette

Le tableau montre que la durée d'acquisition Vraie Grandeur est de 3h30. On cherche généralement à reproduire une tempête de plus de 2h pour s'assurer de la convergence statistique des valeurs de pointe. De plus, on constate que la fréquence d'acquisition est supérieure à 10Hz, ce qui permet de bien discrétiser les événements de rafales que l'on cherche à mesurer, et qui ont une durée caractéristique de 3s en échelle Vraie Grandeur.

La Figure 36 présente le signal temporel, extrapolé en Vraie Grandeur, de la pression mesurée sur la face externe de la double-peau pendant un essai. Le tracé temporel montre alors de très fortes fluctuations de la valeur de la pression, avec des pointes 2.5 fois plus élevées que la valeur moyenne. Afin d'avoir une valeur représentative de ces pointes, le signal est découpé en blocs de 10mn Vraie Grandeur, durée généralement utilisée en climatologie pour établir la vitesse de vent moyen. Les valeurs maximale et minimale de la pression sont alors relevées dans chaque bloc. La valeur de pointe retenue est alors prise égale à la moyenne des pointes relevées dans chaque bloc de 10 min.

En termes de notation, on distinguera alors la pression moyenne notée \bar{p} de la pression de pointe notée \hat{p}

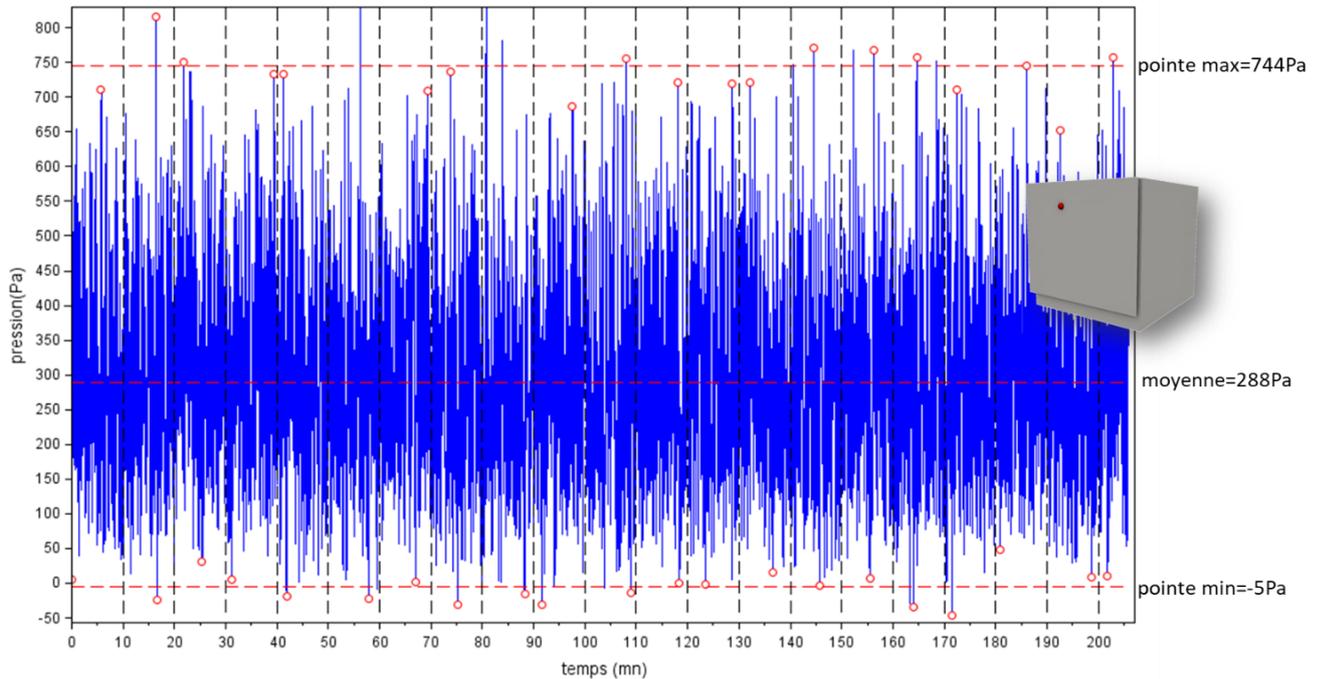


Figure 36 - Signal de pression, transposé en Vrai Grandeur, mesuré au centre de la façade double peau, face externe

3.6 COEFFICIENT DE PRESSION MOYENS ET DE POINTES

La pression sur les façades va varier selon la structuration de l'écoulement à l'échelle du bâtiment, ainsi que de la pression dynamique de référence du vent en amont du bâtiment. On constate généralement, qu'en un endroit donné de la façade, la pression varie linéairement avec la pression dynamique amont. On peut alors écrire la pression en cet endroit sous la forme :

$$p = c_p \cdot p_{dyn}$$

c_p est alors appelé coefficient de pression. Ce coefficient ne dépend généralement pas de la pression dynamique amont, mais seulement de la forme du bâtiment et de la façon dont l'écoulement va se structurer autour. Cela se relève être très pratique, car on peut alors extrapoler la pression sur la façade pour diverses vitesses de vent.

Sauf mention contraire, les coefficients de pression dans cette étude seront exprimés à partir de la pression dynamique de référence $p_{dyn_{ref}}$ évaluée à la hauteur de référence $h_{ref} = 40m$.

On distinguera le coefficient de pression moyen $\bar{c}_p = \frac{\bar{p}}{\bar{p}_{dyn_{ref}}}$ et le coefficient de pression de pointe $\hat{c}_p = \frac{\hat{p}}{\hat{p}_{dyn_{ref}}}$. Dans le cadre des essais la pression dynamique moyenne $\bar{p}_{dyn_{ref}}$ est mesurée via le tube de Pitot au plafond de la soufflerie, et le coefficient de recalage obtenu par la mesure du gradient de vitesse (cf §3.3.2). Ce tube de Pitot ne pouvant mesurer les fluctuations de vitesse à la hauteur de référence, la pression dynamique de pointe de référence est obtenue à partir de l'extrapolation proposée de l'Eurocode

$$\widehat{p}_{dyn_{ref}} = (1 + 7I(h_{ref})) \cdot \bar{p}_{dyn_{ref}}$$

Les mesures de gradient du §3.3.2 ont montré que cette approximation était tout à fait justifiée.

L'Eurocode [8] ne fait pas de différence entre la valeur moyenne et la valeur de pointe du coefficient de pression, ce qui sous-entend que $\bar{c}_p = \hat{c}_p$. Ceci est généralement constaté sur des géométries simples, quand les pressions de pointes sur le bâtiment sont uniquement dues

aux fluctuations de la turbulence à grande échelle de la Couche Limite Atmosphérique. Ce n'est plus forcément le cas pour des géométries plus complexes, où l'interaction de la turbulence à grande échelle et de la turbulence à l'échelle du bâtiment peut créer une dynamique différente.

Dans le cas de la façade double-peau, on s'intéressera également aux différentiels de pression instantanés entre la pression exercée sur la face externe de la peau p_{ext} et la face interne p_{int} . Ce différentiel est noté $p_{net} = p_{ext} - p_{int}$

On déterminera également un coefficient de pression associée $c_{p_{net}}$, ainsi qu'une valeur moyenne $\overline{c_{p_{net}}}$ et de pointe de ce coefficient $\widehat{c_{p_{net}}}$

Si en moyenne $\overline{c_{p_{net}}} = \overline{c_{p_{ext}}} - \overline{c_{p_{int}}}$, du fait de la différence de dynamique de part et d'autre de la peau $\widehat{c_{p_{net}}} \neq \widehat{c_{p_{ext}}} - \widehat{c_{p_{int}}}$: le différentiel moyen est égal au différentiel des moyennes, mais le différentiel de pointe n'est pas forcément égal au différentiel des pointes.

3.7 SIMILITUDE ET DEPENDANCE AU NOMBRE DE REYNOLDS

L'utilisation du coefficient de pression permet une extrapolation des efforts sur la façade à la Vrai Grandeur, et pour plusieurs pressions dynamiques de référence différentes. Cette extrapolation repose sur l'hypothèse que le coefficient est lui-même indépendant des effets d'échelle, ainsi que de la pression dynamique de référence.

Ceci est vrai si l'écoulement respecte les règles dites de similitude. L'écoulement est considéré similaire si le nombre de Reynolds $Re = \frac{UD}{\nu}$ est conservé, avec ν la viscosité cinématique de l'air et D une dimension caractéristique de l'écoulement. Afin d'obtenir une similitude d'écoulement, la réduction d'échelle au 1/100 demanderait donc de souffler 100 fois plus vite sur la maquette, ce qui s'avère en pratique impossible.

Cependant il s'avère qu'à partir d'un certain nombre de Reynolds, les coefficients de pression deviennent indépendants de celui-ci, ouvrant alors la porte à leur utilisation pour l'extrapolation à la Vrai Grandeur et pour toutes les vitesses.

Ceci est particulièrement vrai pour des géométries à arêtes vives, qui fixent la position des décollements pilotant la structure de l'écoulement. Les problématiques de similitude concernent en effet généralement des surfaces arrondies où la position des décollements va varier en fonction du nombre de Reynolds.

Afin de s'assurer de l'indépendance du coefficient de pression au nombre de Reynolds, une mesure a été effectuée pour plusieurs vitesses de vent différentes. La configuration retenue est celle d'un bâtiment haut et sans recouvrements. La question de la structuration du champ de pression sur la façade sera étudiée §4.2.3. La Figure 37 trace le coefficient de pression net moyen et de pointe. Elle montre que dans les deux cas, les résultats sont identiques pour les 3 vitesses d'écoulement étudiées, démontrant ainsi une indépendance du coefficient de pression au nombre de Reynolds. De plus, la figure montre que bien que le coefficient de pression moyen et de pointe soient différent entre les deux configurations géométriques, le ratio entre les deux semble conservé pour les 3 vitesses d'écoulements. La dynamique de l'écoulement est donc également semblable pour les 3 vitesses investiguées.

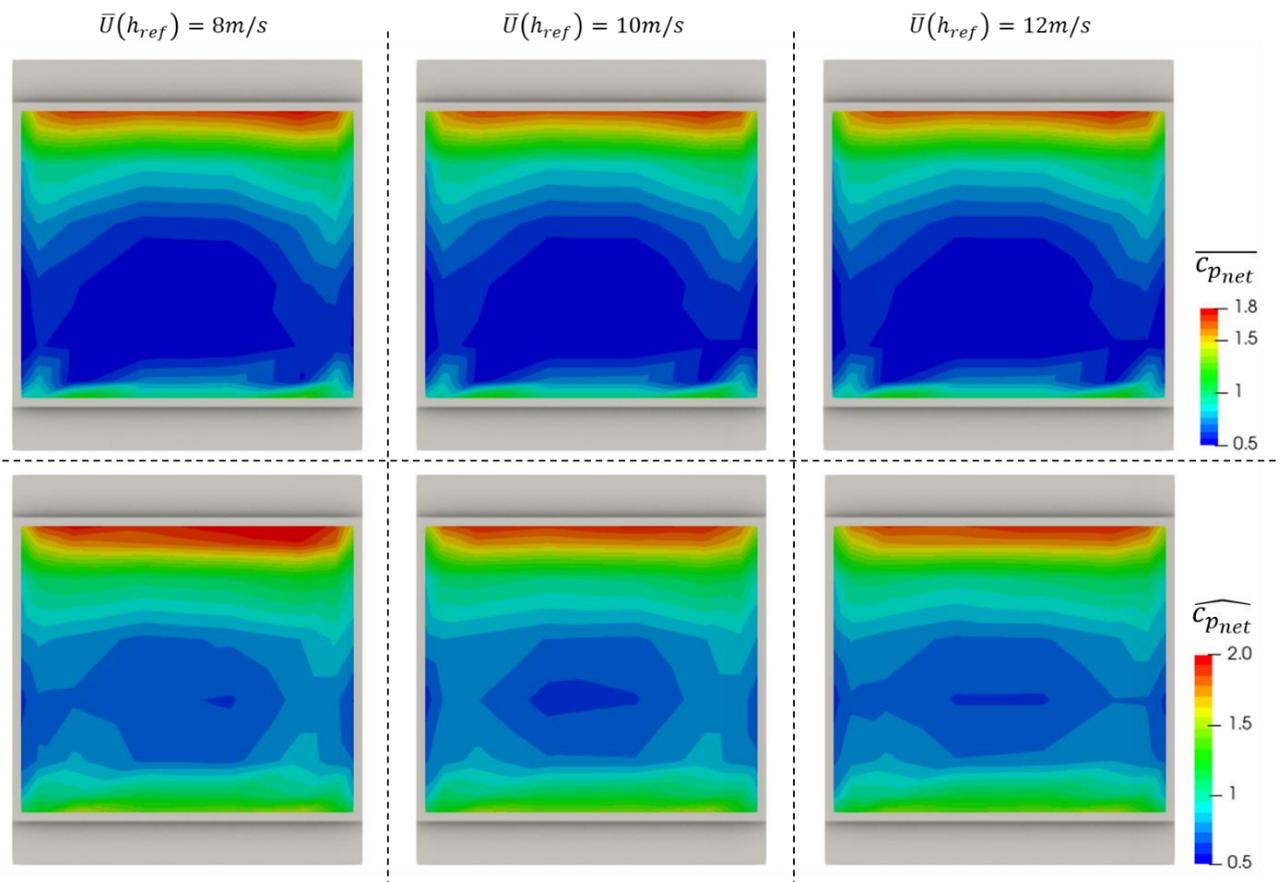


Figure 37 - coefficient de pression net, moyen et de pointe, sur la façade double-peau en fonction de la vitesse de l'écoulement

Ceci permet alors de garantir l'utilisation des coefficients de pression pour extrapoler des charges à la Vraie Grandeur, et pour différentes vitesses d'écoulement.

4 CHARGES AU VENT SUR LA FAÇADE DOUBLE-PEAU

Cette partie décrit à présent l'évolution des charges vent sur la double-peau en fonction des différentes modularités géométriques investiguées. Chacun de ces paramètres s'est avéré avoir une influence non négligeable sur le chargement de la façade. Il est alors assez difficile de choisir dans quel ordre l'analyse de chacun de ces paramètres doit être présentée. Dans un but pédagogique, il a été choisi de présenter les configurations dans un ordre de complexification de la structure de l'écoulement dans la lame, permettant ainsi de s'approprier les différents mécanismes à l'œuvre dans l'équilibrage en pression de la lame d'air.

4.1 PEAU SEGMENTEE VERTICALEMENT

L'analyse porte dans un premier temps sur une configuration de la façade double-peau avec des recouvrements verticaux. Dans cette configuration, la façade double-peau est ouverte sur deux pans, avec une ouverture en pied de façade, et une ouverture en haut de la façade. La lame d'air peut alors être assimilée à un canal plan pour lequel chaque extrémité du canal est soumise à une pression différente, imposée par la structure de l'écoulement contournant le bâtiment.

4.1.1 Cas de référence

Dans un premier temps, l'analyse porte sur une configuration du bâtiment avec un niveau standard de 40m de haut. L'extrémité supérieure de la façade double-peau est alors au niveau de la rive de toiture. La Figure 39 trace les coefficients de pression moyens mesurés sur la face externe $\overline{c_{p_{ext}}}$, interne $\overline{c_{p_{int}}}$ ainsi que le différentiel de pression moyen noté $\overline{c_{p_{net}}}$.

Sur la face extérieure, le coefficient de pression $\overline{c_{p_{ext}}}$ est positif et évolue d'une valeur quasi nulle dans les coins inférieurs, à une valeur de 0.8 au centre de la façade. Il reste supérieur à 0.5 sur une grande partie de la façade. La figure met bien en évidence l'augmentation de la pression avec l'altitude du fait du gradient de vent amont. Le chargement en pression de cette façade est tout à fait conforme à ce que l'on pourrait s'attendre sur ce genre de géométrie.

A l'intérieur de la lame d'air le coefficient de pression $\overline{c_{p_{int}}}$ est négatif. On distingue alors clairement la zone délimitée par la segmentation verticale. Entre les deux segmentations, la pression est quasiment uniforme dans la lame d'air, avec un coefficient de pression de -0.5. En pied de façade la pression évolue rapidement jusqu'à une valeur de -1.4. A l'extérieur de la segmentation, les dépressions sont plus élevées qu'à l'intérieur de la lame d'air et culminent à -1.

La cartographie du différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ combine alors les caractéristiques des deux cartographies précédentes. Le coefficient est positif sur la totalité de la façade. La combinaison d'une pression positive sur la face externe, avec une pression négative sur la face interne, résulte donc en un effort de compression poussant la façade double-peau vers la façade du bâtiment. On constate à nouveau une nette séparation induite par la présence des segmentations. On ne s'intéressera dans un premier temps qu'à la partie interne encadrée par les deux segmentations, la partie externe se comportant alors comme un acrotère. Le coefficient de pression $\overline{c_{p_{net}}}$ culmine à 1.3 sur la partie supérieure de la façade et diminue avec l'altitude jusqu'à une valeur de 0.9. Il remonte rapidement en pied de façade jusqu'à une valeur de 1.4.

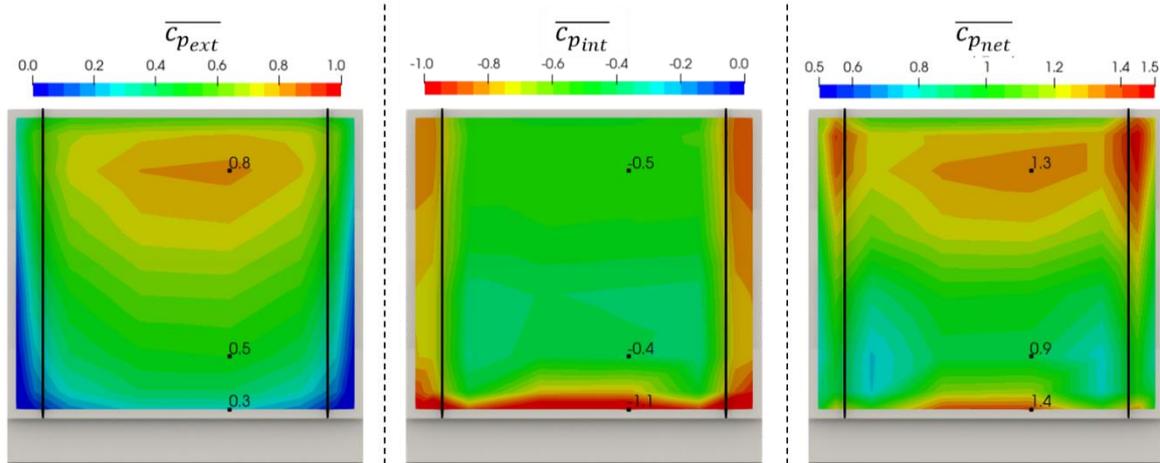


Figure 38 Carte de coefficient de pression sur la face double-peau, externe, interne, et différentiel (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

La Figure 39 trace l'écoulement autour de la façade obtenu à partir d'une simulation numérique CFD. On y voit l'écoulement arriver sur la façade, et créer un point d'arrêt à l'endroit même où la pression est maximale sur la face externe de la double-peau. L'écoulement contourne ensuite la façade par les côtés et par le dessus du bâtiment. L'écoulement pénètre dans la lame d'air par l'ouverture en pied de façade, et en ressort par l'ouverture en rive de toiture. La figure consigne également les coefficients de pression mesurés sur la façade du bâtiment, en pied de façade et en rive de toiture. La pression à l'ouverture en pied de façade est donc positive, alors que la pression à l'ouverture en haut de la façade est négative. Il est donc logique d'observer un écoulement dans la lame se propageant de la pression positive vers la pression négative.

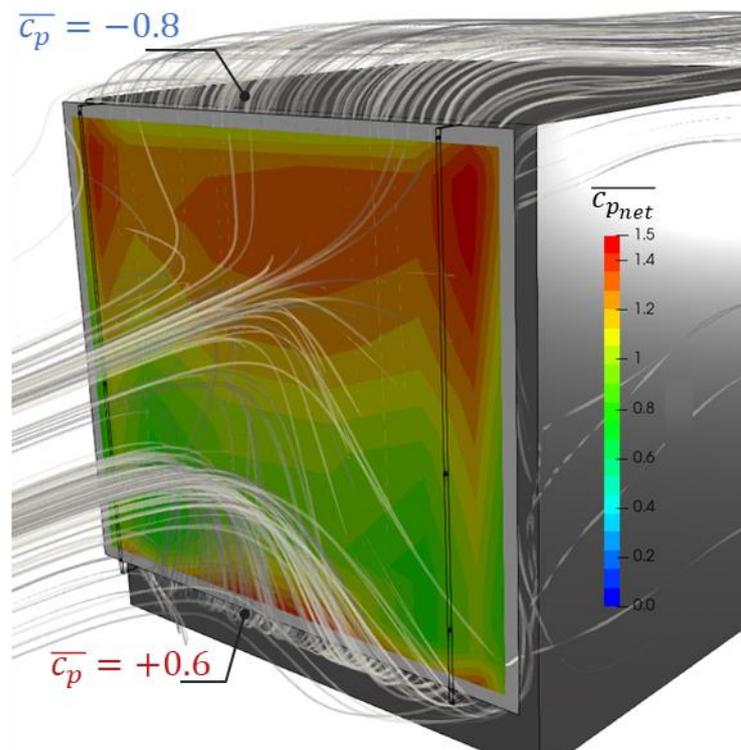


Figure 39 structure de l'écoulement autour de la double-peau issu d'une simulation numérique et cartographie des charges différentielles $\overline{c_{p_{net}}}$ mesurée en soufflerie (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

La Figure 41 trace un profil vertical du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau (notée DSF), interne $\overline{c_{p_{int}}}$, externe $\overline{c_{p_{ext}}}$ et net $\overline{c_{p_{net}}}$, ainsi que la pression sur la façade du bâtiment (notée BF). La figure permet de constater dans un premier temps que la pression moyenne mesurée sur la façade du bâtiment est identique à celle mesurée sur la face interne de la façade double-peau, excepté pour le point de mesure en pied de façade. En dehors de ce point, la pression statique semble donc homogène sur toute l'épaisseur de la lame d'air. La figure montre que le profil de pression à l'intérieur de la lame d'air $\overline{c_{p_{int}}}$ s'équilibre à une valeur uniforme sur toute la partie supérieure de la façade et égale à -0.5. Cette valeur s'intercale entre les valeurs de la pression mesurées aux bornes de la lame d'air (+0.6 en bas et -0.8 en haut), mais semble quand même plus proche de celle mesurée en haut de la façade. Les tentatives de modélisation par approches nodales qui seront présentées §5 montreront que la valeur de cette pression peut être obtenue assez simplement en considérant les pressions aux bornes de la lame, les coefficients de perte de charge à l'entrée et à la sortie du canal ainsi que la pression dynamique induite par l'écoulement dans la lame d'air.

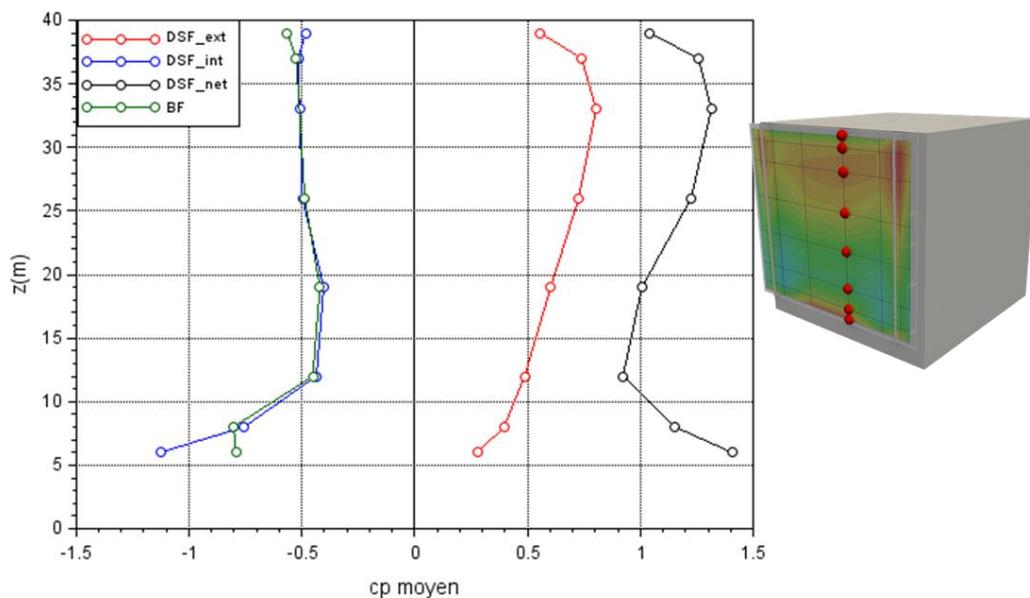


Figure 40 – profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau (DSF) interne, externe et net, ainsi que sur la façade du bâtiment (BF) (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

La figure montre à nouveau une augmentation significative de la dépression en pied de la lame d'air. Pour comprendre ce phénomène, la Figure 41 présente des coupes du champ de pression et du champ de vitesse obtenues par simulation numérique CFD. Elle met en évidence l'engoncement de l'écoulement à l'intérieur de la lame d'air. A l'entrée de la lame d'air, du fait du virage opéré par l'écoulement, la vitesse n'est plus uniforme dans l'épaisseur de la lame, et il se crée alors une survitesse qui va entraîner une baisse de la pression statique. La figure montre également que cette baisse de pression est plus élevée du côté de la façade double-peau que du côté de la façade du bâtiment (effet du décollement à l'intérieur du virage). Les observations issues des simulations numériques et des mesures en souffleries semblent donc cohérentes entre elles. L'évolution soudaine de la pression dans la lame d'air en pied de façade semble donc induite par l'aérodynamique locale de l'engoncement de l'écoulement dans la lame d'air. Cet effet peut également être constaté sur les mesures de Marques Da Siva & Gomes [3] ou les simulations de Vaglio [1].

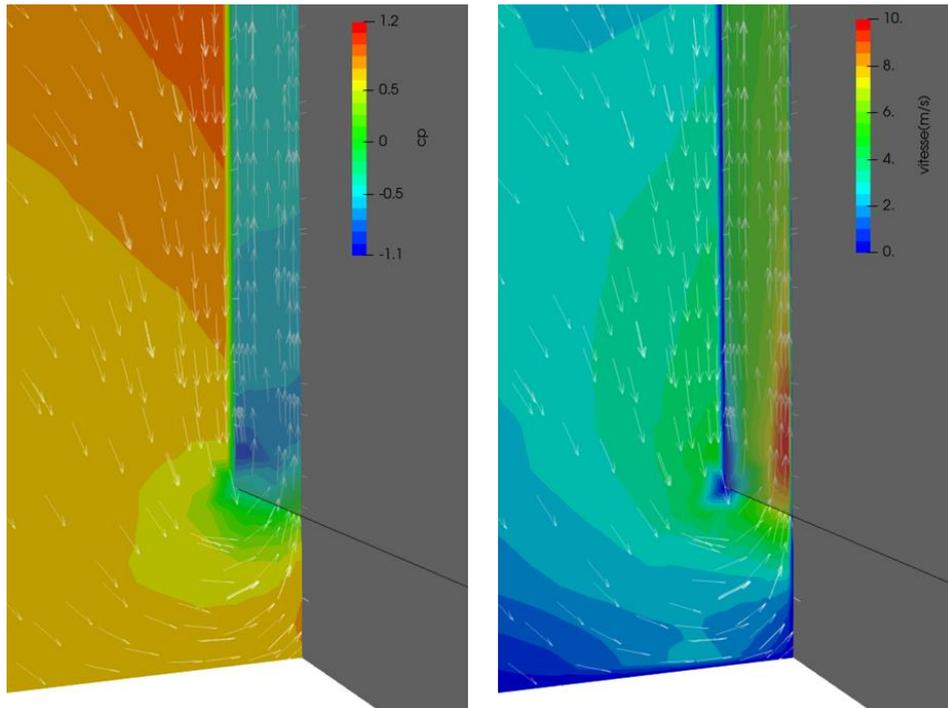


Figure 41 – coupe du champ de pression (gauche) et de vitesse (droite) à l'entrée basse de la lame d'air issu d'une simulation numérique (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

La Figure 40 montre que l'évolution du différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ est piloté par la pression externe $\overline{c_{p_{ext}}}$ sur la partie supérieure de la façade (la pression interne étant constante), et par la pression interne $\overline{c_{p_{int}}}$ sur la partie inférieure de la façade (la pression interne évoluant plus vite que la pression externe).

La Figure 42 reprend le tracé du profil vertical des coefficients de pression de la Figure 40, mais en rajoutant les valeurs des coefficients de pression de pointe, minimums et maximums. La Figure 43 trace la PDF du signal de pression mesuré en 3 points du profil, afin d'analyser plus finement la du signal.

Les profils montre alors que les coefficients de pression de pointe sont sensiblement égaux aux coefficients de pression moyens, indiquant ainsi que les pointes sont globalement corrélées aux fluctuations de la turbulence à grande échelle en amont du bâtiment.

Sur la face externe, les coefficients de pression de pointe $\widehat{c_{p_{ext}}}$ sont légèrement supérieurs aux coefficients de pression moyens $\overline{c_{p_{ext}}}$. Les PDF associées montrent une dynamique assez similaire sur les 3 points de mesure, avec une distribution proche de celle d'une distribution de Gumbel.

Pour la pression interne, les coefficients de pression de pointe $\widehat{c_{p_{int}}}$ sont très proches des coefficients de pression moyen $\overline{c_{p_{int}}}$ sur la partie supérieure de la façade. En pied de façade, les pressions de pointe sont en valeur absolue plus élevées que les pressions moyennes. La valeur de la pression de pointe sur la façade du bâtiment est à présent beaucoup plus proche de celle de la façade interne de la double-peau. Il y a donc un « brassage » par la turbulence de l'inhomogénéité de pression dans l'épaisseur de la lame d'air. Les PDFs montrent une dynamique beaucoup plus élevée en pied de façade que sur la partie centrale de la façade double-peau. Ainsi au centre de la façade double-peau, la dynamique de l'écoulement semble directement liée à la turbulence à grande échelle, alors qu'en pied de façade la dynamique plus élevée semble également s'expliquer par de la turbulence générée localement par l'engoncement de l'écoulement dans la lame d'air.

La valeur du différentiel de pression de pointe $\widehat{c_{p_{net}}}$ est légèrement inférieure à la valeur moyenne $\overline{c_{p_{net}}}$ sur la partie supérieure de la façade. Ceci peut s'expliquer par une désynchronisation des pointes générées par la turbulence à grande échelle à l'intérieur et à l'extérieur de la lame. La Figure 44 présente les signaux temporels de pression à l'intérieur et à l'extérieur de la lame d'air en un point pris au centre de la façade. Elle montre que si les fluctuations de pression de part et d'autre de la façade sont globalement corrélées entre elles, il se peut que les pics n'interviennent pas exactement au même moment. Cette décorrélation des pointes n'est pas due au temps de propagation de l'information de pression dans la lame d'air, mais au fait que les pressions aux bornes de la lame d'air ne sont pas tout à fait synchrones entre elles. Par conséquent l'équilibrage en pression qui en résulte ne sera pas non plus complètement synchrone avec la pression exercée sur la face extérieure.

La valeur du différentiel de pression de pointe est en revanche plus élevée que la valeur moyenne en pied de façade. Ceci s'explique par l'engoncement de l'écoulement dans la lame d'air qui génère une dynamique et des valeurs de pointes plus élevées.

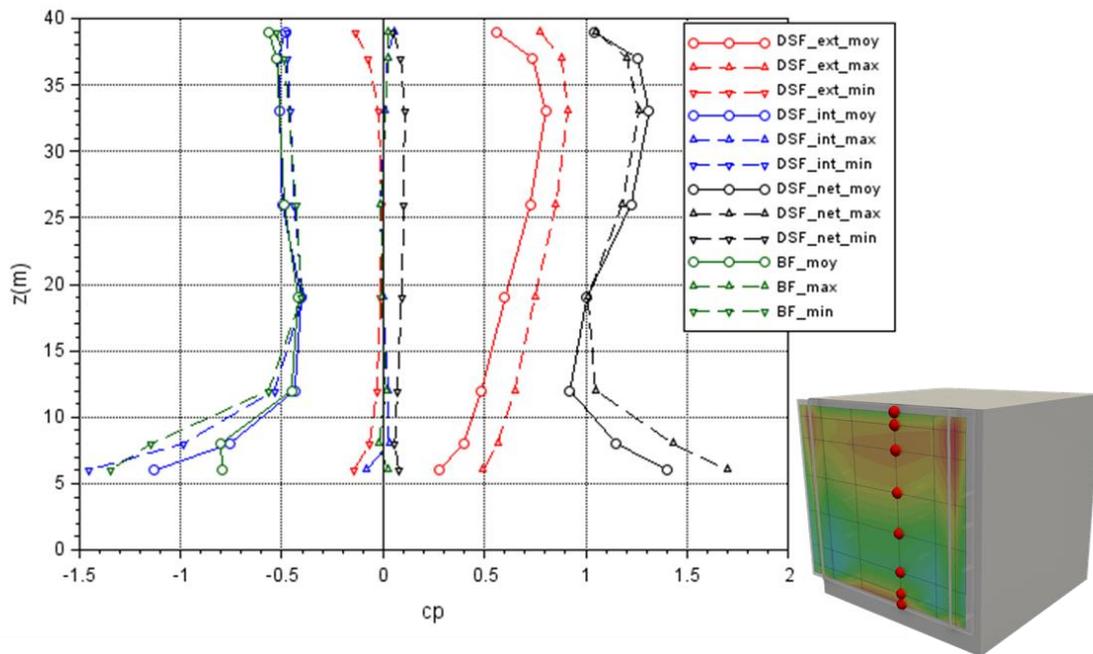


Figure 42 profil du coefficient de pression moyen et de pointe sur la façade double peau (DSF) interne, externe et net, ainsi que sur la façade du bâtiment (BF) (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

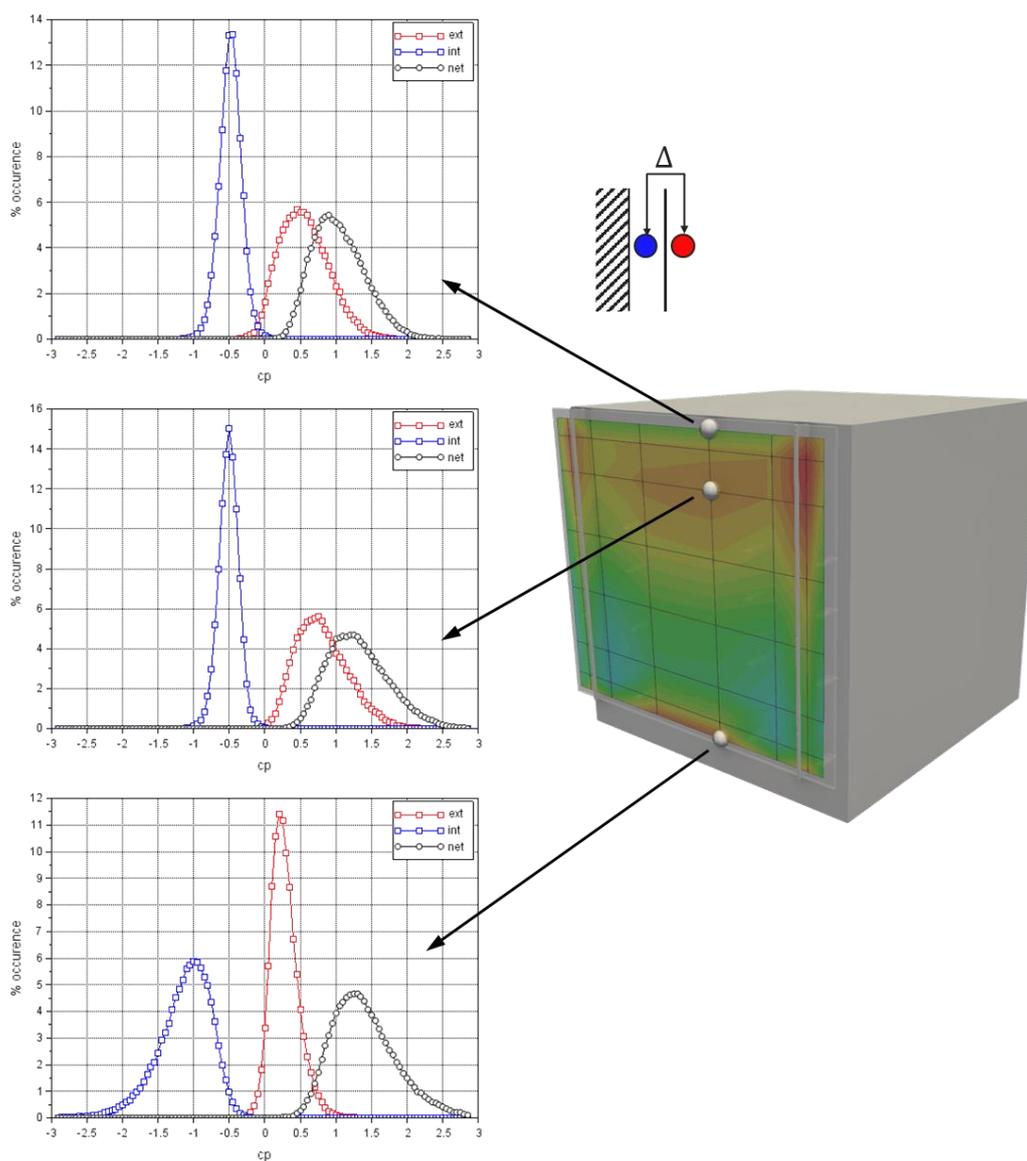


Figure 43 - PDF du coefficient de pression, intérieur, extérieur et net, en trois point de la façade double-peau (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

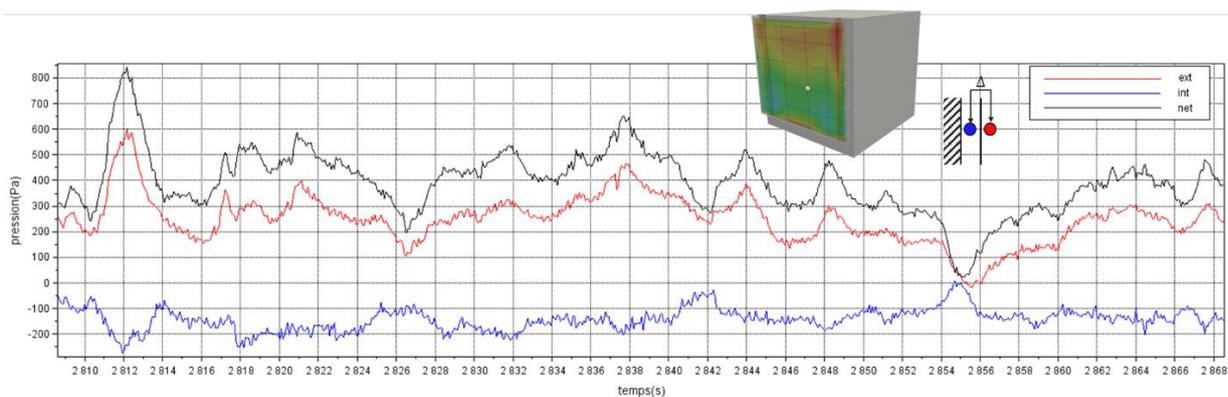


Figure 44 - extrait des signaux temporels de pression, intérieur, extérieur et net, en un point de la façade double-peau (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

En résumé, pour cette première configuration étudiée, l'analyse montre que la pression dans la lame d'air est principalement pilotée par un équilibrage de la pression aux bornes de la façade double-peau, résultant ici en une pression négative, homogène dans l'épaisseur et sur la plus grande partie de la façade. Elle permet donc de retrouver cette configuration, assez contre-intuitive et décrite dans la littérature, d'une lame mise en dépression par un « effet cheminée » alors que la façade du bâtiment est face au vent.

La face externe de la double-peau est alors en compression, pendant que la face interne est simultanément en dépression. Les contributions s'ajoutent, et le différentiel net conduit alors à une compression plus élevée que celle qui serait appliquée sur une simple façade.

La différence de pression aux bornes de la double-peau génère aussi un écoulement dans la lame d'air, qui par un effet de surverse à l'engoncement, génère une dépression encore plus élevée, qui conduit à un effort significativement plus élevé en pied de façade.

4.1.2 Effet de la hauteur du bâtiment

On se propose à présent d'étudier l'influence d'un premier paramètre géométrique, qui est ici la hauteur du bâtiment. Elle est augmentée de 5m échelle Vraie Grandeur. L'extrémité supérieure de la double-peau s'arrête ainsi à présent en-dessous de la rive de la toiture. La Figure 45 trace les coefficients de pression moyens mesurés sur la face externe $\overline{c_{p_{ext}}}$, interne $\overline{c_{p_{int}}}$ ainsi que le différentiel de pression moyen noté $\overline{c_{p_{net}}}$.

Sur la face extérieure, la cartographie du coefficient de pression $\overline{c_{p_{ext}}}$ est très similaire à celle obtenue avec la configuration géométrique précédente. Le coefficient de pression au point d'arrêt est légèrement plus élevé. Le bâtiment étant plus haut, le gradient de vent amont va en effet induire une pression dynamique plus élevée sur la face au vent. En gardant une pression dynamique de référence à 40m de haut pour établir le coefficient de pression, il est donc normal de retrouver un coefficient de pression légèrement plus élevé avec un bâtiment de 45m.

Sur la face intérieure, la cartographie du coefficient de pression $c_{p_{int}}$ est en revanche complètement différente de celle observée dans la configuration précédente. Entre les deux segmentations, le champ de pression est homogène sur quasiment toute la façade et s'équilibre à une pression à présent positive. Le comportement est donc inverse à celui observé dans la configuration géométrique précédente. La Figure 46 trace la structuration de l'écoulement autour de la façade double-peau dans cette configuration, et consigne les coefficients de pression mesurés sur la façade du bâtiment, aux bornes de la lame d'air. Contrairement au cas précédent, l'extrémité supérieure de la lame d'air est à présent en surpression. Le coefficient de pression est légèrement supérieur à celui mesuré en pied de façade. On peut donc s'attendre à ce qu'un écoulement s'établisse dans la lame d'air, mais cette fois du haut vers le bas. Compte-tenu de la différence de pression plus faible aux bornes de la lame d'air, le débit de cet écoulement sera également plus faible que dans la configuration précédente.

La cartographie du différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ est également très différente de la configuration géométrique précédente. Cette fois le coefficient de pression net moyen, bien que restant positif, est beaucoup plus faible, et s'annule même au milieu de la façade. La pression s'équilibre donc en moyenne de part et d'autre de la façade, conduisant à une charge moyenne nulle, ce qui pourrait sembler de prime abord assez contre-intuitif pour une façade positionnée face au vent

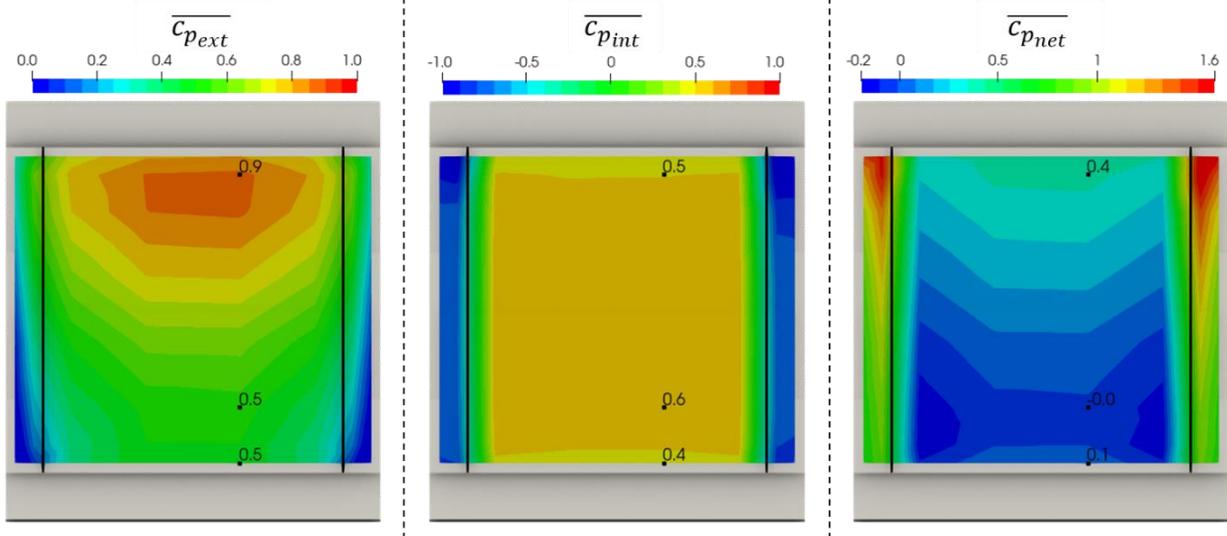


Figure 45 - Carte de coefficient de pression sur la face double-peau, externe, interne, et différentiel (configuration h_h_l_20_p_00_s_vert)

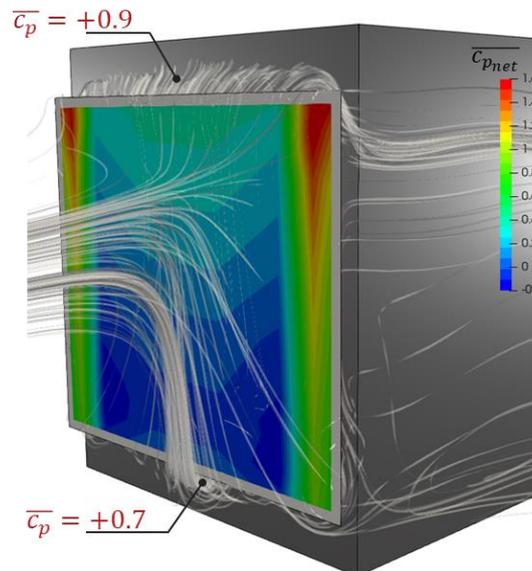


Figure 46 - structure de l'écoulement autour de la double-peau issu d'une simulation numérique et cartographie des charges différentielles $\overline{C_{p_{net}}}$ mesurée en soufflerie (configuration h_h_l_20_p_00_s_vert)

La Figure 41 trace un profil vertical du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau (notée DSF), interne, externe et net, ainsi que la pression sur la façade du bâtiment (notée BF).

La figure montre à nouveau que le coefficient de pression sur la façade du bâtiment est identique à celui de la face interne de la double-peau. La pression dans la lame d'air $\overline{C_{p_{int}}}$ s'équilibre au centre de la lame à une valeur de 0.55. Elle est donc inférieure aux valeurs mesurées aux bornes de la lame d'air. Les tentatives de modélisation par approche nodale §5 montreront à nouveau que cette valeur peut être obtenue en considérant les pressions aux bornes de la lame d'air, les pertes de charges associées à l'engoncement et au refoulement de l'écoulement, ainsi que la pression dynamique induite par l'écoulement dans la lame d'air. Cette dernière explique ainsi en partie pourquoi la pression statique dans la lame d'air est plus basse que les pressions statiques aux bornes de la lame. On notera des pressions plus faibles aux extrémités de la lame d'air, qui sont certainement à nouveau induites par des effets d'accélération à l'engoncement/refoulement de l'écoulement dans la lame d'air.

Le profil de pression sur la face extérieure de la façade double peau $\overline{c_{p_{ext}}}$ est à nouveau piloté par le gradient de pression amont, et est très proche de celui mesuré pour la configuration géométrique précédente.

Ainsi le profil du différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ est principalement piloté par celui pression amont. La figure montre qu'une partie de la façade double-peau passe même en dépression, ce qui peut sembler encore plus contre-intuitif pour une façade double-peau montée face au vent.

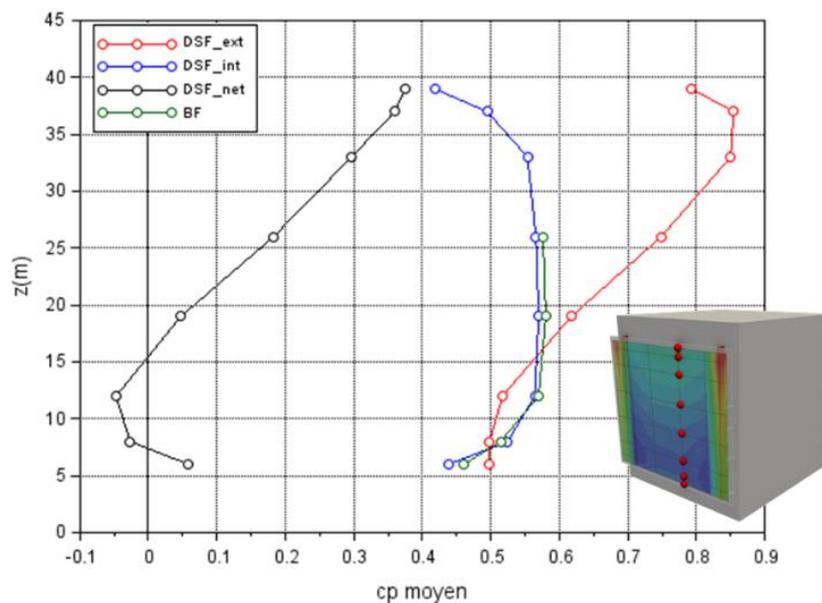


Figure 47 – profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau (DSF) interne, externe et net, ainsi que sur la façade du bâtiment (BF) (configuration h_h_I_20_p_00_s_vert)

La Figure 48 reprend le tracé du profil vertical des coefficients de pression, mais en rajoutant les valeurs des coefficients de pointes, minimum et maximum. Pour plus de lisibilité, les mesures sur la façade du bâtiment ne sont pas consignées, mais sont à nouveau identiques à celles mesurés sur la face interne de la double-peau. La Figure 50 trace en parallèle la PDF du signal de pression mesurée en 3 points du profil afin d'analyser la dynamique du signal. Comme pour la configuration précédente, le coefficient de pression de pointe externe $\widehat{c_{p_{ext}}}$ est supérieur au coefficient de pression moyen $\overline{c_{p_{ext}}}$. Contrairement à la configuration géométrique précédente, les coefficients de pression de pointe internes $\widehat{c_{p_{int}}}$ sont également supérieurs au coefficient moyen $\overline{c_{p_{int}}}$. Le tracé des PDF au centre de la façade montre que les distributions de pression sur la face externe et interne sont extrêmement proches. Pour autant la distribution du différentiel de pression n'est pas nulle, et prend la forme d'une gaussienne centrée autour d'une valeur nulle. Ainsi quand bien même les dynamiques des signaux de pression semblent identiques de part et d'autre de la façade, le fait qu'ils ne soient pas nécessairement synchronisés entre eux peut induire des différentiels de pression instantanés non nuls. La Figure 49 trace un extrait des signaux temporels de pression au centre de la façade. La figure montre ainsi que le léger décalage, en valeur et dans le temps, des fluctuations de pression de part et d'autre de la double peau conduit à des valeurs du différentiel de pression non négligeables. A nouveau cette décorrélation des pointes n'est pas due au temps de propagation de l'information de pression dans la lame d'air, mais bien au fait que les pressions aux bornes de la lame d'air ne sont pas tout à fait synchrones entre elles

Le tracé du différentiel de pression de pointe $\widehat{c_{p_{net}}}$ montre ainsi des valeurs beaucoup plus élevées que la valeur moyenne $\overline{c_{p_{net}}}$, à la fois en minima et en maxima. Ce qui fait que même

si l'effort moyen est faible, la valeur de pointe ne sera pas négligeable, et alternera entre un effort de compression et d'arrachement.

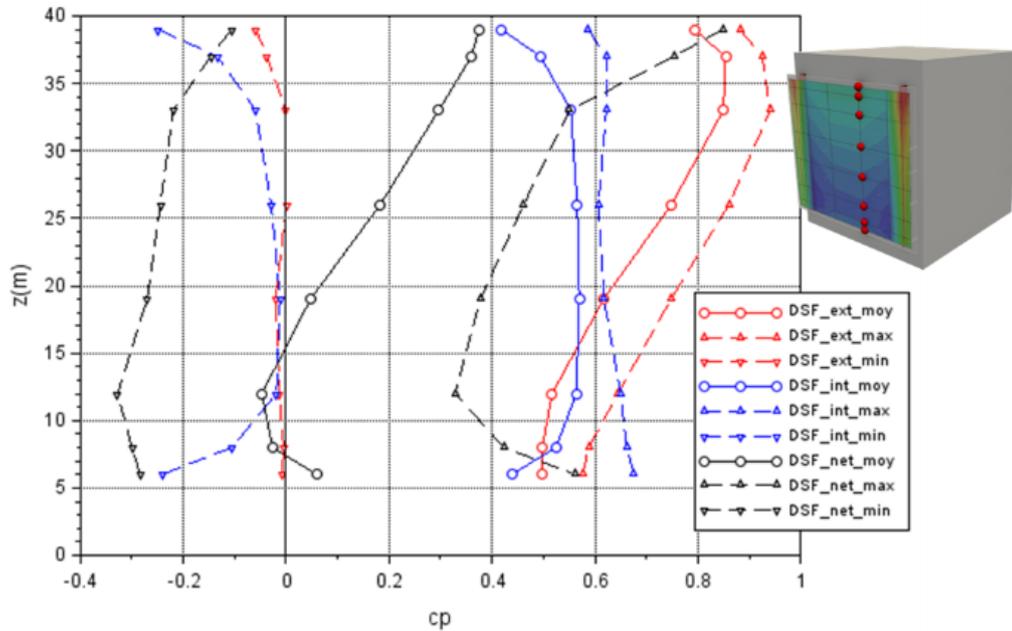


Figure 48 - profil du coefficient de pression moyen et de pointe sur la façade double-peau (DSF) interne, externe et net (configuration h_h_l_20_p_00_s_vert)

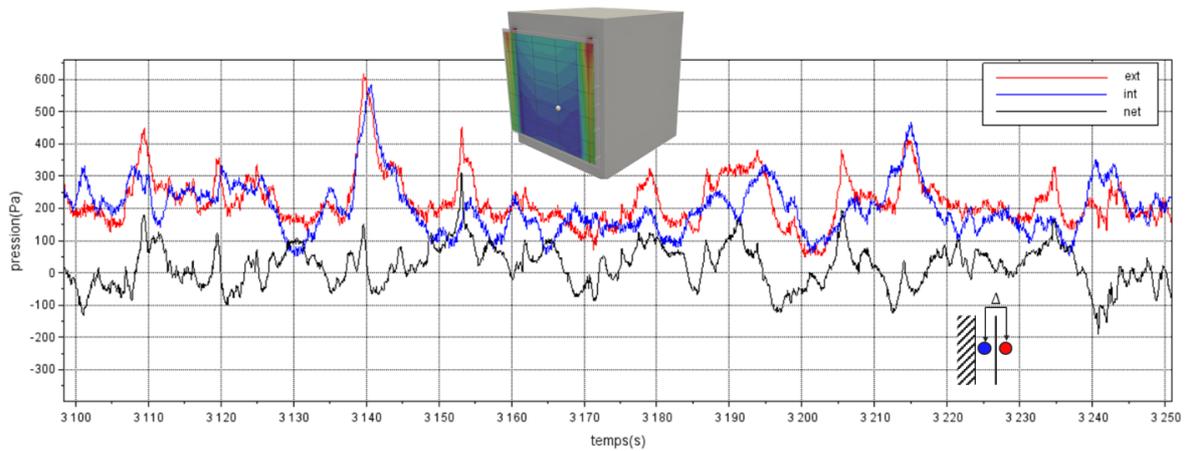


Figure 49 -extrait des signaux temporels de pression, intérieur, extérieur et net, en un point de la façade double-peau (configuration h_h_l_20_p_00_s_vert)

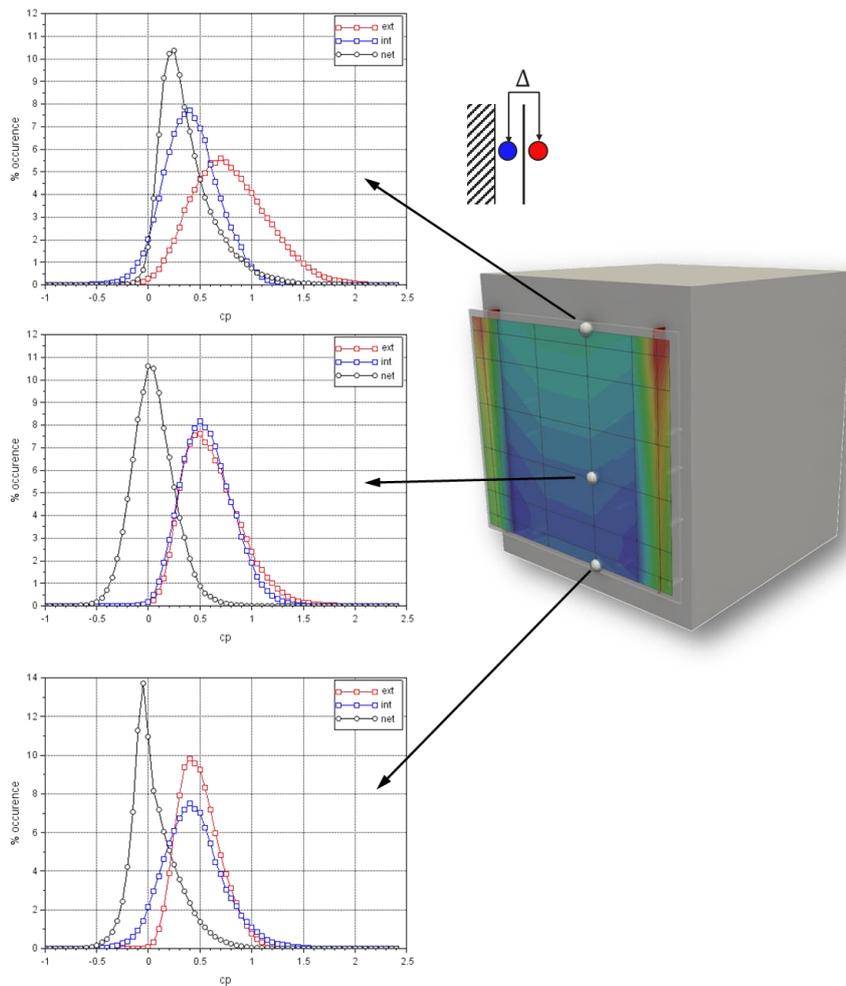


Figure 50- PDF du coefficient de pression, intérieur, extérieur et net, en trois points de la façade double-peau (configuration h_h_I_20_p_00_s_vert)

L'analyse montre ainsi que le simple changement d'un paramètre géométrique, en l'occurrence un décalage de l'extrémité de la double-peau de 5m en-dessous de la rive du bâtiment, change radicalement l'équilibrage en pression de la lame d'air, et in fine les charges au vent appliquées sur la façade double-peau. L'analyse montre en outre l'importance de la prise en compte de la dynamique de la turbulence de Couche Limite Atmosphérique qui peut entraîner des efforts de pointe très différents des efforts moyens.

On se propose à présent d'étudier la configuration géométrique inverse, à savoir la réduction de 5m de la hauteur du bâtiment. La Figure 51 trace les coefficients de pression moyens mesurés sur la face externe $\overline{c_{p_{ext}}}$, interne $\overline{c_{p_{int}}}$ ainsi que le différentiel de pression moyen noté $\overline{c_{p_{net}}}$. Le tracé est cette fois assez similaire à celui de la configuration de référence, où la rive de toiture était à niveau de l'extrémité haute de la façade double-peau. Sur la face externe, le coefficient de pression est identique à la configuration de référence. Sur la face interne, le coefficient de pression présente une évolution également similaire, avec des pressions toutefois un peu plus basses que celles du cas de référence. Il en résulte alors un coefficient de pression différentielle légèrement plus élevé

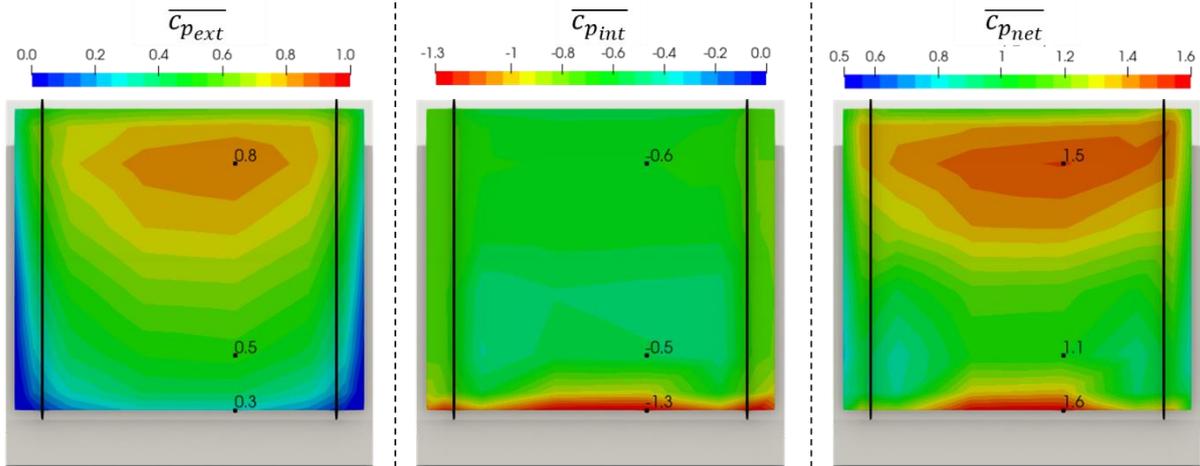


Figure 51 – Carte de coefficient de pression sur la face double-peau, externe, interne, et différentiel (configuration h_b_l_20_p_00_s_vert)

La Figure 52 trace un profil vertical du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau, interne, externe et net, en comparant les valeurs obtenues avec une toiture basse ou à niveau. Elle montre à nouveau une superposition des coefficients de pression externe $\overline{c_{p_{ext}}}$. Si tout en haut de la double-peau le coefficient de pression interne $\overline{c_{p_{int}}}$ est identique pour les deux configurations, on constate sur tout le reste du profil des pressions plus basse (-0.2) pour le bâtiment bas. Ces pressions plus basses peuvent s'expliquer par la partie émergée de la double-peau qui génère un sillage de culot. Ce sillage va diminuer la pression sur toute la partie émergée de la face interne, diminution qui se propage ensuite dans toute la lame d'air. Le profil du différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ présente logiquement un décalage identique de +0.2, augmentant les charges au vent sur la façade.

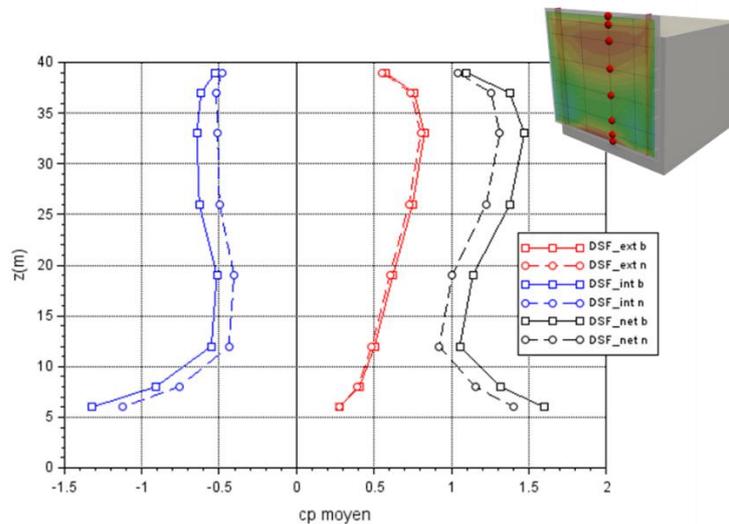


Figure 52 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau (DSF) interne, externe et net, comparaison bâtiment bas (b) et niveau (n) (configuration h_b_l_20_p_00_s_vert et h_n_l_20_p_00_s_vert)

La Figure 53 trace le profil vertical des coefficients de pointes, minimum et maximum pour la configuration avec un bâtiment bas. Un comportement tout à fait similaire à la configuration de référence peut être constaté. On notera cependant que les valeurs de pointe de la pression dans la lame d'air $\widehat{c_{p_{int}}}$ sont en valeur absolue plus faibles que la valeur moyenne, alors que dans la configuration de référence, les deux valeurs étaient égales.

Ceci peut s'expliquer par la présence du sillage de la partie émergée de la double-peau, qui par sa propre dynamique va influencer sur l'équilibrage en pression, et contribuer ainsi à une certaine décorrélation des effets de pointe à l'intérieur de la lame d'air. Cet effet de décorrélation des pressions internes, se rajoute alors à celui des pressions externes, et conduit à une décorrélation plus élevée du coefficient de pointe du différentiel de pression $\overline{c_{p_{net}}}$ que celui constaté pour la configuration de référence.

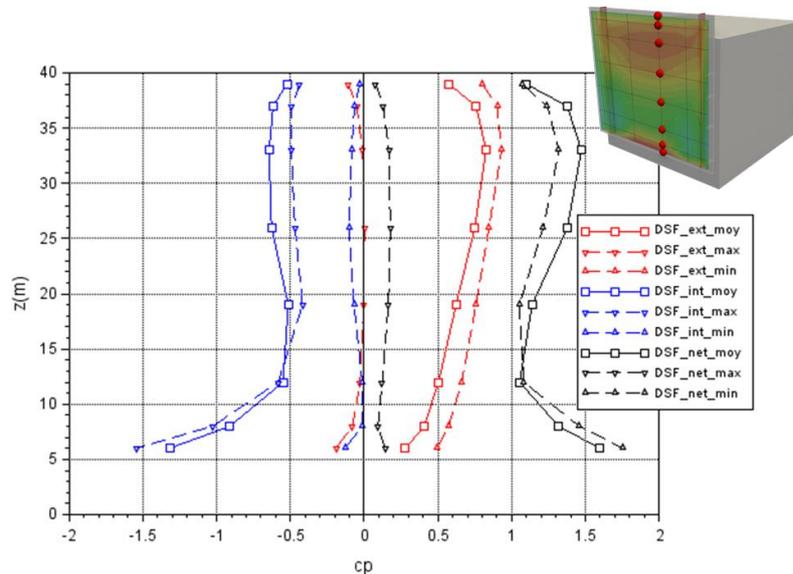


Figure 53 - profil du coefficient de pression moyen et de pointe sur la façade double peau (DSF) interne, externe et net (configuration h_b_l_20_p_00_s_vert)

Même si cette variation géométrique a un impact moins spectaculaire sur l'équilibrage en pression de la lame d'air que l'augmentation de la hauteur du bâtiment, elle démontre à nouveau une certaine sensibilité de la dynamique de l'équilibrage en pression.

4.2 PEAU OUVERTE SUR LES 4 PANS

L'analyse se porte à présent sur une configuration plus complexe, aérauliquement parlant, puisqu'elle met à l'air libre les 4 pans de la lame d'air, sans aucun recouplement.

4.2.1 Cas de référence

On se replace dans le cas de référence du paragraphe précédent, c'est-à-dire avec un bâtiment de 40m de haut. La double-peau est affleurante à la rive de toiture, mais également aux bords latéraux du bâtiment. Seule l'extrémité inférieure reste dégagée de 5m du sol. La Figure 54 trace les coefficients de pression moyens mesurés sur la face externe $\overline{c_{p_{ext}}}$, interne $\overline{c_{p_{int}}}$ ainsi que le différentiel de pression moyen noté $\overline{c_{p_{net}}}$.

Sur la face extérieure de la façade double-peau, on retrouve une cartographie du coefficient de pression $\overline{c_{p_{ext}}}$ tout à fait similaire à celui obtenu avec la présence des segmentations verticales.

Sur la face intérieure de la façade double-peau, on retrouve à nouveau un coefficient de pression moyen $\overline{c_{p_{int}}}$ quasi-homogène sur toute la façade. Le coefficient de pression est négatif et de l'ordre de -0.7, contre -0.5 avec la présence des segmentations verticales. La Figure 55 trace la structuration de l'écoulement autour de la façade double-peau dans cette configuration, et consigne les coefficients de pression mesurés sur la façade du bâtiment, aux bornes de la lame d'air. Les extrémités de la lame d'air sont en dépression sur 3 des 4 bords de la façade double-peau, avec un coefficient de pression de -0.7 sur les côtés, et -0.8 sur la

partie supérieure. Le coefficient de pression en pied de façade reste égal à +0.7. Un écoulement va donc s'établir en pénétrant par le bord inférieur de la lame d'air, et s'extraire par les 3 autres bords. Comparativement à la configuration avec segmentations verticales ceci à deux conséquences :

- une prépondérance de surfaces en dépression par rapport aux surfaces en surpression aux bornes de la lame d'air. Ce qui explique un équilibrage en pression à une valeur plus basse au centre de la lame d'air
- un débit dans lame d'air plus élevé, du fait d'un différentiel de pression plus important.

Cette dernière remarque permet alors d'expliquer le coefficient de pression de -1.7 en pied de la façade, contre -1.4 dans la configuration avec segmentation verticale. Le débit plus élevé génère alors une accélération plus importante, et une baisse des pressions statiques.

La cartographie du coefficient moyen du différentiel de pression $\overline{c_{p_{net}}}$ montre que la façade est alors globalement en compression avec une valeur moyenne de +1.5 au centre de la façade. Au pied de la façade la valeur du coefficient monte localement à +2.

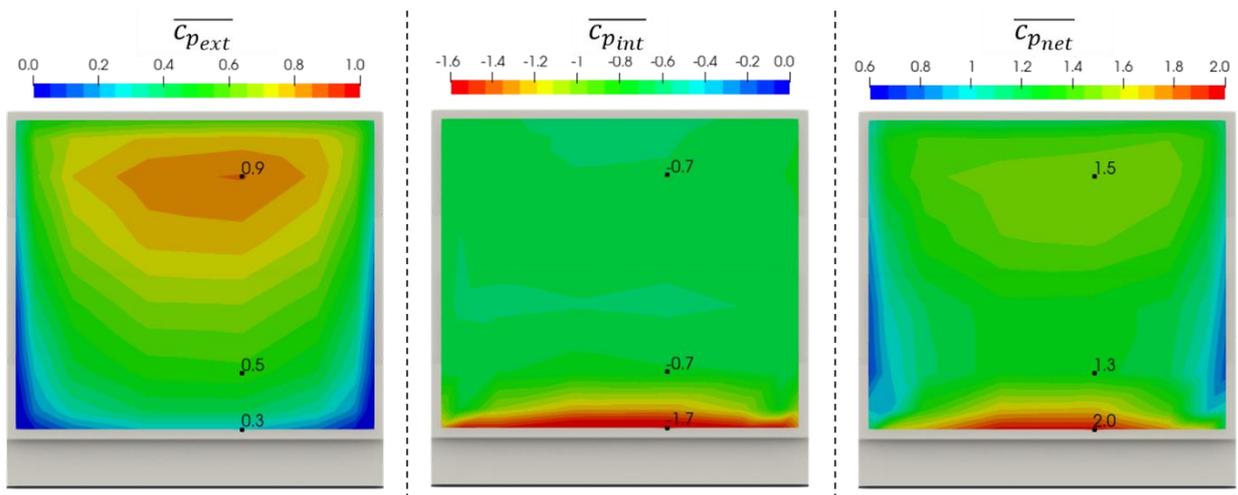


Figure 54 - Carte de coefficient de pression sur la face double-peau, externe, interne, et différentiel (configuration h_n_l_20_p_00_s_n)

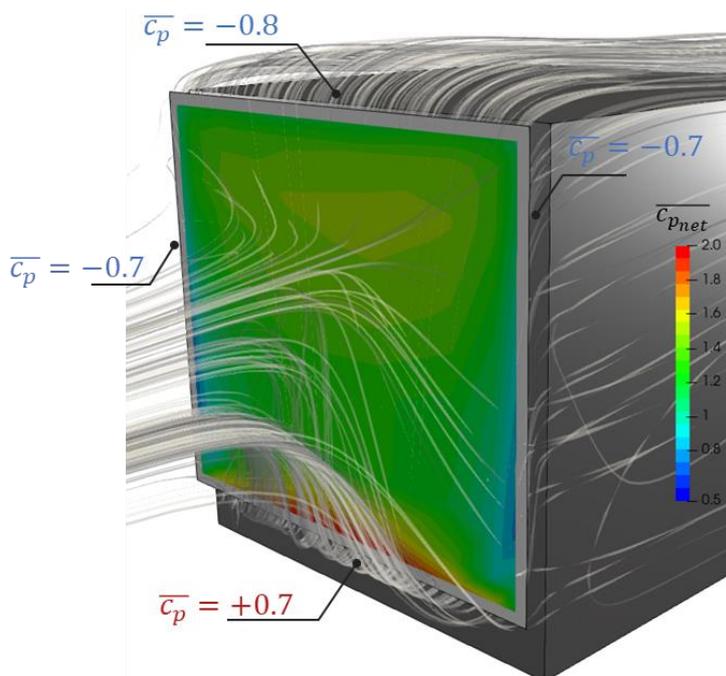


Figure 55 - structure de l'écoulement autour de la double-peau issu d'une simulation numérique et cartographie des charges différentielles $\overline{c_{p_{net}}}$ mesurée en soufflerie (configuration h_n_l_20_p_00_s_n)

La Figure 56 trace un profil vertical du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau, interne, externe et net, en comparant les valeurs obtenues dans cette configuration à celles obtenues avec une segmentation verticale. A nouveau le tracé du profil montre que le coefficient de pression sur la face externe de la double peau $\overline{c_{p_{ext}}}$ est identique dans les deux configurations. La figure montre également que la pression dans la lame d'air $\overline{c_{p_{int}}}$ est de nouveau plus basse que dans la configuration avec segmentation verticale. L'allure du profil de pression interne $\overline{c_{p_{int}}}$ est similaire dans les deux configurations, avec un décalage toutefois plus marqué en pied de façade, certainement induit par un débit entrant dans la lame d'air plus élevé, renforçant la baisse de pression statique induite par les effets d'accélération.

Il en résulte un profil du différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ également tout à fait similaire à celui de la configuration avec segmentation verticale, mais présentant une augmentation des charges plus marquée en pied de façade, du fait de la diminution de la pression à l'intérieur de la lame d'air.

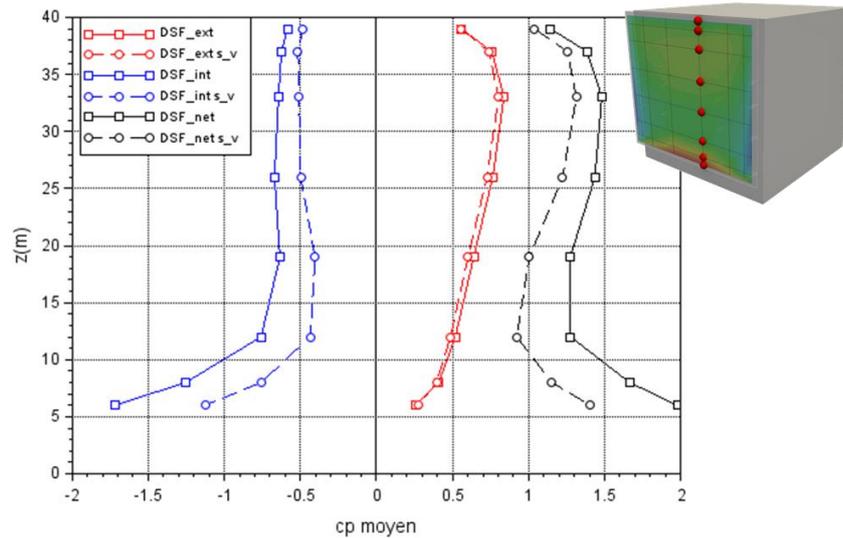


Figure 56 – profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau (DSF) interne, externe et net, comparaison avec et sans segmentation verticale (s_v) (configuration h_n_l_20_p_00_s_n et h_n_l_20_p_00_s_vert)

La Figure 57 trace le profil vertical des coefficients de points, minimum et maximum pour la configuration sans segmentation. Un comportement tout à fait similaire à la configuration avec segmentation verticale peut être constaté. On notera cependant que les valeurs de pointe de la pression dans la lame d'air $\widehat{c_{p_{int}}}$ sont en valeur absolue plus faibles que la valeur moyenne, alors que dans la configuration avec segmentation verticale, les deux valeurs étaient égales. Ceci peut s'expliquer par un renforcement des décorrélations des points à l'intérieur de la lame d'air, du fait qu'elle soit ouverte sur ses 4 pans.

Cet effet de décorrélation des pointes à l'intérieur de la lame a une répercussion directe sur la valeur de pointe du différentiel de pression $\widehat{c_{p_{net}}}$ qui est plus basse que la valeur moyenne. Cette décorrélation du coefficient de pointe est encore plus marquée que pour la configuration avec segmentation verticale.

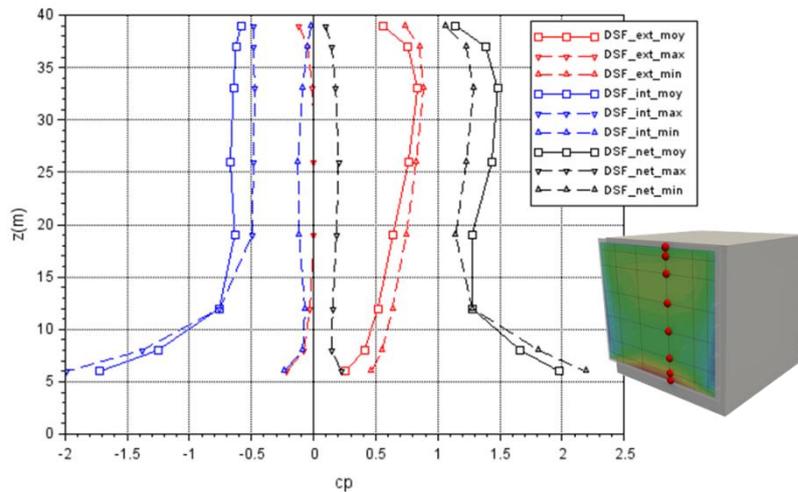


Figure 57 - profil du coefficient de pression moyen et de pointe sur la façade double peau (DSF) interne, externe et net (configuration h_n_l_20_p_00_s_n)

L'absence des segmentations verticales a donc un impact assez réduit sur l'évolution des charges au vent sur la façade double-peau, quand bien même on peut à nouveau observer un impact intéressant sur la dynamique de ce chargement.

4.2.2 Effet de la direction du vent

L'analyse a porté jusqu'à présent sur une direction de vent de 0° , i.e. une direction de vent perpendiculaire à la façade double-peau, mettant la face externe de la double-peau en compression. Le vent étant susceptible d'arriver dans n'importe quelle direction, l'analyse se propose à présent d'étudier l'effet de la direction du vent sur l'équilibrage en pression de la lame d'air. Cette analyse est faite avec la configuration géométrique précédente, à savoir sans segmentation et un bâtiment à niveau.

La Figure 58 trace les coefficients de pression moyens mesurés sur la face externe $\overline{c_{p_{ext}}}$, interne $\overline{c_{p_{int}}}$ ainsi que le différentiel de pression moyen noté $\overline{c_{p_{net}}}$ pour 8 directions de vent différentes, de 0° à 180° .

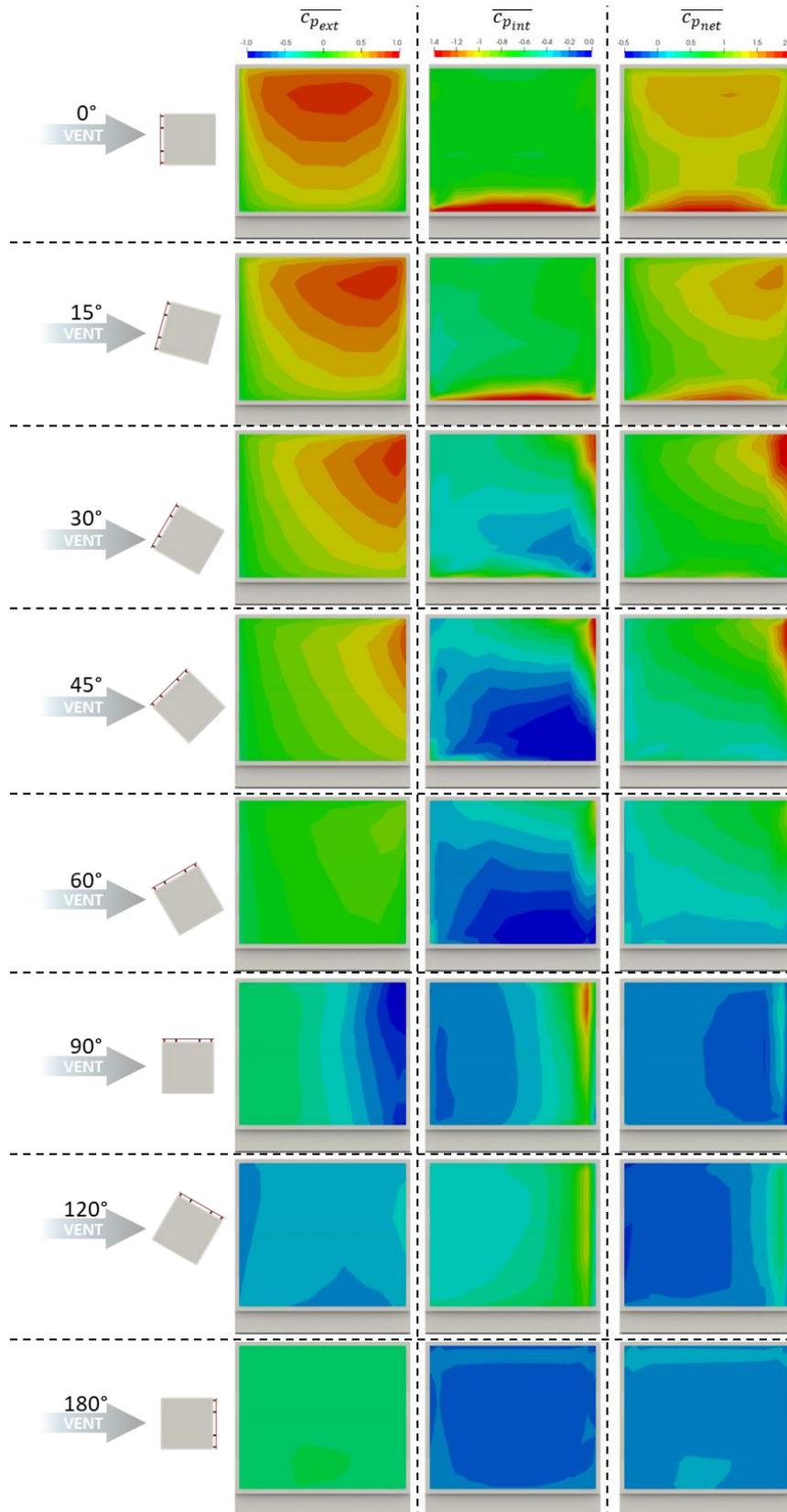


Figure 58- Coefficients de pression moyens pour différentes directions de vent (configuration h_n_l_20_p_00_s_n)

Les directions de vent de 0° et 15° présentent un chargement au vent similaire, avec un léger décalage du point d'arrêt sur la façade extérieure pour la direction de 15°. Décalage qui se répercute sur les différentiels de pression nette $\overline{c_{p_{net}}}$.

Les directions de vent de 30° et 45° sont assez similaires entre elles, et présentent une rupture avec les deux premières. Sur la face externe, le champ de pression $\overline{c_{p_{ext}}}$ présente un décalage plus prononcé du point d'arrêt vers la bordure au vent de la façade. A l'intérieur de la lame d'air, le champ de pression $\overline{c_{p_{int}}}$ devient plus inhomogène. La Figure 59 compare la structure de l'écoulement autour de la façade double-peau pour une direction de 0° et de 30°, et consigne les coefficients de pression mesurés sur la façade du bâtiment, aux bornes de la lame d'air.

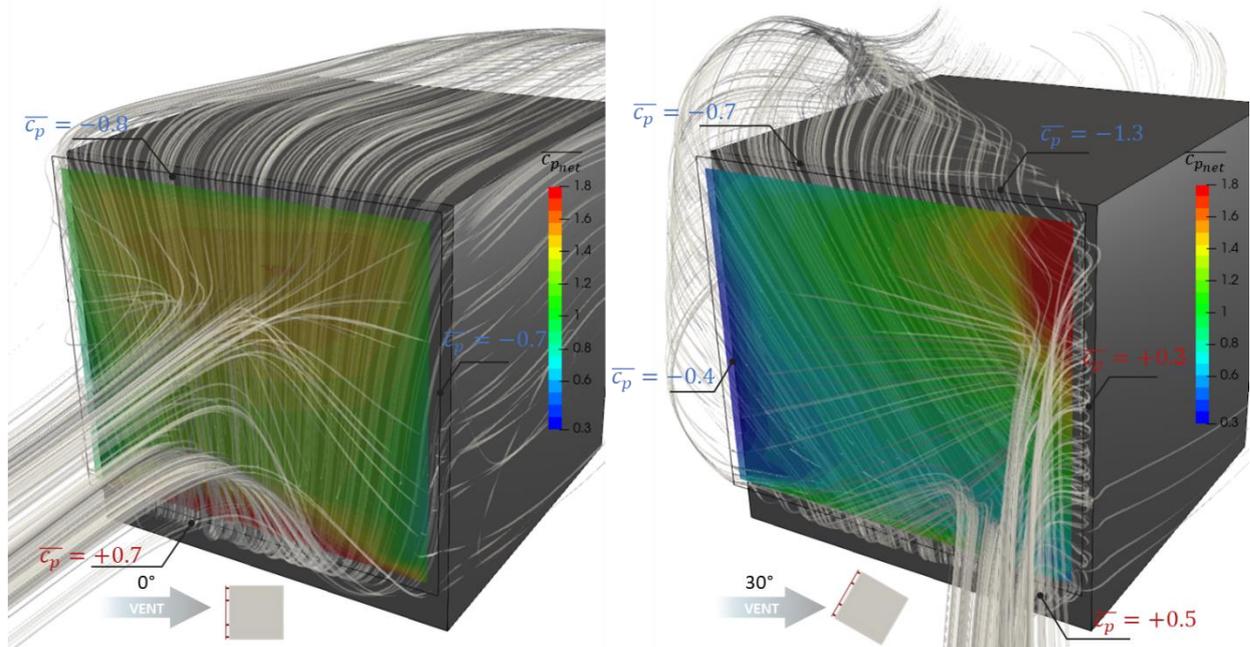


Figure 59 structure de l'écoulement autour de la double-peau issu d'une simulation numérique et cartographie des charges différentielles $\overline{c_{p_{net}}}$ mesurée en soufflerie, pour des directions de vent de 0° et 30° (configuration h_n_I_20_p_00_s_n)

Pour une direction de vent de 30°, la face latérale au vent du bâtiment présente un coefficient de pression positif, avec dans le même temps, une augmentation de la dépression en rive de toiture, côté au vent. Un écoulement va alors s'établir dans la lame d'air entre cette zone de haute pression et cette zone de basse pression. L'accélération de l'écoulement à l'engouffrement dans la lame d'air explique alors la zone de basse pression observée sur la rive latérale au vent de la face interne. La pression en pied de façade demeure positive, avec dans le même temps une pression négative sur la rive latérale sous le vent. Un écoulement peut alors également s'établir entre ces deux ouvertures, même si le débit sera plus faible, du fait d'un différentiel de pression moins élevé. L'engoncement de l'écoulement en pied de façade explique donc également la persistance d'une zone de basse pression dans la lame d'air en pied de façade. L'écoulement dans la lame d'air va donc se structurer en deux parties : un premier écoulement avec une forte dynamique, entre l'ouverture latérale au vent et la toiture, et un second écoulement moins dynamique, entre le pied de façade et l'ouverture latérale sous le vent. Entre ces deux écoulements on va retrouver une zone beaucoup moins dynamique. Elle se traduit par une zone où les dépressions sont significativement moins marquées dans la lame d'air, au centre de la façade.

Cette structuration de l'écoulement dans la lame d'air se répercute sur le différentiel de pression $\overline{c_{p_{net}}}$, où l'on retrouve une zone de forte compression au niveau de l'ouverture latérale au vent, combinaison de la forte dépression à l'intérieur de la lame d'air, et du point d'arrêt sur

la face externe. En pied de façade, le différentiel de pression est plus faible du fait d'une pression sur la face externe plus faible, et d'un engoncement de l'écoulement dans la lame d'air beaucoup plus faible également.

Pour une direction de 60°, la structure du champ de pression change à nouveau avec une pression sur la face externe de la double-peau $\overline{c_{p_{ext}}}$ beaucoup plus faible. Dans la lame d'air, on retrouve une zone, coté au vent, avec un coefficient de pression $\overline{c_{p_{int}}}$ de l'ordre de -1. Elle correspond à un écoulement résiduel s'établissant entre l'ouverture latérale au vent et l'ouverture en haut de façade. Sur cette zone, le coefficient du différentiel de pression $\overline{c_{p_{net}}}$ est de l'ordre de 1, et reste beaucoup plus faible sur le reste de la façade.

Pour une direction de 90°, l'écoulement du vent se retrouve parallèle à la façade double-peau, il va alors générer moins d'effort sur la façade. Toutefois, sur la rive au vent, le contournement du bâtiment va mettre en dépression à la fois la face externe et la face interne de la double-peau. La dépression n'étant pas identique sur les deux faces de la double-peau, il en résulte un différentiel de pression changeant de signe rapidement en s'éloignant de la rive au vent. La valeur de ce différentiel reste toutefois assez faible. Un comportement similaire peut être observé pour un angle de 120°.

Pour une direction de 180°, la façade est complètement immergée dans le sillage du bâtiment. La face interne et externe de la façade double-peau sont alors toutes deux en dépression, avec un coefficient de pression comparable, autour de -0.2, entraînant un différentiel de pression quasi nul.

L'analyse des champs de pression moyenne a montré que les chargements les plus élevés de la double-peau se produisaient pour des directions de vent comprises entre 0° et 45°. Toutefois les analyses précédentes ont montré que les effets d'instationnarité pouvaient conduire à des différentiels de pression de pointe $\widehat{c_{p_{net}}}$ non négligeables, quand bien même le différentiel moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ était faible. En ce sens la Figure 60 et la Figure 61 présentent respectivement les coefficients de pression de pointe maximums (correspondant aux compressions de pointes) et minimum (correspondant aux arrachements de pointes) du différentiel de pression relevée pour chaque direction de vent.

L'analyse des figures montre que les conclusions sur les champs de pression de pointe semblent les mêmes que celles formulées sur les champs de pression moyenne. Pour les compressions de pointe, on retrouve que la double-peau est plus particulièrement sollicitée pour des directions de vent de 0° à 45°. On notera pour une direction de vent de 60° une valeur de pointe de la compression, sur le coin supérieur de la façade, plus marquée que ne le laissait le supposer le coefficient de pression moyen. Les arrachements de pointe les plus élevés sont obtenus pour des directions de vent de 60°, 120°, et plus particulièrement 90° où les deux faces de double-peau se retrouvaient en dépression, mais avec des dynamiques assez différentes. Enfin on notera que pour une direction de 180° les valeurs du coefficient de pression de pointe restent très faibles.

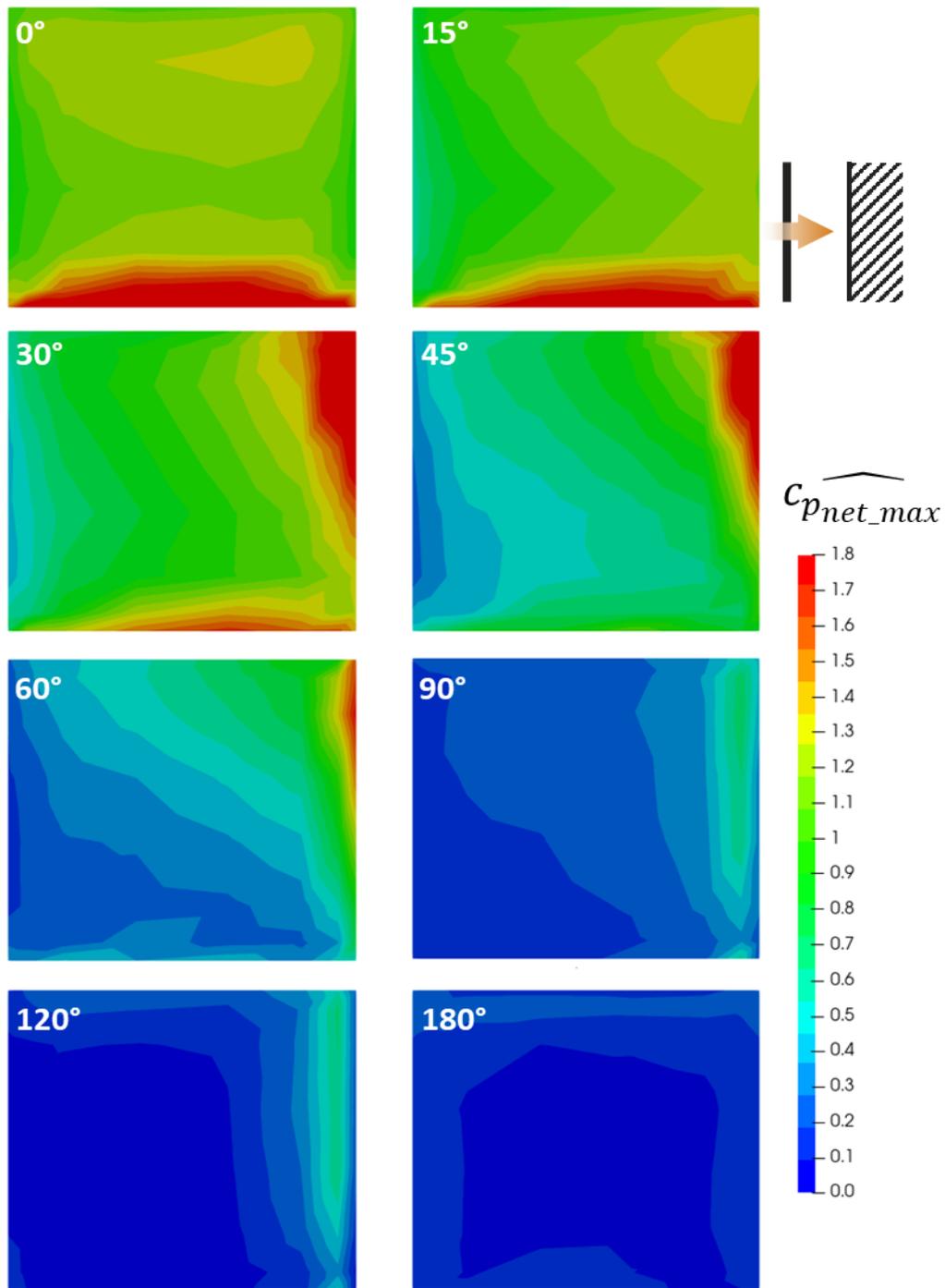


Figure 60 – cartographie du coefficient du différentiel de pression de pointe maximum (compressions de pointe) pour chaque direction de vent (configuration h_n_l_20_p_00_s_n)

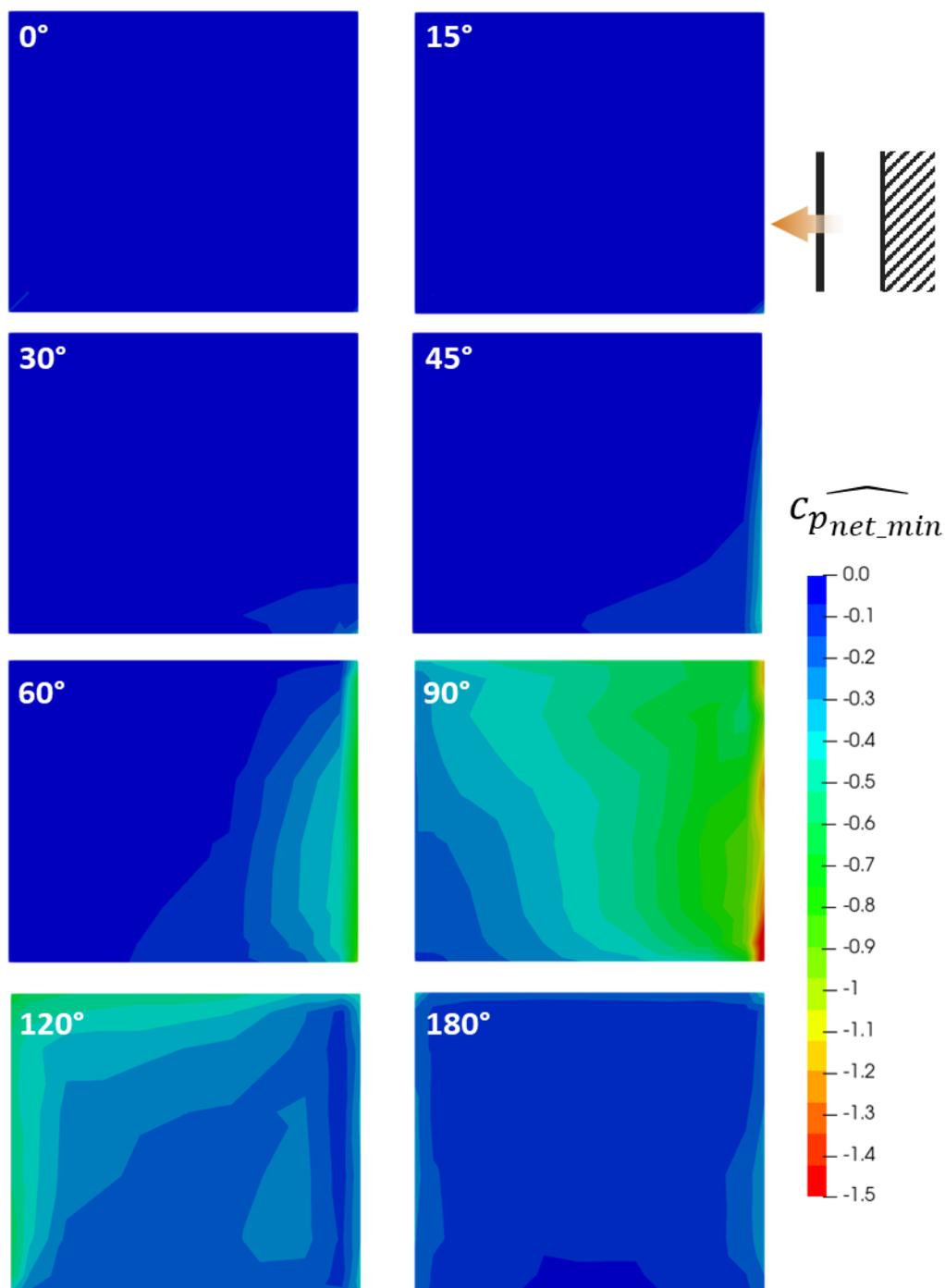


Figure 61 - cartographie du coefficient du différentiel de pression de pointe minimum (arrachements de pointes) pour chaque direction de vent (configuration h_n_l_20_p_00_s_n)

La Figure 62 se propose alors de résumer ces cartographies en proposant un coefficient de pression différentielle de pointe, maximum et minimum, toutes directions de vent confondues. Les champs de pression sur la figure sont symétrisés.

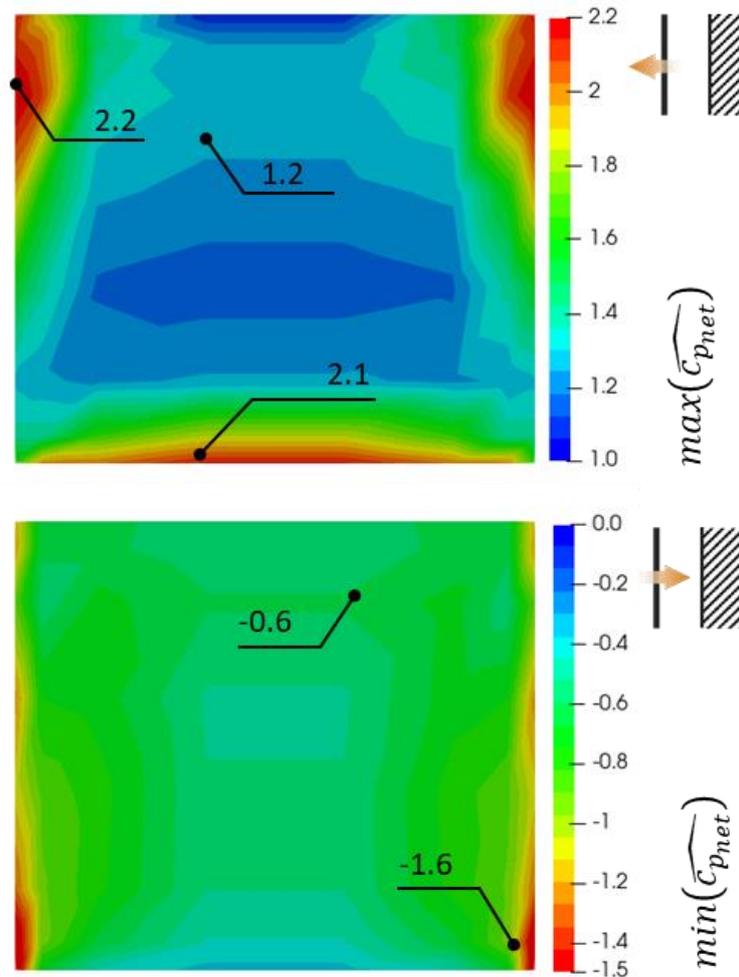


Figure 62 - cartographie du coefficient du différentiel de pression de pointe toutes directions de vents confondues, en haut maximum (compressions de pointes) en bas : minimum (arrachements de pointes) (configuration h_n_l_20_p_00_s_n).

La figure permet dans un premier temps de conclure que, pour cette configuration géométrique, la façade double-peau est bien plus sollicitée en compression qu'en arrachement. Pour les compressions, on retrouve des coefficients de pression différentielle montant jusqu'à une valeur de 2.2 au pied de la façade, ainsi que sur la partie supérieure des rives latérales. Le coefficient diminue alors progressivement pour atteindre une valeur de 1.2 au centre de la façade. Pour les arrachements, la valeur de pointe maximum est de -0.6 sur la très grande majorité de la façade. Elle s'élève très localement à une valeur de -1.6 sur les rives.

La Figure 63 trace le coefficient de pression différentielle maximum toutes directions confondues, en ne considérant que les 3 directions de vent 0° , 30° et 60° . Elle le compare à celui qui a été calculé précédemment sur 8 directions de vent. Les 2 cartographies sont extrêmement proches et semblent montrer que les efforts maximums sur la façade double-peau sont générés pour des directions de vent comprises entre 0° et 60° .

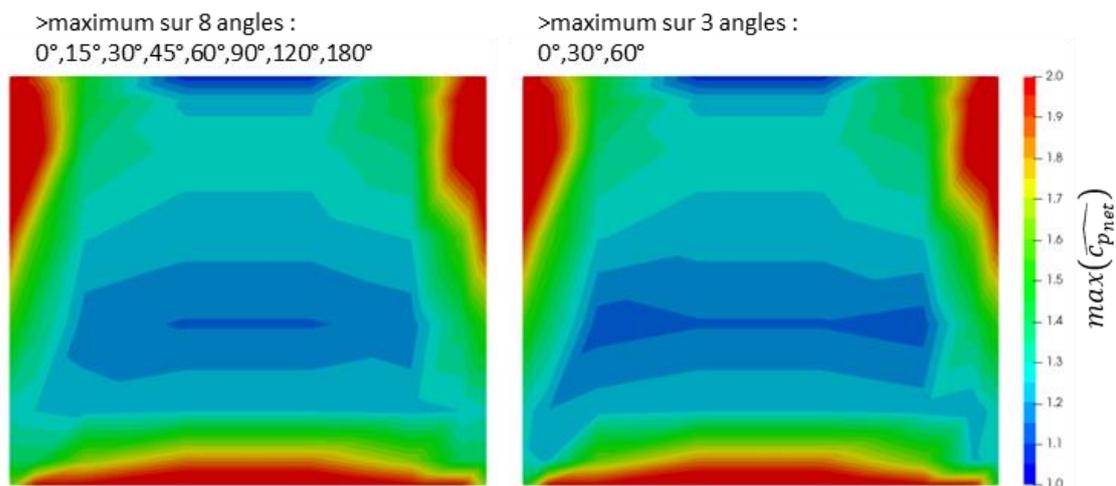


Figure 63 - cartographie du coefficient du différentiel de pression de pointe toutes direction de vents confondues : influence du nombre de directions considérées (configuration h_n_l_20_p_00_s_n).

4.2.3 Effet de la hauteur du bâtiment

On se propose à présent d'étudier l'influence de la hauteur du bâtiment sur cette configuration sans recouvrement. L'analyse porte directement sur les cartographies du différentiel de pression de pointe $\widehat{c_{p_{net}}}$ toutes directions de vent confondues, telles que présentées au paragraphe précédent. Les directions analysées sont les mêmes que précédemment, 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 90°, 120° et 180°. La Figure 64 et la Figure 65 présentent respectivement les cartographie des compressions et arrachements de pointes toutes directions de vent confondues et obtenues pour les 3 hauteurs de bâtiments.

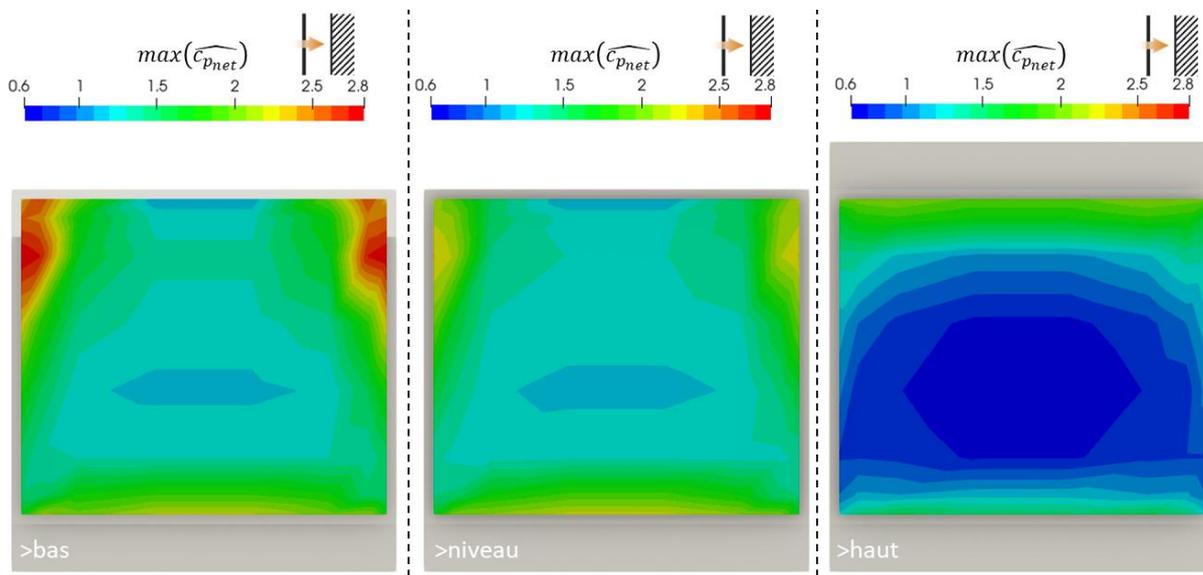


Figure 64 - cartographie du coefficient du différentiel de pression de pointe maximum (compressions de pointes) toutes directions de vents confondues en fonction de la hauteur du bâtiment

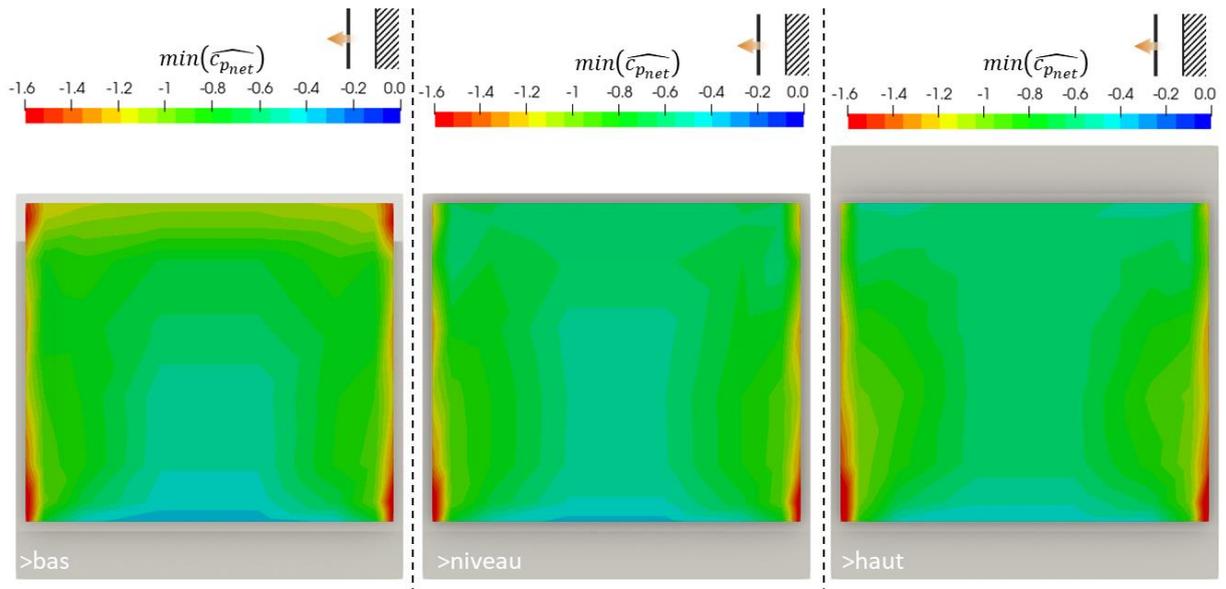


Figure 65 - cartographie du coefficient du différentiel de pression de pointe minimum (arrachements de pointes) toutes directions de vents confondues en fonction de la hauteur du bâtiment

La Figure 65 montre que les cartographies des arrachements de pointe sont identiques pour les 3 hauteurs de bâtiments. On notera juste une légère différence sur les coins supérieurs de la façade, avec des arrachements plus élevés pour un bâtiment bas. L'impact de la hauteur du bâtiment sur les arrachements est donc faible.

Il en va tout autrement pour les cartographies des compressions de pointe. La cartographie obtenue pour un bâtiment bas est très proche de celle obtenue pour un bâtiment à niveau, mis à part des valeurs significativement plus élevées sur les coins supérieurs de la façade. La Figure 66 trace la structure de l'écoulement dans une configuration bâtiment bas pour une direction de vent de 0° et de 30°. Pour la direction de 0°, la structure de l'écoulement est très similaire à celle qui a été présentée Figure 59 pour un bâtiment à niveau, avec un écoulement s'engouffrant en pied de façade et s'évacuant par les 3 autres pans de la façade. Pour un angle de 30°, on retrouve comme pour le bâtiment à niveau, un engouffrement de l'écoulement à la fois par l'ouverture latérale au vent et par le pied de façade. On observe également un enroulement de l'écoulement, généré par le contournement de la rive au vent de la double-peau, et se développant à l'échelle de la partie émergée de la façade. Ces enroulements sont connus pour être très énergétiques, et induire des pressions très basses sur les façades. Ceci explique alors le différentiel de pression très élevé sur le coin supérieur de la façade, induit par cet enroulement qui génère une dépression très élevée sur la face interne de la double-peau. Ce mécanisme est très similaire à celui qui génère les charges très élevées sur les acrotères en rive de toiture.

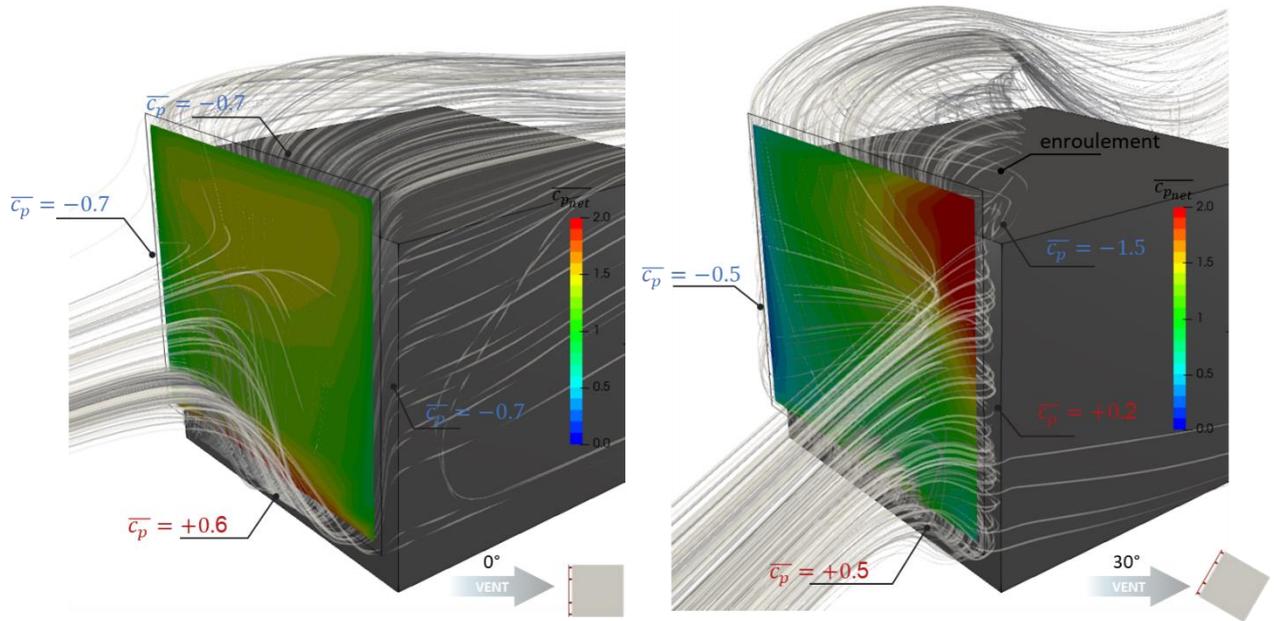


Figure 66 - structure de l'écoulement autour de la double-peau issu d'une simulation numérique et cartographie des charges différentielles $\overline{c_{pnet}}$ mesurée en soufflerie, pour des directions de vent de 0° et 30° (configuration h_b_l_20_p_00_s_n)

Comme pour la configuration avec segmentation verticale, l'augmentation de la hauteur du bâtiment induit une diminution très significative des charges au vent sur la façade double-peau. Les compressions de pointes restent élevées sur la partie supérieure et inférieure de la façade, de l'ordre de +2, puis diminuent jusqu'à une valeur de +0.6 au centre de la façade. La

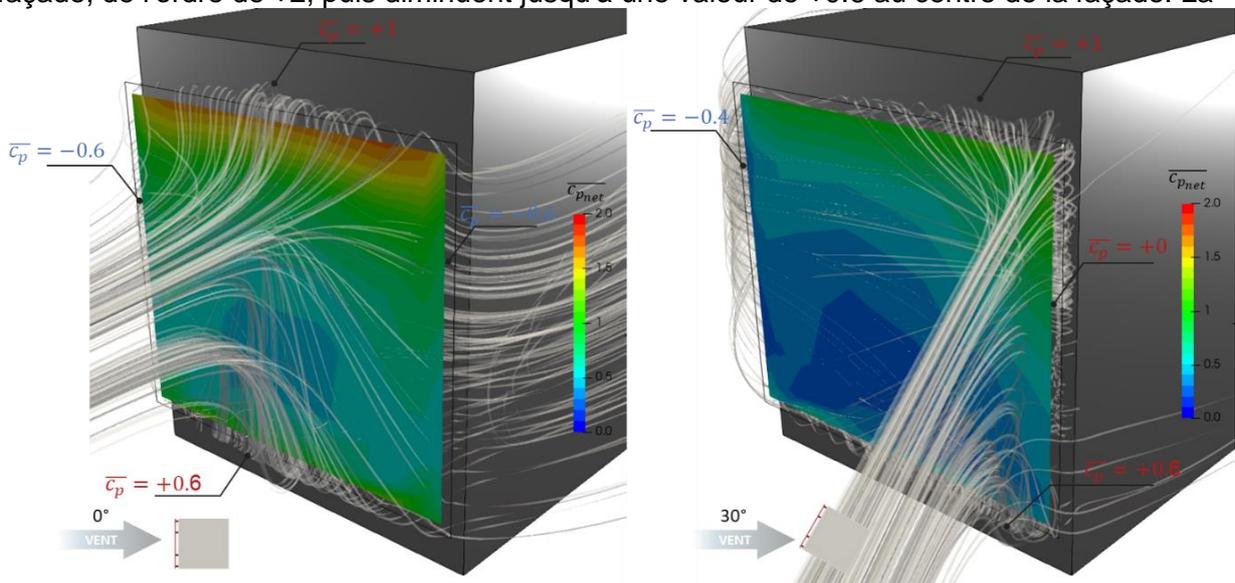


Figure 67 trace la structure de l'écoulement autour de la double-peau pour deux directions de vent de 0° et 30°. Pour une direction de 0°, l'écoulement pénètre par le haut et le pied de la façade qui sont en surpression, puis s'évacue par les ouvertures latérales en dépression. La lame d'air est donc partagée entre un écoulement venant par le haut de la façade et par le bas de la façade. Au centre de la façade, entre ces deux écoulements, la dynamique est très faible, ce qui explique ainsi que les charges soient plus basses. Pour une direction de vent de 30°, on retrouve un écoulement s'engouffrant par le haut et le pied de la façade. Il s'engouffre également par la partie supérieure de l'ouverture latérale au vent, qui est à présent en surpression. L'écoulement ne s'évacue alors que par l'ouverture latérale sous le vent qui est à présent la seule en dépression. Cette configuration crée donc une circulation plus élevée dans

la lame d'air sur le coin supérieur au vent de la façade double-peau, ce qui explique que les charges soient plus élevées en cet endroit.

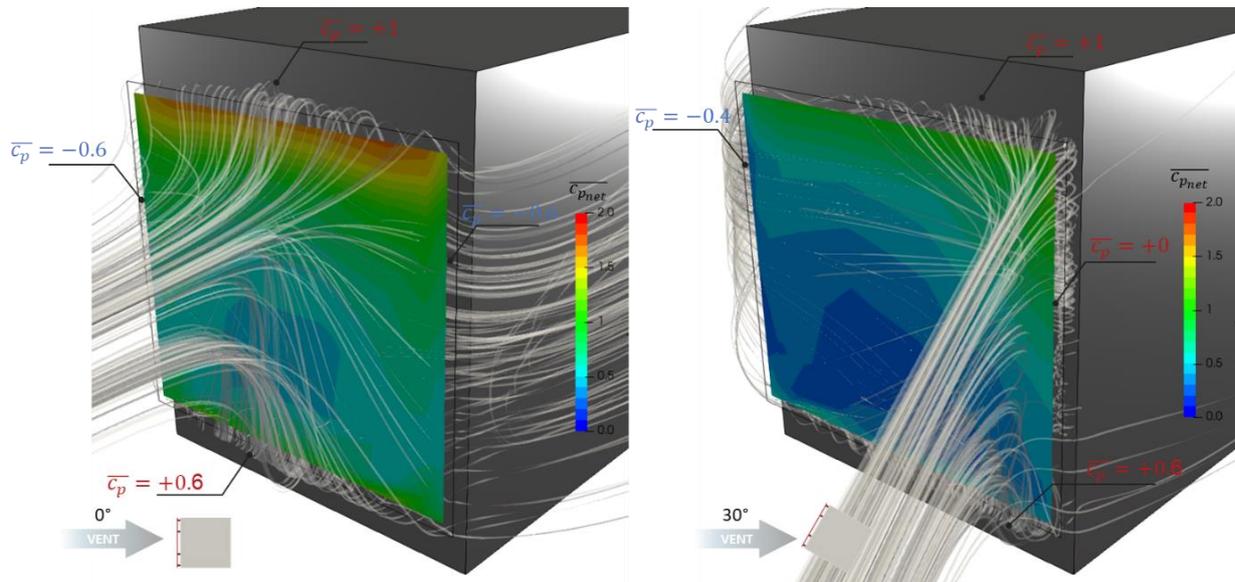


Figure 67 - structure de l'écoulement autour de la double-peau issu d'une simulation numérique et cartographie des charges différentielles $\overline{c_{p_{net}}}$ mesurée en soufflerie, pour des directions de vent de 0° et 30° (configuration h_h_l_20_p_00_s_n)

Les effets de la direction du vent sur ces façades double-peau non recoupées permettent ainsi d'illustrer le lien entre le chargement au vent de la double-peau et la façon dont l'écoulement va se structurer au sein de la lame d'air. Ecoulement qui dépend lui-même des pressions imposées aux bornes de la lame d'air par l'écoulement du vent à l'échelle du bâtiment.

Les effets de la direction du vent n'ont pas été présentés pour les façades double-peau avec segmentations verticales, bien qu'elles aient fait l'objet d'essais dans le cadre de cette étude. Compte tenu du fait que les ouvertures latérales n'ont pas d'impact sur l'équilibrage en pression de la lame d'air, l'effet de la direction du vent est beaucoup moins marqué en présence de segmentations verticales. Le chargement au vent pour une direction de 0° est alors représentatif d'un chargement au vent toutes directions de vent confondues.

4.3 PEAU SEGMENTEE HORIZONTALEMENT

L'étude se propose à présent d'étudier la répercussion de la présence de segmentations horizontales sur l'équilibrage de la lame d'air et les charges au vent.

4.3.1 Segmentations pleines

On considère dans un premier temps des segmentations pleines, par opposition à des segmentations poreuses telles que présentées Figure 20. La Figure 68 présente le tracé du différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ sur la façade double peau pour une direction de 0°, et pour trois hauteurs du bâtiment. Les mesures seront faites avec une segmentation horizontale, haute ou basse (à 5m de la rive de la double-peau dans les deux cas), et comparées à la configuration sans segmentation. En complément, la Figure 69, la Figure 70 et la Figure 71 proposent un tracé du profil de pression interne, externe, et du différentiel correspondant, respectivement pour les 3 hauteurs de bâtiment.

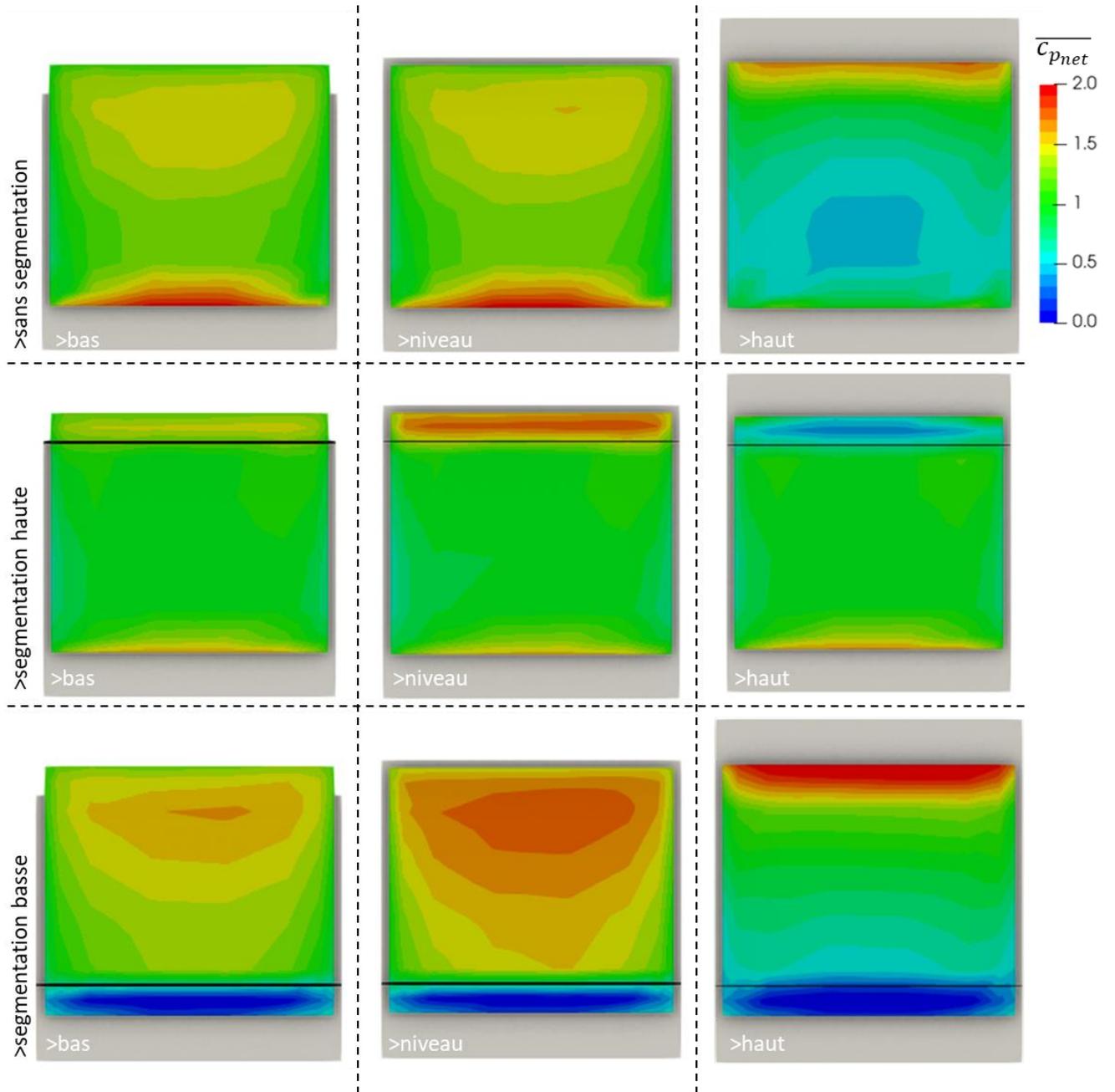


Figure 68- Coefficients de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ pour une direction de 0°, trois hauteurs de bâtiments et pour deux types segmentations horizontales

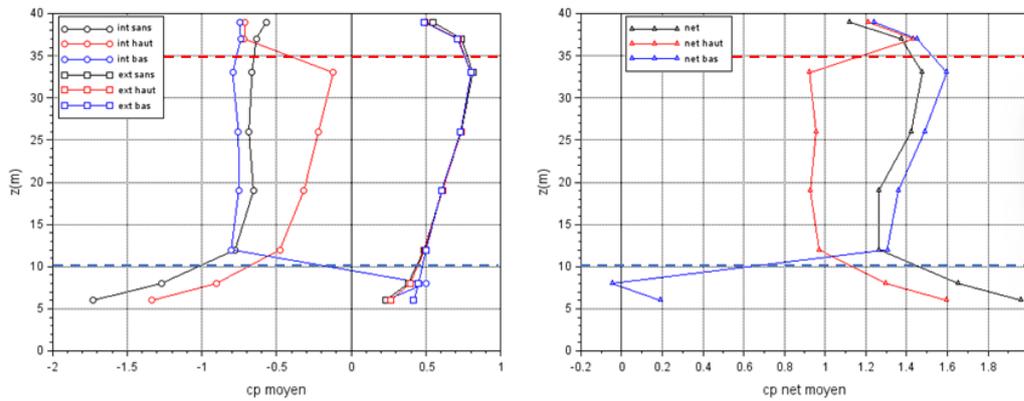


Figure 69- profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne, externe et net, pour un bâtiment bas avec deux configurations de segmentations horizontales

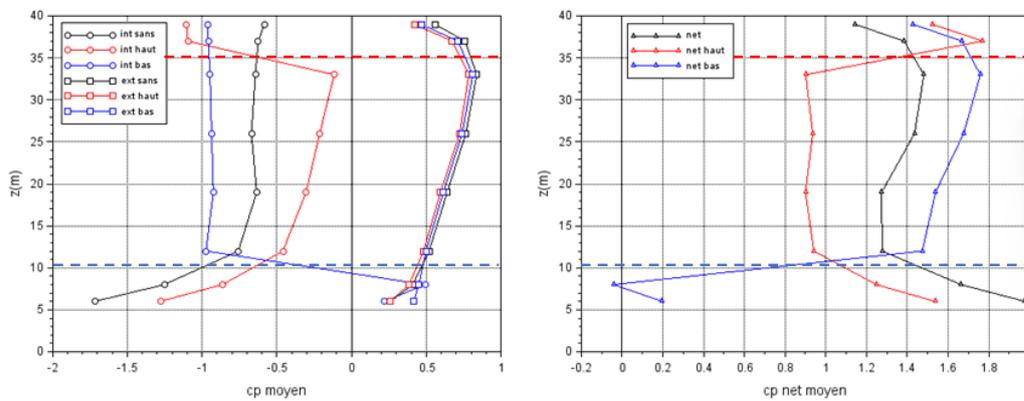


Figure 70- profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne, externe et net, pour un bâtiment à niveau avec deux configurations de segmentations horizontales

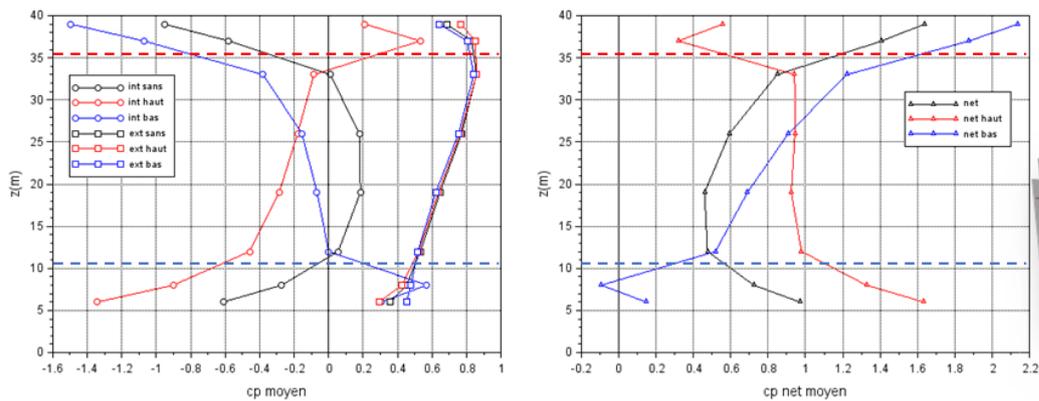


Figure 71 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne, externe et net, pour un bâtiment haut avec deux configurations de segmentations horizontales

Les figures montrent alors que ces segmentations horizontales ont un impact très significatif sur les chargements de la façade double-peau.

Pour le bâtiment bas et à niveau, la segmentation haute va diminuer les charges au vent sur la double-peau. Elle va couper l'accès aux basses pressions en haut de la façade. Ainsi, pour un pan en surpression en pied de façade, il n'y a plus que 2 pans en dépression sur les côtés, contre 3 pans dans la configuration sans segmentation. Cela a alors pour effet de diminuer la dépression à l'intérieur de la lame d'air. On peut ainsi observer un décalage du profil de pression moyenne intérieure $\overline{c_{p_{int}}}$. Ceci se traduit alors directement par une diminution des charges nettes $\overline{c_{p_{net}}}$. La segmentation haute va induire au contraire une augmentation des charges pour le bâtiment haut. Elle va avoir pour effet de couper l'accès à la surpression en haut de la façade. Dans la configuration sans segmentation, il y avait 2 pans en surpression pour 2 pans en dépression. Avec la segmentation haute, il n'y a plus qu'un pan en surpression pour 2 pans en dépression. Ceci abaisse la pression à l'intérieur de la lame d'air et augmente le débit y pénétrant. On constate notamment sur les profils de pression interne $\overline{c_{p_{int}}}$ et du différentiel net $\overline{c_{p_{net}}}$, une augmentation significative des charges en pied de façade induites par l'engoncement de l'écoulement dans la lame d'air.

Pour le bâtiment bas et à niveau, la présence d'une segmentation en pied de façade va augmenter les charges au vent. Dans cette configuration la segmentation coupe l'accès au pan en surpression en pied de façade, et les 3 pans exposés de la lame d'air sont alors en dépression. Il en résulte une pression plus basse dans la lame d'air, et donc un différentiel net plus élevé. On notera que cette augmentation des charges est plus importante pour le bâtiment à niveau que pour le bâtiment bas. Pour le bâtiment haut, la segmentation en pied de façade induit également une augmentation des charges. Comme pour la segmentation basse, le fait de couper l'accès à un pan en surpression diminue la pression dans la lame d'air. Dans cette configuration, on constate un engouffrement de l'air beaucoup plus important en haut de la façade, induisant des charges plus élevées sur la partie supérieure de la façade.

L'analyse montre donc à nouveau que l'on peut relier facilement l'évolution des charges au vent sur la double-peau aux pressions imposées aux bornes de la façade, et à l'écoulement qu'elles vont générer dans la lame d'air.

4.3.2 Segmentations poreuses

On se propose à présent d'étudier l'effet d'une porosité variable de ces segmentations. Elle est ici aménagée sous forme de lumières réparties sur toute la longueur de la segmentation comme présenté Figure 20. Elles peuvent par exemple représenter des trappes d'admission d'air aménagées en haut d'une façade double peau.

La Figure 72 et la Figure 73 proposent un tracé du profil de pression interne, externe, et du différentiel correspondant, associée respectivement à un bâtiment bas et un bâtiment haut, pour une configuration avec une segmentation haute de la double-peau. La figure montre alors une légère variation de l'équilibrage en pression avec l'augmentation de la porosité. On constate que le profil est beaucoup plus proche de l'équilibrage obtenu avec une segmentation pleine qu'avec une configuration sans segmentation. On pressent alors que les profils vont se rapprocher du profil sans segmentation au fur et à mesure de l'augmentation de la porosité de la segmentation. Mais les mesures semblent indiquer que l'agencement d'une porosité réduite dans la segmentation n'a que peu d'impact sur l'équilibrage en pression de la lame d'air. Cet équilibrage va rester majoritairement conditionné par les pans de façade non recoupés, dont la surface est bien supérieure à celle des porosités du pan recoupé.

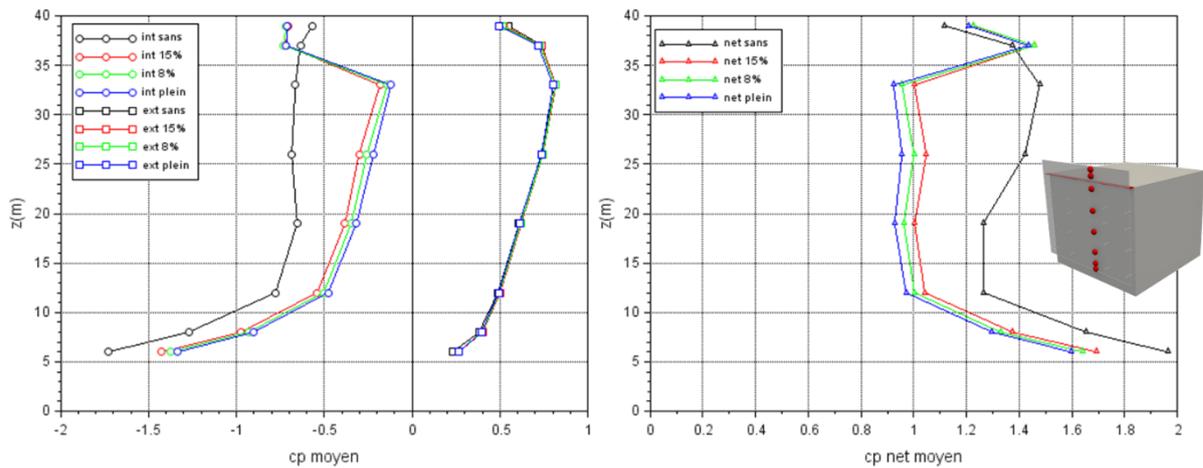


Figure 72 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne, externe et net, pour un bâtiment bas avec une segmentation haute à porosité variable

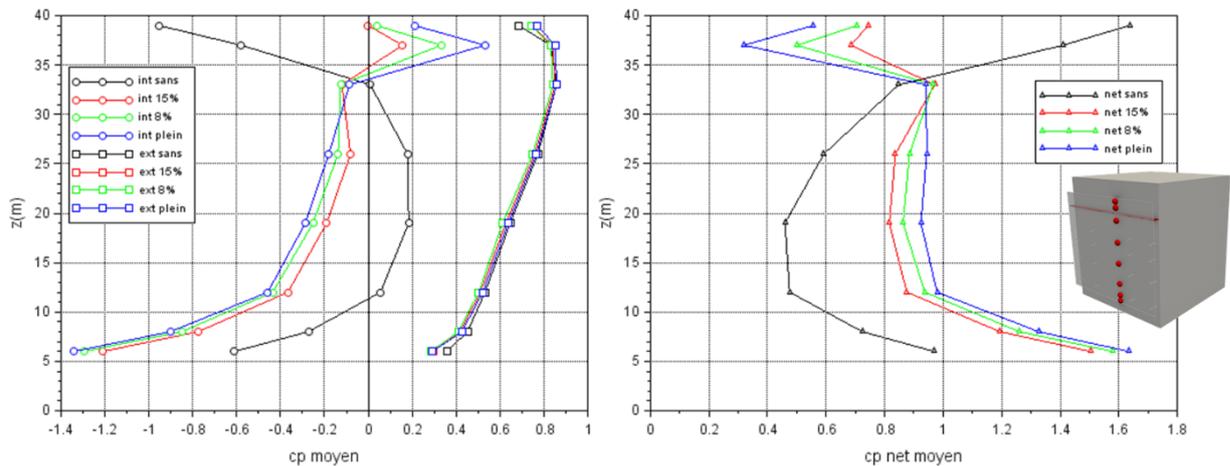


Figure 73 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne, externe et net, pour un bâtiment haut avec une segmentation haute à porosité variable

4.4 EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE LA LAME D'AIR

L'étude se propose à présent d'étudier l'effet de l'épaisseur de la lame d'air sur les charges au vent de la double-peau. La maquette permet d'ajuster de manière continue l'épaisseur de la lame d'air en l'absence de segmentations (les segmentations n'ont été réalisées que pour une seule épaisseur de la lame d'air).

La Figure 74 trace la cartographie du différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ sur la façade double-peau, pour un bâtiment à niveau et une direction de vent de 0°. Les mesures sont réalisées pour 4 épaisseurs de lame d'air : 50 cm, 1m, 2m et 3m Vraie Grandeur. En complément, la Figure 75 trace les profils des pressions moyennes interne, externe et du différentiel net pour les 4 épaisseurs de la lame d'air.

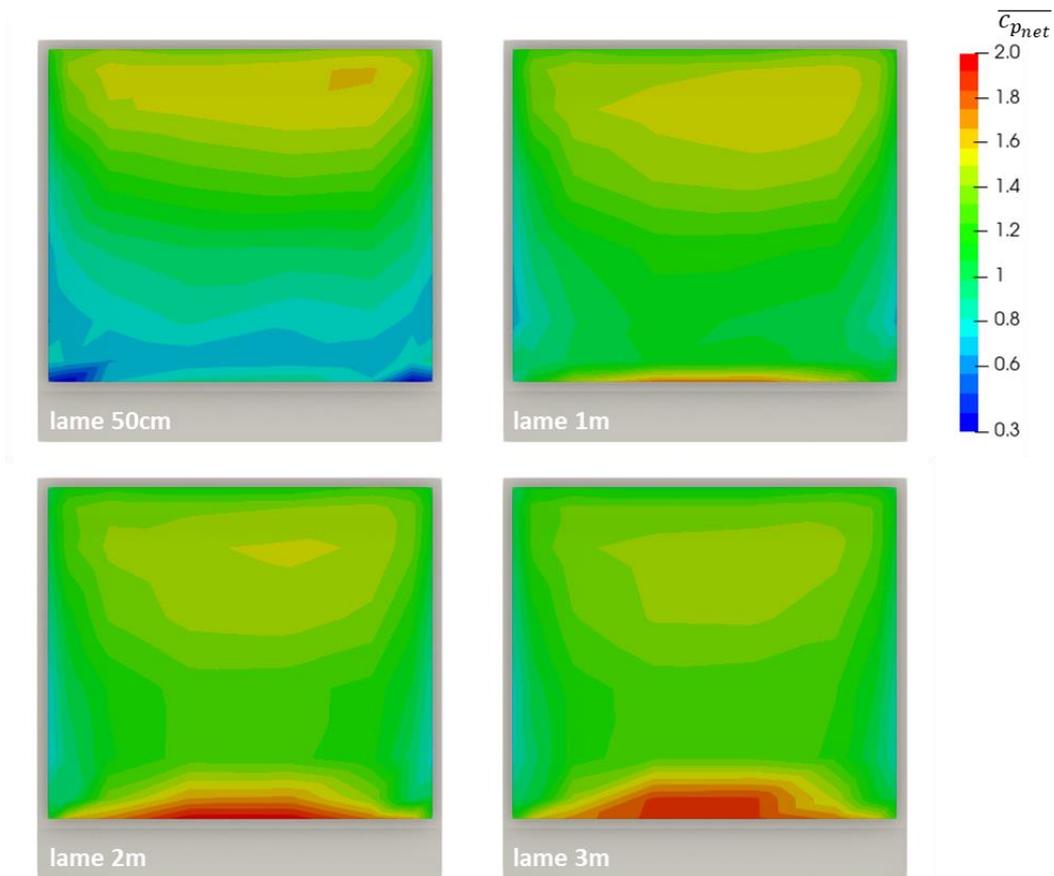


Figure 74 - Coefficients de pression moyens pour différentes pour différentes épaisseurs de lame et une direction de vent de 0° (configuration h_n_I_XX_p_00_s_n)

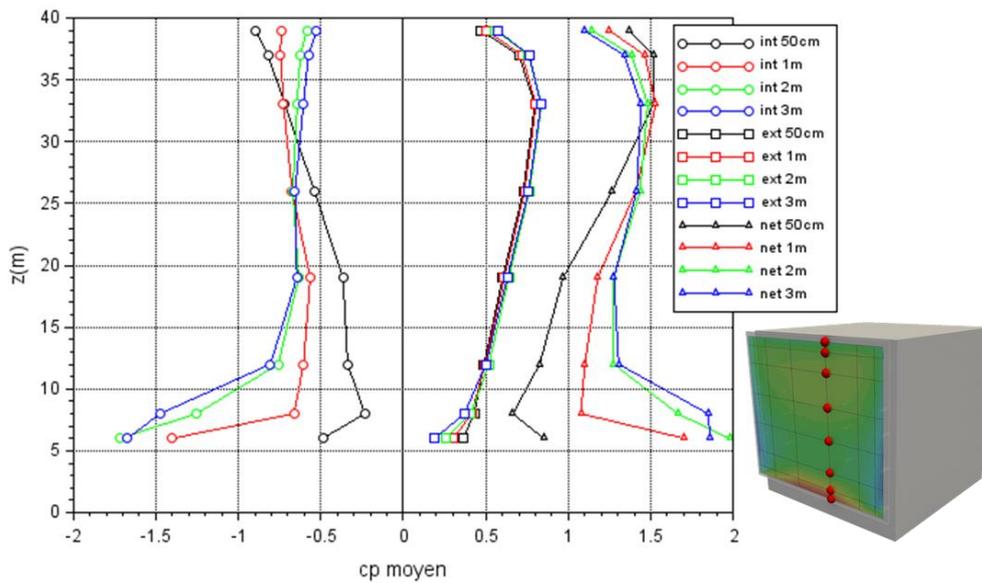


Figure 75 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau (DSF) interne, externe et net, pour trois épaisseurs de lame d'air (configuration h_n_I_XX_p_00_s_n)

Les figures mettent en avant un impact non négligeable de l'épaisseur de la lame d'air sur les charges au vent de la façade double-peau. De manière générale, la diminution de l'épaisseur de la lame d'air induit une diminution des charges. Les charges mesurées pour une épaisseur

de 2m et 3m sont assez similaires, et semblent indiquer que les charges n'augmenteront pas pour des épaisseurs de lame d'air supérieures à 2m. Lorsque l'épaisseur de la lame d'air diminue, le profil de pression interne $\overline{c_{p_{int}}}$ montre qu'en valeur absolue, la dépression diminue sur la partie inférieure de la lame d'air, et augmente sur la partie supérieure. Ce comportement semble suggérer une limitation du débit entrant dans la lame d'air au fur et à mesure que son épaisseur diminue. Ainsi vu que la vitesse de l'écoulement à l'intérieur de la lame d'air diminue, la baisse de pression statique engendrée par la pression dynamique de l'écoulement s'affaiblit également. Le profil de pression à l'intérieur de la lame d'air tend alors à se rapprocher un peu plus des valeurs de la pression statique aux bornes de la lame d'air. La diminution du débit entrant dans la lame d'air est due à l'augmentation des pertes de charges à l'engoncement et au refoulement de l'écoulement. De façon caricaturale, il est plus « difficile » pour l'écoulement de rentrer dans la lame d'air du fait de son étroitesse, il « préfère » donc passer par l'extérieur de la façade.

L'évolution de la pression interne $\overline{c_{p_{int}}}$ avec la diminution de l'épaisseur de la lame d'air induit alors une légère augmentation du différentiel de pression net $\overline{c_{p_{net}}}$ sur la partie supérieure la façade, et une diminution significative des charges sur la partie inférieure.

On notera une légère influence de l'épaisseur de la lame d'air sur le coefficient de pression externe $\overline{c_{p_{ext}}}$ en pied de façade. Cet effet peut s'expliquer par une modification de l'écoulement qui rentre dans la lame d'air tel qu'illustrée Figure 41. La diminution du débit entrant de la lame d'air va jouer sur la structuration de l'écoulement qui contourne la rive inférieure de la façade, et impacter ainsi la pression sur sa face extérieure.

Cette configuration permet donc de souligner l'effet de la pression dynamique de l'écoulement dans la lame d'air, et sa répercussion importante sur les pressions statiques mesurées sur la face interne de la double-peau. Ici, à pressions identiques aux bornes de la lame d'air, le débit de l'écoulement dans la lame est seulement piloté par les pertes de charges à l'engoncement/refoulement de l'écoulement.

La Figure 76 trace la cartographie du différentiel de pression moyen sur la façade double-peau, pour un bâtiment haut et une direction de vent de 0°. Les mesures sont réalisées pour 4 épaisseurs de la lame d'air : 50 cm, 1m, 2m et 3m. En complément, la Figure 77 trace les profils des pressions moyennes interne, externe et du différentiel net pour les 4 épaisseurs de la lame d'air.

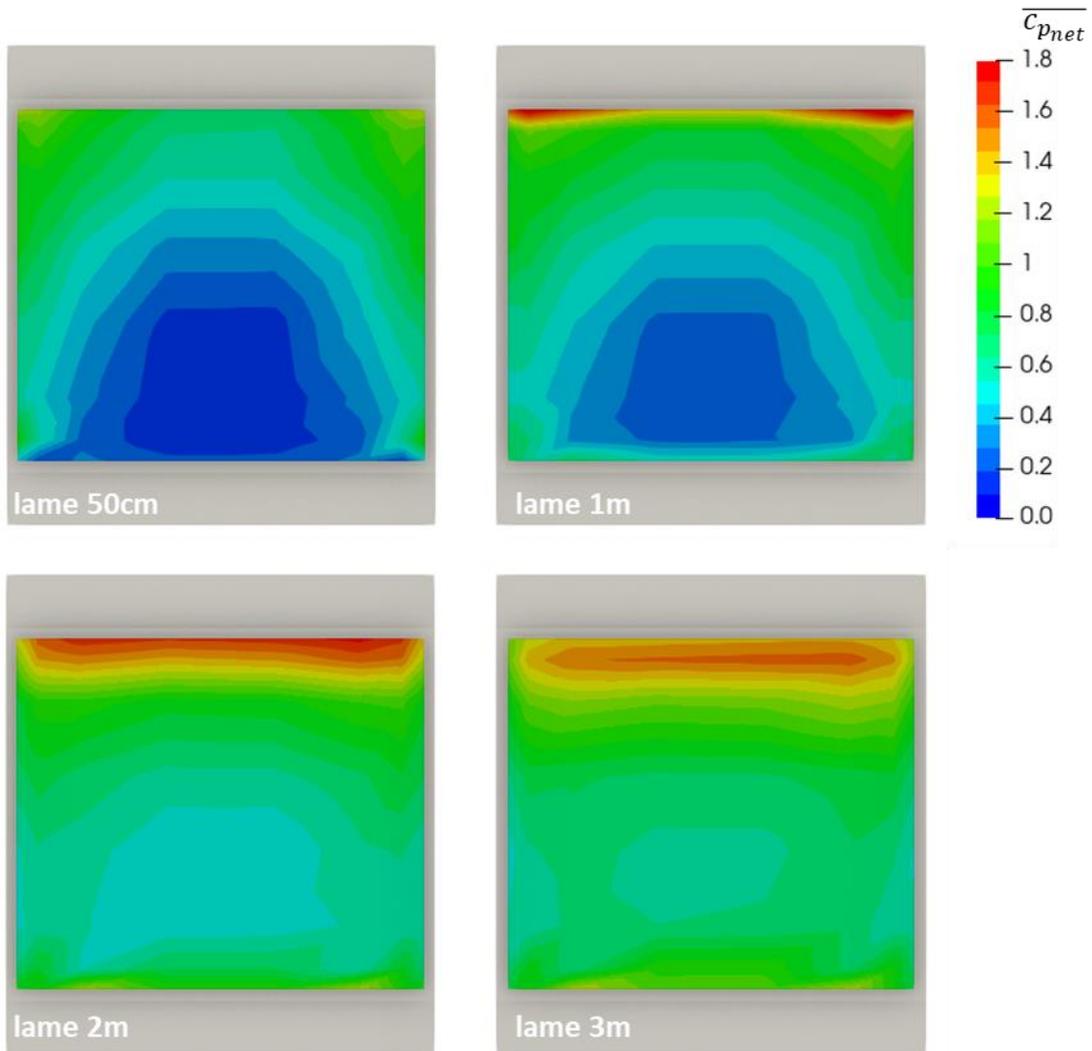


Figure 76 - Coefficients de pression moyens pour différentes pour différentes épaisseurs de lame et une direction de vent de 0° (configuration h_h_I_XX_p_00_s_n)

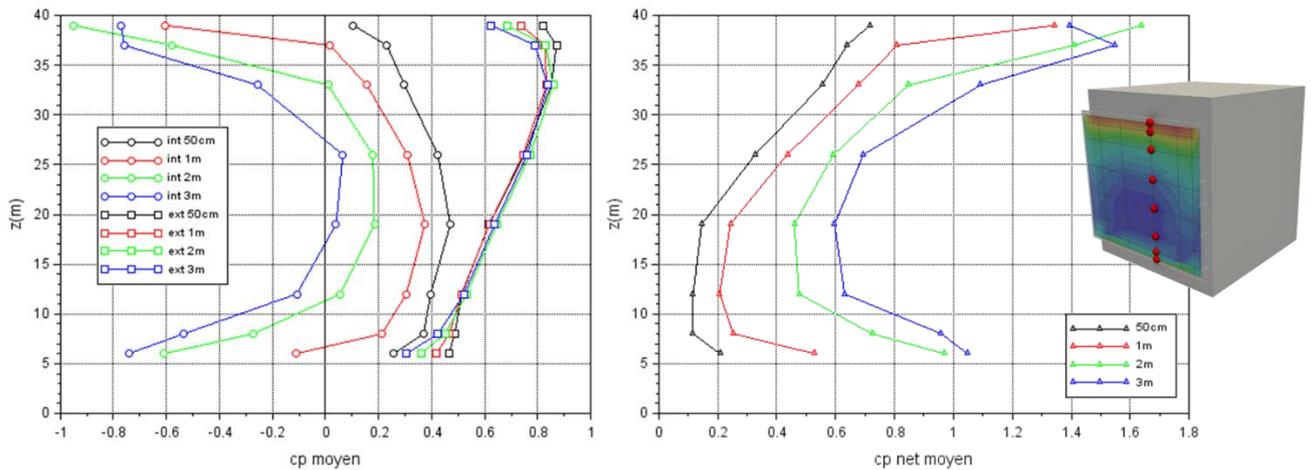


Figure 77 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau (DSF) interne, externe et net, pour trois épaisseurs de lame d'air (configuration h_h_I_XX_p_00_s_n)

À nouveau la diminution de l'épaisseur de lame d'air à une influence significative sur les charges au vent de la façade double-peau. Contrairement au cas précédent, l'épaisseur de 2m ne semble plus constituer une valeur limite pour l'augmentation des charges, puisque pour une épaisseur de 3m, les charges sont supérieures à celle obtenues pour une épaisseur de 2m. On observe à nouveau que la pression sur la face interne de la façade $\overline{c_{p_{int}}}$ augmente avec la diminution de l'épaisseur de la lame. Ce phénomène peut à nouveau être attribué à une diminution du débit rentrant dans la lame d'air du fait d'une augmentation des pertes de charges à l'entrée/sortie du canal. La pression de la lame d'air va alors s'équilibrer à une valeur plus proche des pressions statiques aux bornes de la lame d'air.

Cette analyse confirme donc que l'épaisseur de la lame d'air est également un paramètre d'ordre un pour les charges au vent sur la double-peau.

4.5 EFFET DE POROSITE DE LA FAÇADE DOUBLE-PEAU

L'étude s'intéresse à présent au cas d'une façade double-peau poreuse. Cette configuration est par exemple représentative de façades constituées de plaques non jointives, créant ainsi une porosité répartie, ou de façades pour lesquelles des aérations sont régulièrement emménagées.

Dans l'expérience modèle, la maquette de la façade double-peau est équipée d'une série de lumières rectangulaires permettant de moduler à volonté la porosité de la façade.

4.5.1 Porosité uniforme

On s'intéresse dans un premier temps au cas d'une porosité uniformément répartie sur la façade, à l'exclusion d'une bordure de 5m où la façade reste pleine. Deux configurations sont étudiées. Dans un premier cas l'ensemble des lumières sont ouvertes, créant ainsi une porosité de 15% au niveau de la zone poreuse au centre de la façade. Une seconde configuration est étudiée où une lumière sur deux est obturée, créant ainsi une porosité répartie de 8% au centre de la façade. Ces deux configurations ont été présentées Figure 16.

On s'intéresse dans un premier temps à l'effet de la porosité de la peau sur le bâtiment à niveau, sans segmentation et pour une direction de vent de 0°. La Figure 78 trace les coefficients de pression moyens mesurés sur la face externe $\overline{c_{p_{ext}}}$, interne $\overline{c_{p_{int}}}$ ainsi que le différentiel de pression moyen noté $\overline{c_{p_{net}}}$ pour les deux porosités étudiées, et les compare à une configuration avec une peau pleine. La Figure 79 propose un tracé du profil de pression interne, externe, et du différentiel correspondant. Elle consigne également les valeurs de pointe du signal de pression. La partie poreuse de la façade est délimité par des traits pointillés horizontaux rouges (8%) ou bleus (15%).

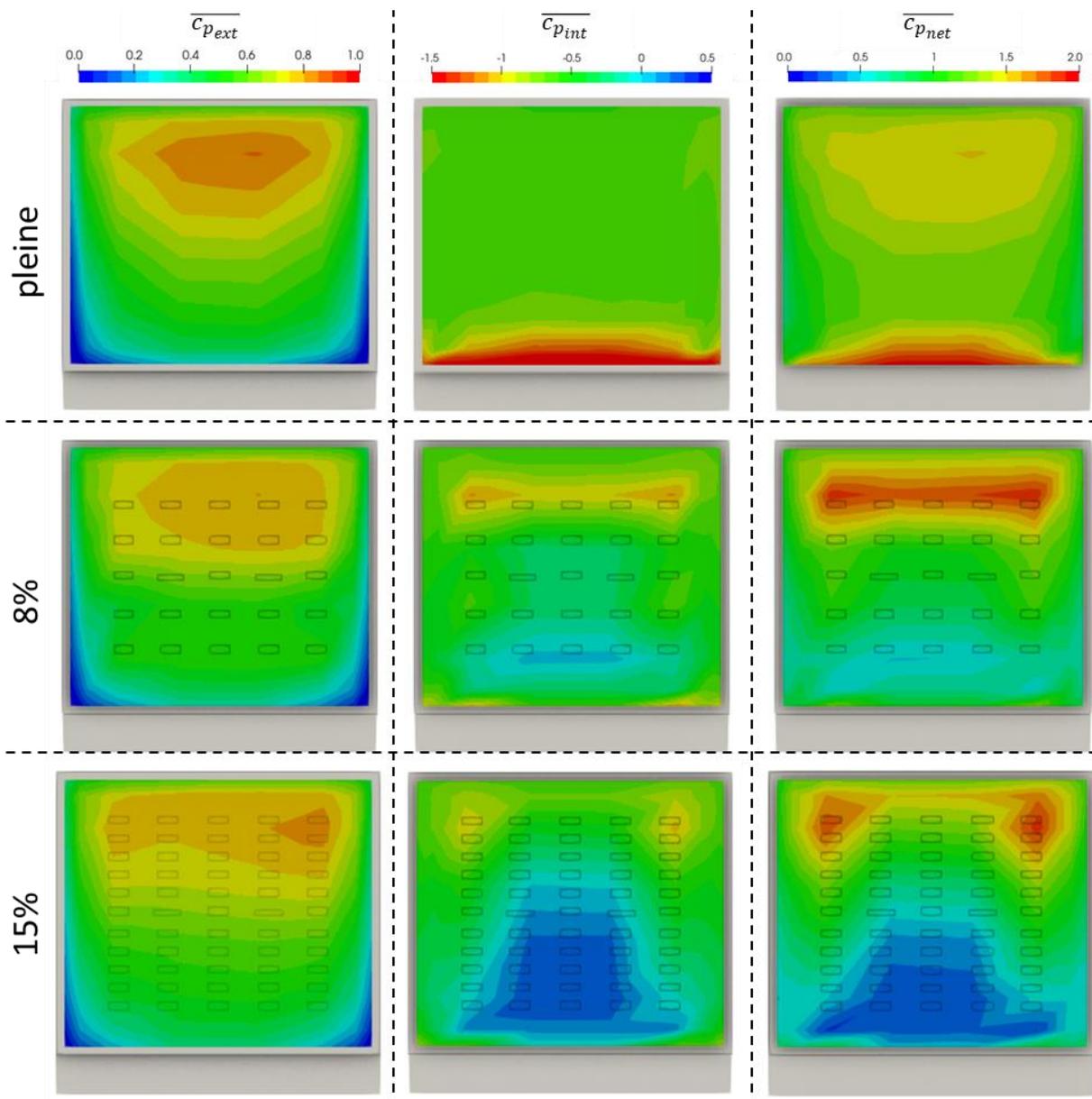


Figure 78 - Coefficients de pression moyens pour un bâtiment à niveau avec une peau à porosité variable (configuration h_n_l_20_p_XX_s_n)

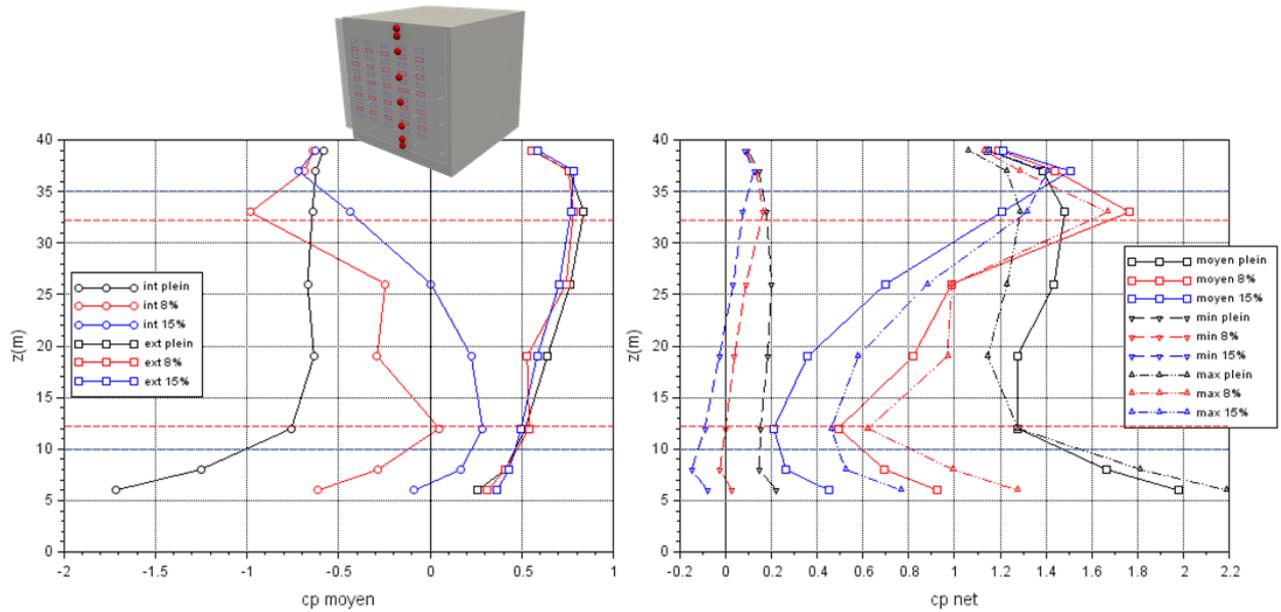


Figure 79 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne et externe, et net moyen et de pointe, pour un bâtiment à niveau avec une peau de porosité variable (rouge 8%, bleu 15%) (configuration h_n_l_20_p_XX_s_n)

Les cartographies montrent tout d'abord un impact de la porosité sur le coefficient de pression externe $\overline{c_{p_{ext}}}$. Il diminue légèrement avec l'augmentation de la porosité, et la marque du point d'arrêt s'étale sur une plus grande superficie.

Les changements sont nettement plus marqués pour le coefficient de pression interne $\overline{c_{p_{int}}}$. Les cartographies et profils montrent un changement de l'équilibre en pression dans la lame d'air, avec des niveaux de pression qui augmentent, et se rapprochent de plus en plus de la valeur de la pression sur face extérieure de la façade. L'effet est bien plus marqué sur la partie inférieure de la façade que sur la partie supérieure. En pied de façade, pour une porosité de 15%, la pression change même de signe et devient positive.

Tout en haut de la façade, les pressions dans la lame d'air $\overline{c_{p_{int}}}$ restent très basses. Cette zone correspond à la bordure de 5m sans porosité. Elle constitue une canalisation étanche reliant les basses pressions à l'ouverture en haut de la façade, et les hautes pressions de la face externe à travers les porosités. On peut donc supposer la génération d'un écoulement s'engouffrant par les porosités pour rejoindre le haut de la façade. Cet écoulement induit alors les basses pressions dans la lame d'air selon le mécanisme décrit précédemment.

La cartographie des différentiels de pression $\overline{c_{p_{net}}}$ semble calquée sur celle du coefficient de pression interne $\overline{c_{p_{int}}}$. On constate globalement une diminution significative des charges sur double-peau avec l'augmentation de la porosité. Pour une porosité de 15%, les charges moyennes en pied de façade sont quasi nulles. Le tracé des profils montre à nouveau que si le coefficient moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ est proche de 0, ce n'est pas le cas du coefficient de pointe $\widehat{c_{p_{net}}}$ qui reste supérieur à 0.5 en pied de façade. On retrouve à nouveau des zones de fortes charges au niveau de la bordure supérieure, liée à un engouffrement de l'écoulement dans la lame d'air sur cette partie sans porosité.

La Figure 80 et la Figure 81 tracent les mêmes informations pour une configuration avec un bâtiment haut.

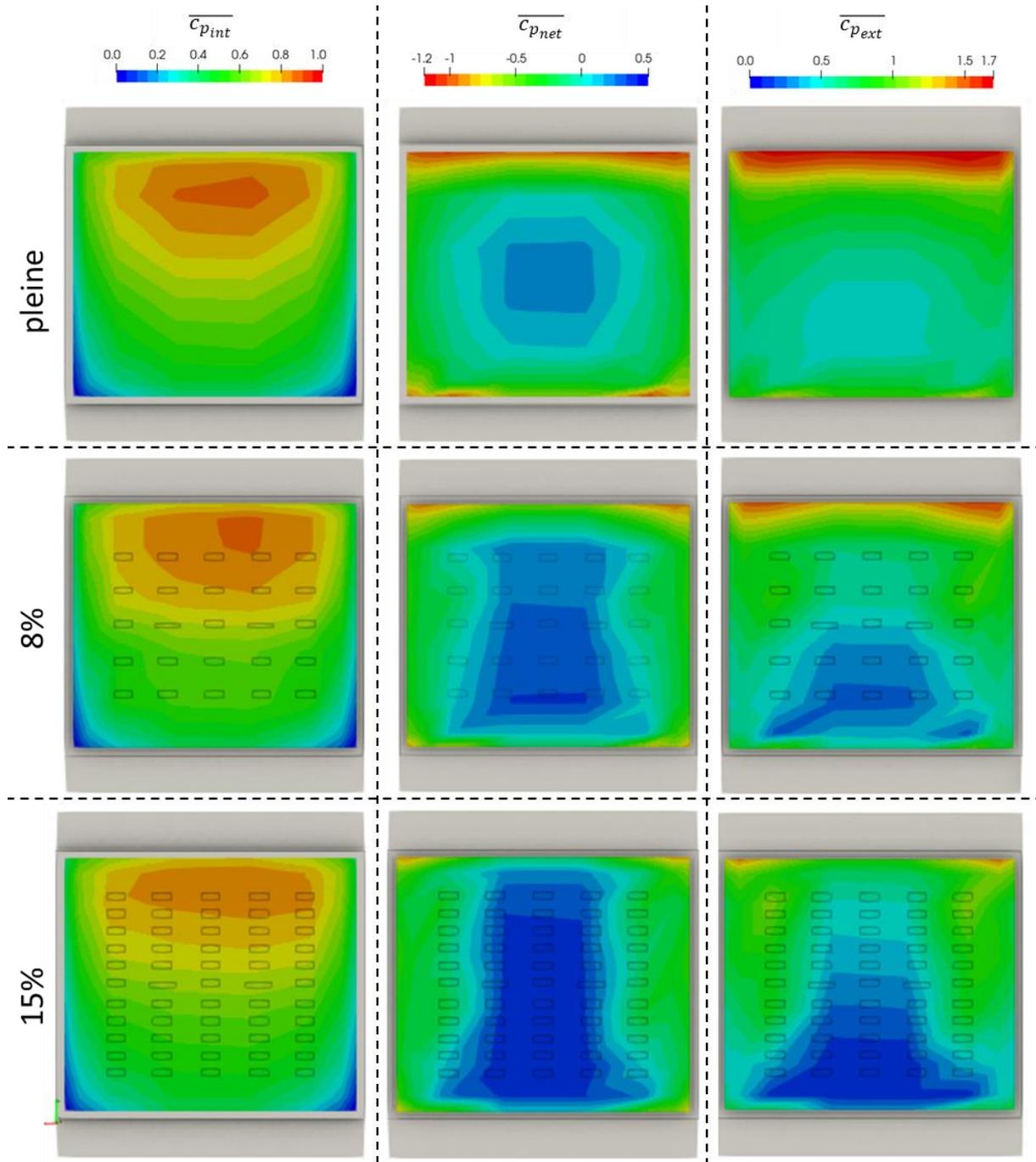


Figure 80 - Coefficients de pression moyens pour un bâtiment haut avec une peau à porosité variable (configuration h_h_l_20_p_XX_s_n)

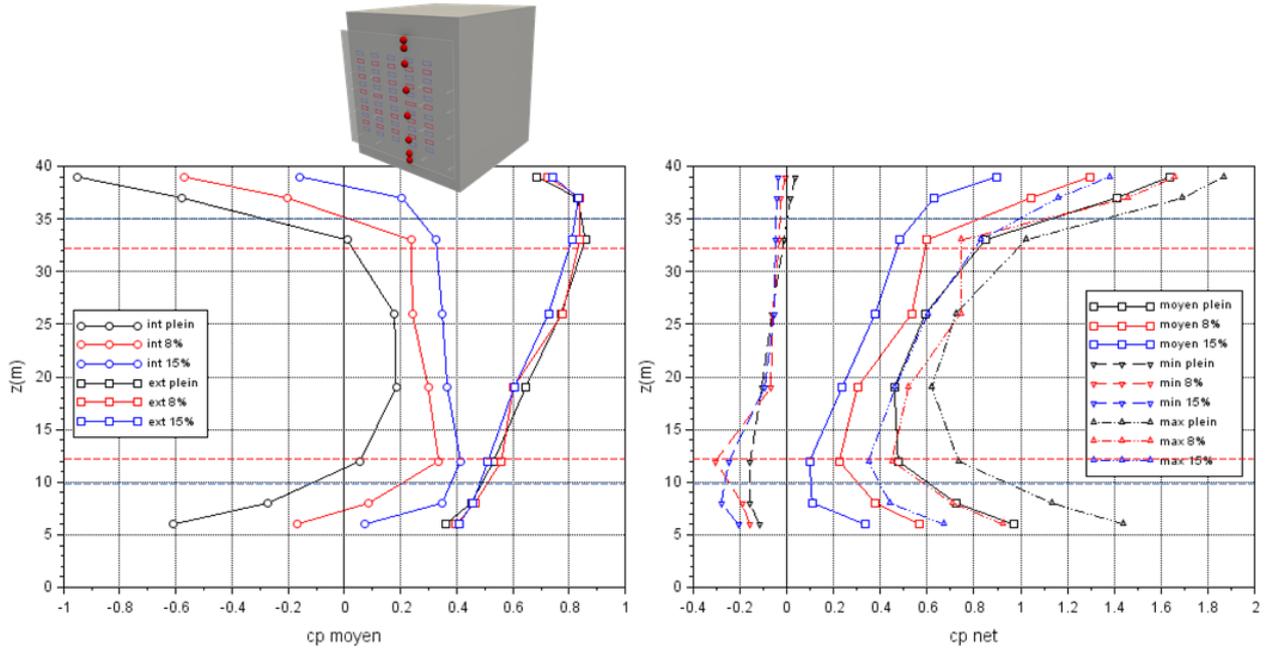


Figure 81 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne et externe, et net moyen et de pointe, pour un bâtiment haut avec une peau à porosité variable (configuration h_h_l_20_p_XX_s_n)

À nouveau l'analyse met en évidence une modification significative de l'équilibrage en pression de la lame d'air avec l'augmentation de la porosité de la peau. Les profils montrent que l'augmentation de la porosité entraîne à nouveau une augmentation de la pression dans la lame d'air $\overline{c_{p_{int}}}$, ici associée à une uniformisation du profil. Il en résulte alors un abaissement des charges nettes $\overline{c_{p_{net}}}$. Cette baisse est moins marquée que pour la configuration du bâtiment à niveau. Ceci peut s'expliquer par le fait que les différences de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la façade étaient déjà moins élevées avec une peau pleine. Cette absence de différentiel de pression élevés peut également expliquer que l'on ne retrouve pas des charges très élevées au niveau des bordures pleines de la façade comme pour le bâtiment à niveau.

La Figure 82 trace les profils des coefficients de pression dans une dernière configuration, avec un bâtiment à niveau équipé de recouvrements verticaux.

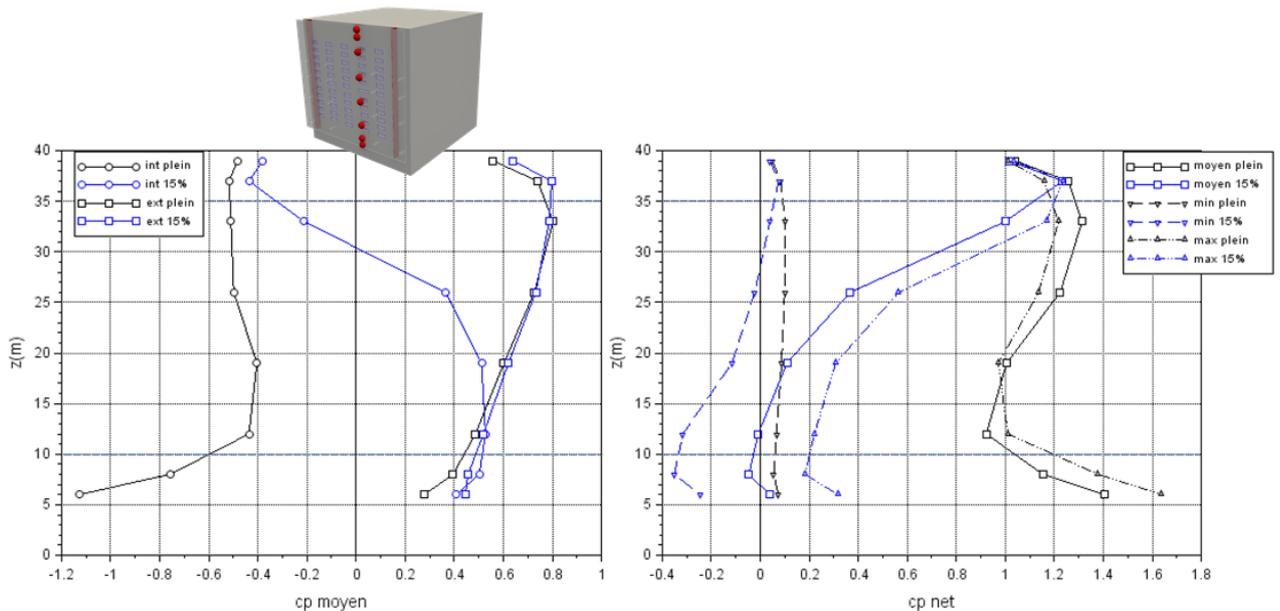


Figure 82 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne et externe, et net moyen et de pointe, pour un bâtiment à niveau, avec segmentation verticale avec une porosité de 15% (configuration h_n_l_20_p_XX_s_vert)

L'effet de la porosité dans cette configuration est encore plus marqué. En pied de façade, la pression moyenne dans la lame d'air $\overline{c_{p_{int}}}$ devient supérieure à celle de la face externe $\overline{c_{p_{ext}}}$.

Ainsi, alors que le pied de la façade était en forte compression avec une peau pleine, elle se retrouve légèrement en arrachement avec une peau poreuse. Certes les efforts moyens restent faibles, notamment en comparaison aux efforts de pointe associés, mais le basculement de l'équilibrage en pression du fait de la porosité génère un effet assez spectaculaire et contre-intuitif sur les charges au vent.

Cette dernière analyse vient confirmer que l'effet de la porosité de la double peau a un effet d'ordre un sur l'équilibrage en pression de la lame d'air, et va drastiquement changer les charges au vent sur la façade double peau.

4.5.2 Porosité localisée

L'étude s'intéresse à présent à un cas où la porosité de la double-peau n'est plus uniformément répartie sur la surface, mais localisée. Ainsi seules les lumières situées sur la rangée la plus haute et la plus basse de la façade sont laissées ouvertes, tel que présenté Figure 16. La porosité est alors ramenée à 3%, mais concentrée aux extrémités de la façade. On se place dans un premier temps dans une configuration avec un bâtiment à niveau, équipé de segmentations verticales pour une direction de 0° . La Figure 83 trace les coefficients de pression moyens mesurés sur la face externe $\overline{c_{p_{ext}}}$, interne $\overline{c_{p_{int}}}$ ainsi que le différentiel de pression moyen noté $\overline{c_{p_{net}}}$ avec cette porosité localisée, et les compare à une configuration avec une peau pleine. La Figure 84 propose un tracé du profil de pression interne, externe, et du différentiel correspondant. Elle consigne également les valeurs de pointe du signal de pression. La partie poreuse de la façade est localisée par des traits pointillés horizontaux.

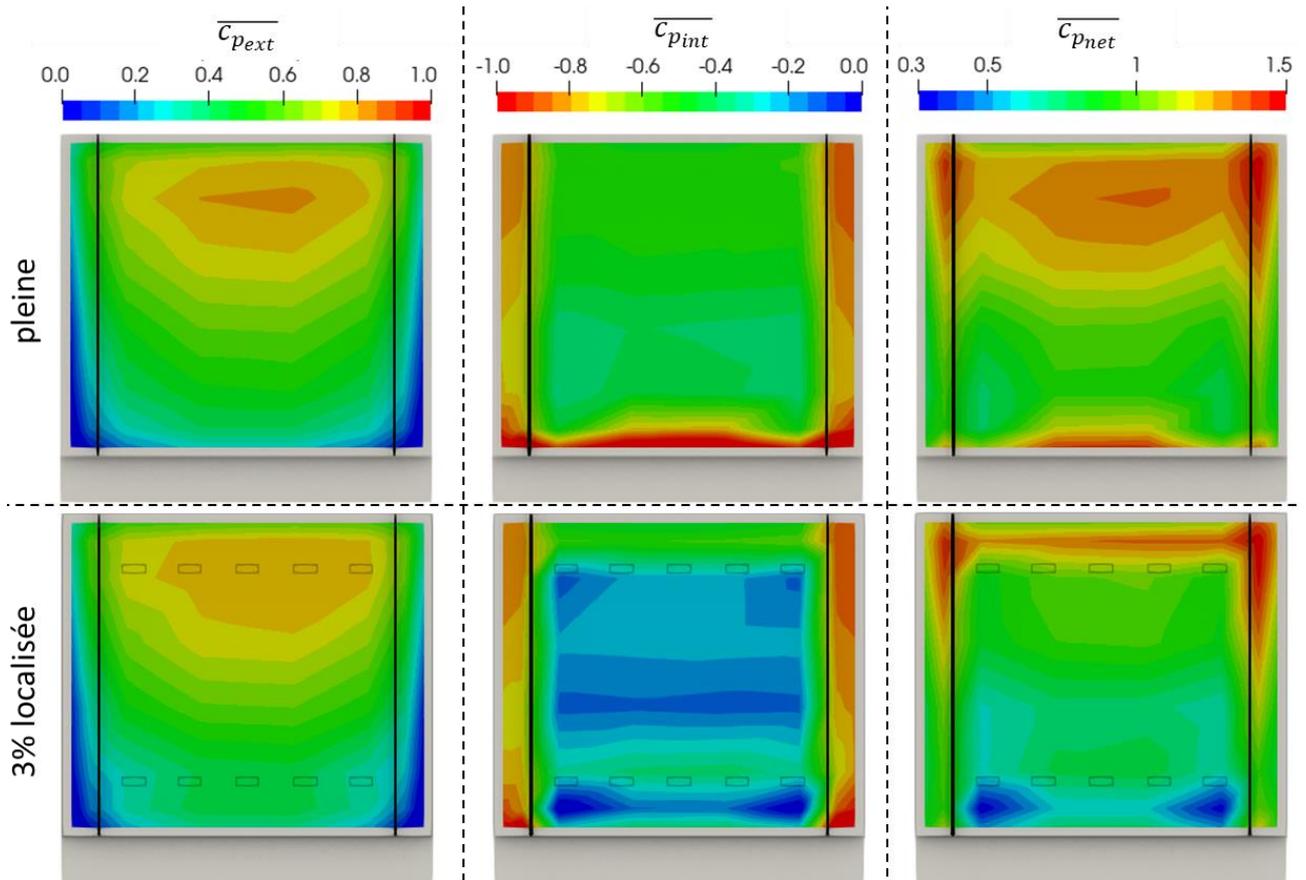


Figure 83 - Coefficients de pression moyens pour un bâtiment à niveau avec segmentation verticale avec une peau à porosité localisée (configuration h_n_l_20_p_XX_s_vert)

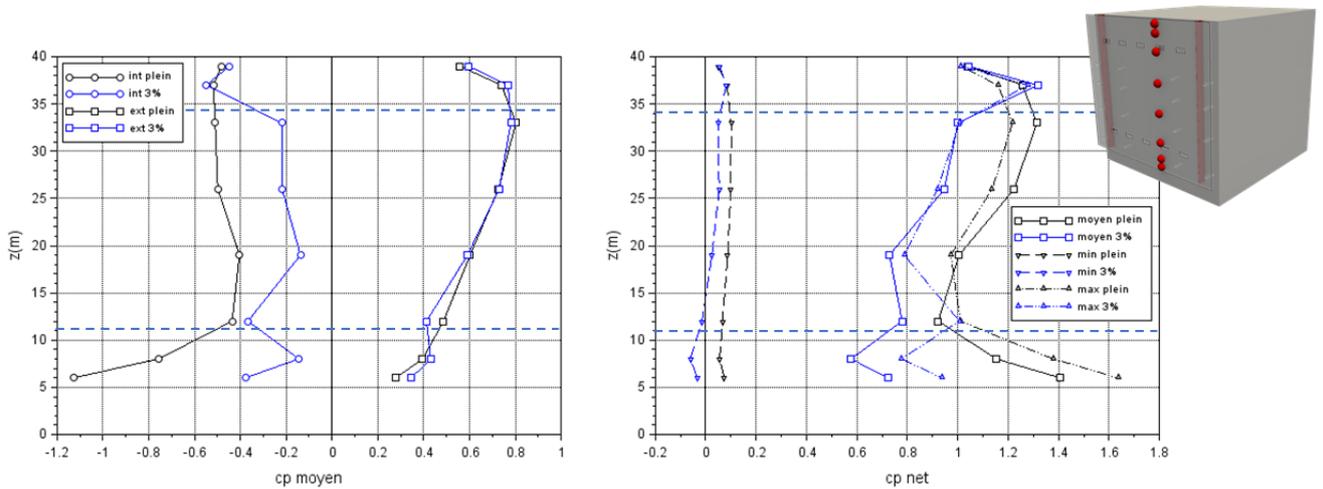


Figure 84 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne et externe, et net moyen et de pointe, pour un bâtiment à niveau avec segmentation verticale avec une peau à porosité localisée (configuration h_n_l_20_p_XX_s_vert)

L'analyse des figures montre que cette porosité localisée suffit à changer de façon significative l'équilibrage en pression de la lame d'air. Le changement le plus marqué se situe en pied de façade, où la zone de très basse pression induite par l'engouffrement de l'écoulement dans la lame d'air a quasiment disparu. De façon plus globale, la pression à l'intérieur de la lame d'air $\overline{c_{p_{int}}}$ est plus élevée, contribuant ainsi une réduction des charges nettes $\overline{c_{p_{net}}}$ sur toute la façade double-peau. On retrouve tout en haut de la façade, comme pour la porosité répartie, des charges localement fortes sur la bordure sans porosité. Elles correspondent à nouveau à

un engouffrement local de l'écoulement dans la lame d'air, la porosité permettant de connecter directement les hautes pressions sur la face externe de la double peau avec les basses pressions tout en haut de la lame d'air.

La Figure 85 et la Figure 86 présentent la même analyse pour une configuration avec un bâtiment haut, toujours équipé de segmentations verticales.

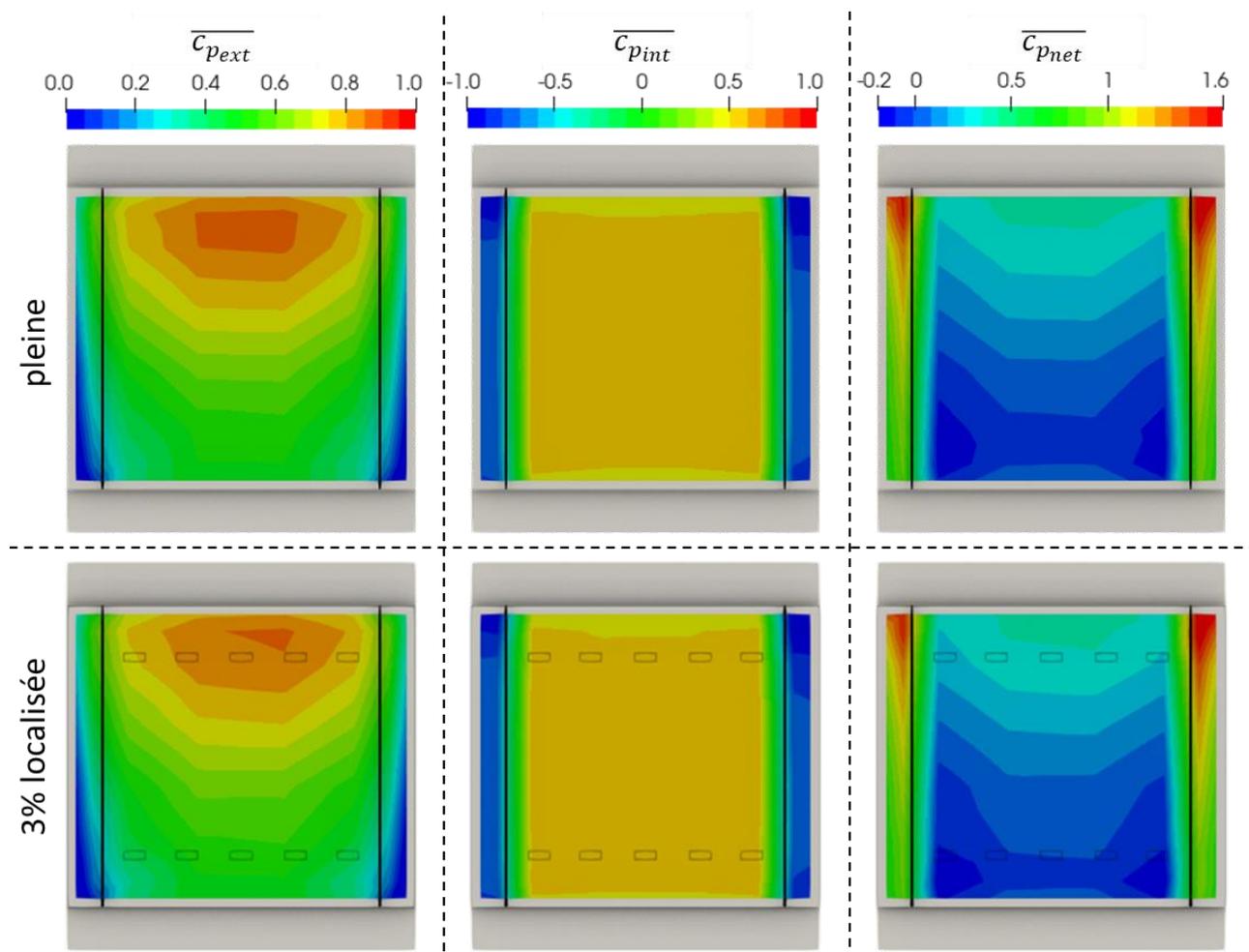


Figure 85 - Coefficients de pression moyens pour un bâtiment à niveau avec segmentation verticale avec une peau à porosité localisée (configuration h_h_l_20_p_XX_s_vert)

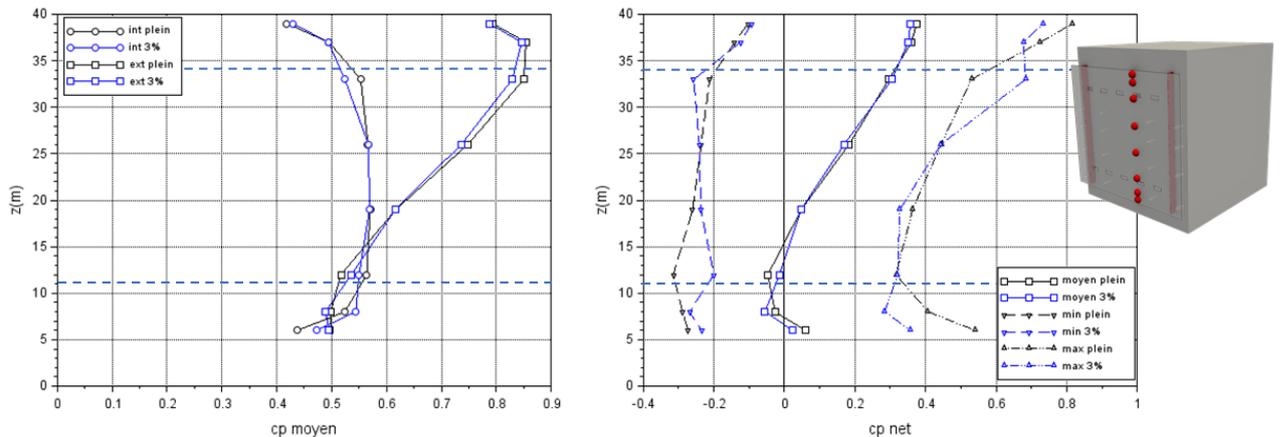


Figure 86 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne et externe, et net moyen et de pointe, pour un bâtiment à haut avec segmentation verticale avec une peau à porosité localisée (configuration h_n_l_20_p_XX_s_vert)

L'analyse montre alors que pour cette configuration, la porosité localisée n'a que très peu d'impact sur l'équilibrage en pression de la lame d'air. Les profils des coefficients de pression moyenne sont quasiment superposés. On notera juste une légère diminution du différentiel de pression de pointe en pied de façade. Comme pour la porosité répartie, le différentiel de pression entre la face interne et la face externe était déjà plus faible dans cette configuration avec une peau pleine. Ce qui peut alors expliquer que l'influence de la porosité est alors moins marquée qu'avec un bâtiment à niveau.

Cette dernière analyse montre alors que l'effet de la porosité va fortement dépendre de la manière dont elle est agencée, mais également des autres paramètres de l'équilibrage en pression de la lame d'air.

4.5.3 Peau poreuse entièrement recoupée

On s'intéresse à présent au cas d'une double peau entièrement recoupée sur ces 4 pans. Il est représentatif de double-peaux qui seraient aménagées sous forme de cellules indépendantes. Dans un premier temps, on considère une double-peau non poreuse. La Figure 87 trace les coefficients de pression moyens mesurés sur la face externe $\overline{c_{p_{ext}}}$, interne $\overline{c_{p_{int}}}$ ainsi que le différentiel de pression moyen noté $\overline{c_{p_{net}}}$ pour une peau pleine entièrement recoupée, et ce pour deux configurations de bâtiments : bas et haut. La Figure 84 propose un tracé du profil de pression interne, externe, et du différentiel correspondant. La limite de la zone recoupée est tracée sous forme d'un pointillé bleu.

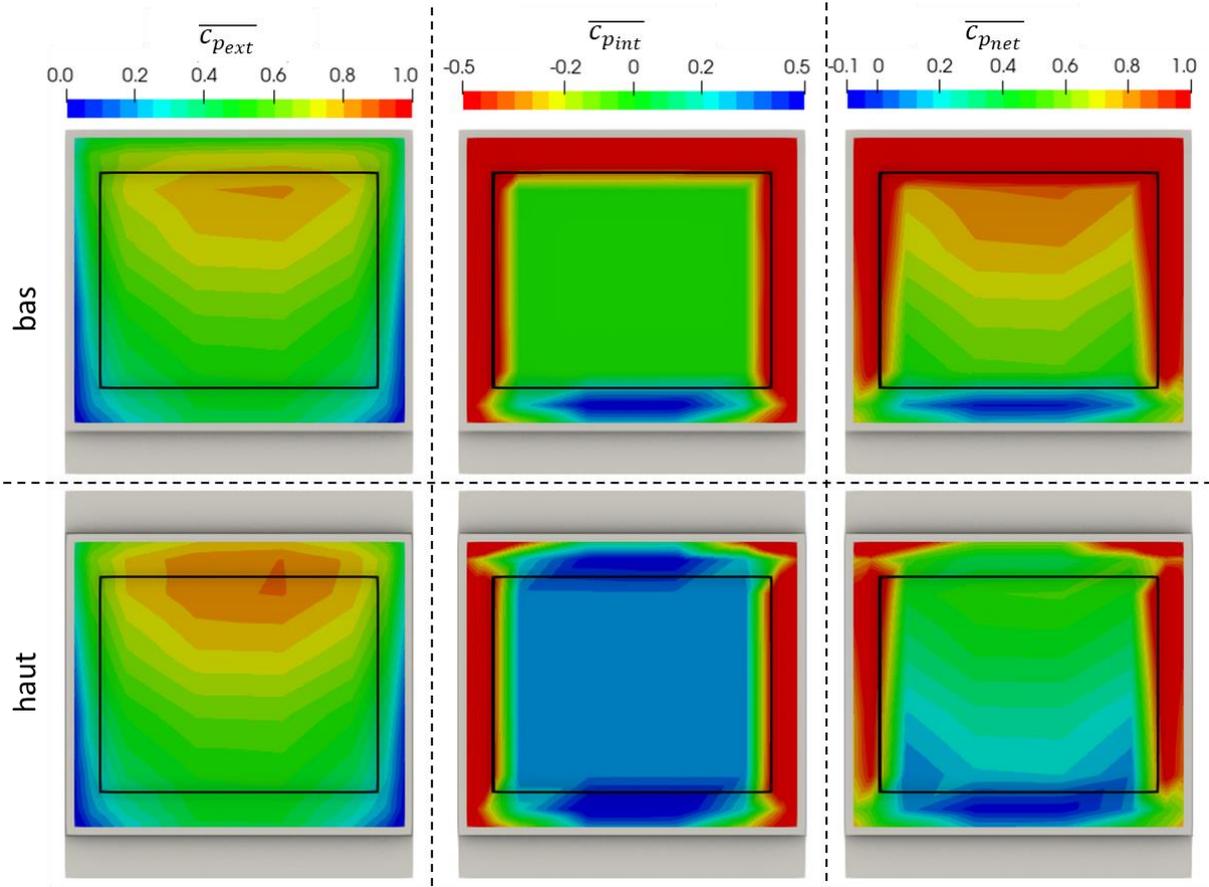


Figure 87 - Coefficients de pression moyens pour un bâtiment bas et haut équipé d'une peau pleine entièrement recoupée (configuration h_x_l_20_p_00_s_p)

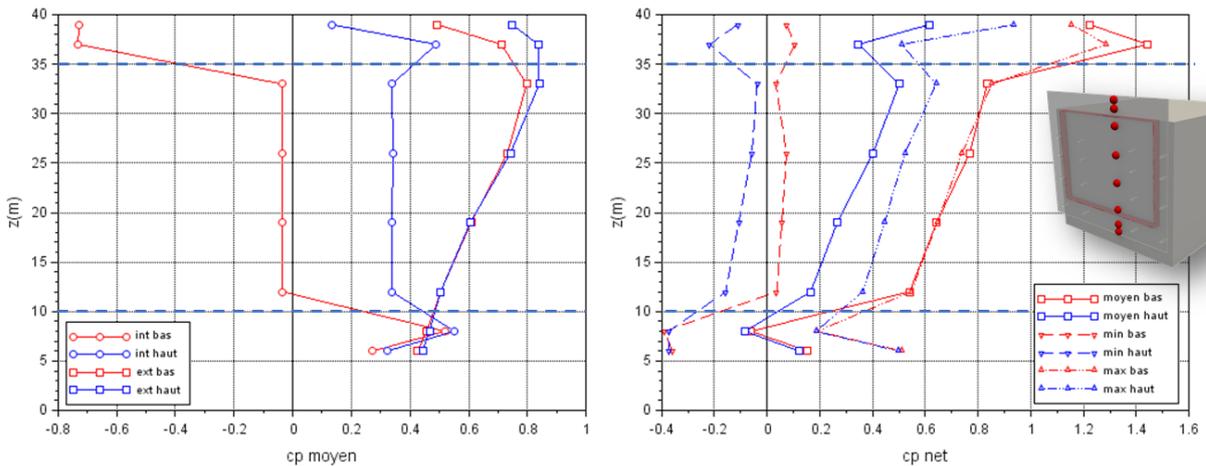


Figure 88 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne et externe, et net moyen et de pointe, pour un bâtiment bas et haut équipé d'une peau pleine entièrement recoupée (configuration h_x_l_20_p_00_s_p)

L'analyse des figures montre que le recoupement sur les 4 pans induit une homogénéisation parfaite de la pression moyenne $\overline{c_{p_{int}}}$ à l'intérieur de la lame d'air. Le profil du différentiel de pression $\overline{c_{p_{net}}}$ sur la façade double-peau est alors directement calqué sur celui de la pression externe $\overline{c_{p_{ext}}}$, soustrait de la valeur uniforme de la pression à l'intérieur de la lame d'air $\overline{c_{p_{int}}}$.

La peau étant entièrement recoupée, on aurait pu s'attendre à ce que la pression à l'intérieur de la lame d'air soit égale à la pression statique de la veine d'essai, et donc obtenir un coefficient de pression nul dans la lame d'air ainsi recoupée. Or non seulement cette pression n'est pas nulle, mais elle est aussi différente dans les deux configurations de bâtiment étudiées. Elle est proche de 0 et légèrement négative pour le bâtiment bas, et de l'ordre de +0.35 pour le bâtiment haut. Les recoupements sont équipés d'un joint torique sur un de leur bord, permettant d'assurer une étanchéité avec la façade du bâtiment. Ils sont attachés à la façade double-peau par deux tenons, mais sans dispositif assurant l'étanchéité entre le recoupement et la face interne de la double-peau. On peut alors soupçonner l'existence de fuites tout du long du pourtour du recoupement. La pression à l'intérieur de la lame d'air va ainsi s'équilibrer à la moyenne des pressions des fuites sur tout le pourtour du recoupement. Cet équilibrage va se faire de manière quasi-instantanée. La Figure 89 trace le signal de pression pour deux prises de pression positionnées sur la face interne de la double-peau, et situées de façon diamétralement opposée dans la zone recoupée. La figure montre alors que les signaux de pression sont parfaitement égaux. La pression fluctue de manière homogène dans toute la zone recoupée. Ces fluctuations sont induites par les fluctuations de la pression aux bornes du pourtour du recoupement, du fait des structures turbulentes de la Couche Limite Atmosphérique.

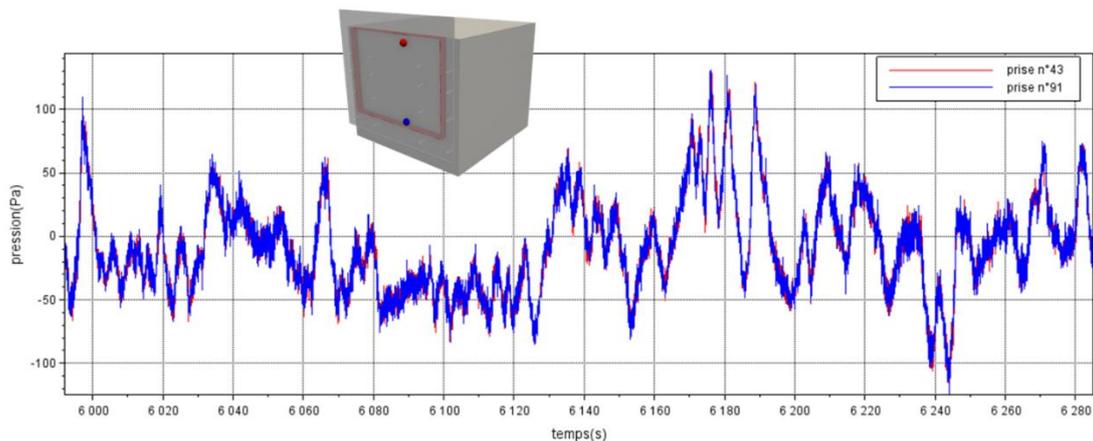


Figure 89 - extrait des signaux temporels de pression, en deux points de la lame d'air (configuration h_b_l_20_p_00_s_p)

L'équilibrage en pression de la lame d'air dans la zone recoupée va donc se faire de façon très différente suivant comment les fuites de la segmentation vont influencer sur cet équilibrage. C'est donc un paramètre assez aléatoire qui peut conditionner très fortement les charges sur la double-peau. Cette configuration peut donc s'avérer être problématique dans le cadre d'un dimensionnement précis des charges au vent sur la double-peau.

On s'intéresse à présent au cas d'une peau entièrement recoupée et poreuse. On considère une porosité uniformément répartie, de 8% et de 15%, comme étudiée au §4.5.1. La Figure 90 et la Figure 92 tracent les coefficients de pression moyens mesurés sur la façade respectivement pour un bâtiment haut et pour un bâtiment bas, pour deux porosités différentes, et les comparent au cas d'une peau pleine présentés précédemment. La Figure 91 et Figure 93 tracent les profils correspondants.

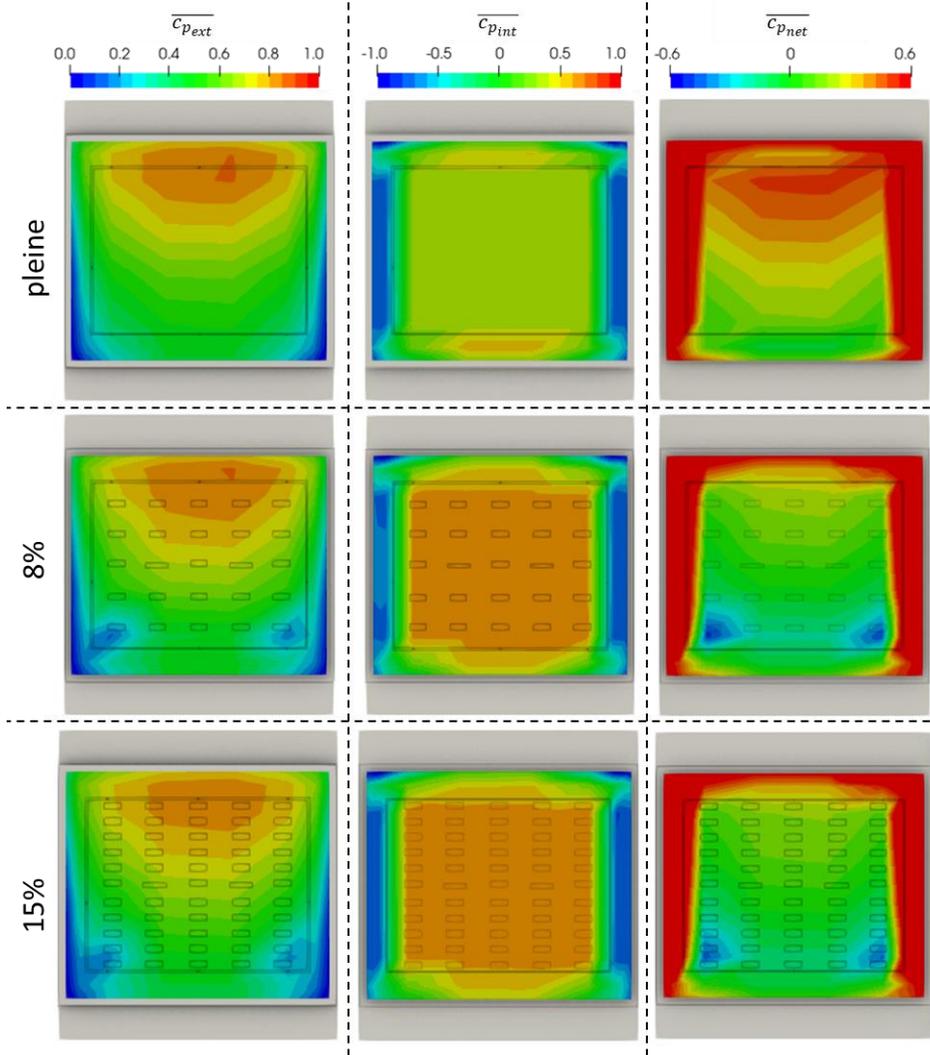


Figure 90 – Coefficients de pression moyens pour un bâtiment haut équipé d’une peau à porosité variable entièrement recoupée (configuration h_h_l_20_p_xx_s_p)

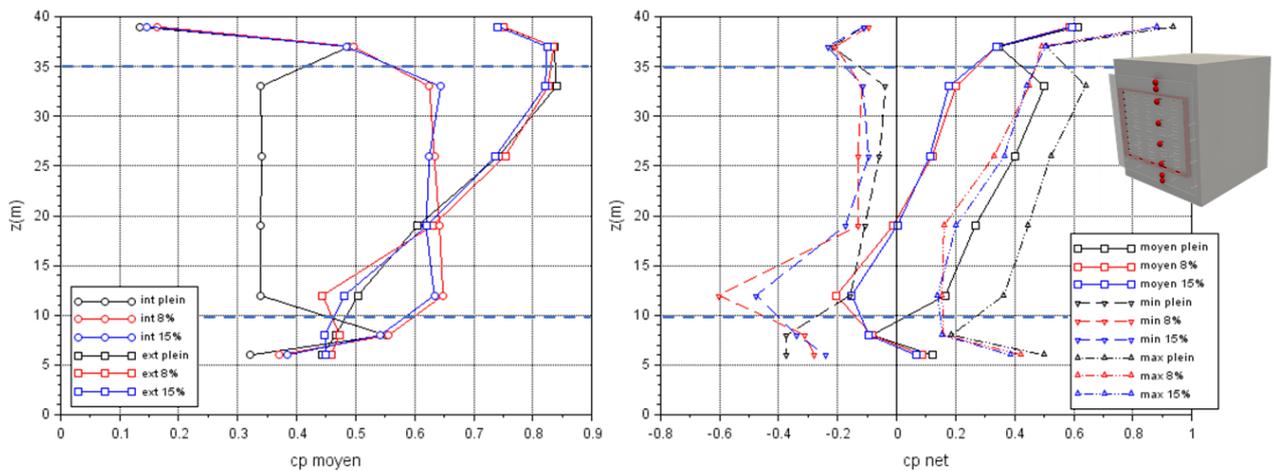


Figure 91 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne et externe, et net moyen et de pointe, pour un bâtiment haut équipé d’une peau à porosité variable entièrement recoupée (configuration h_h_l_20_p_xx_s_p)

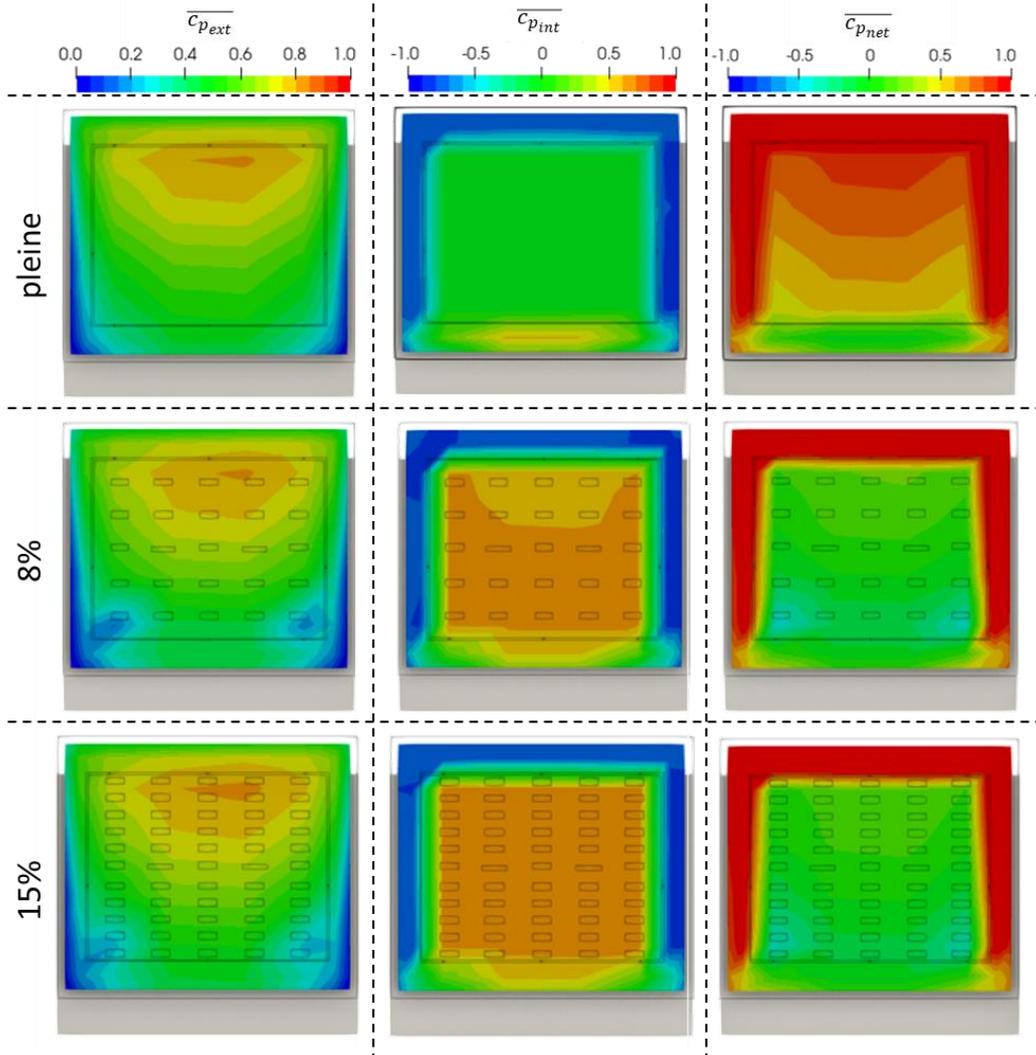


Figure 92 – Coefficients de pression moyens pour un bâtiment bas équipé d'une peau à porosité variable entièrement recoupée (configuration h_h_l_20_p_xx_s_p)

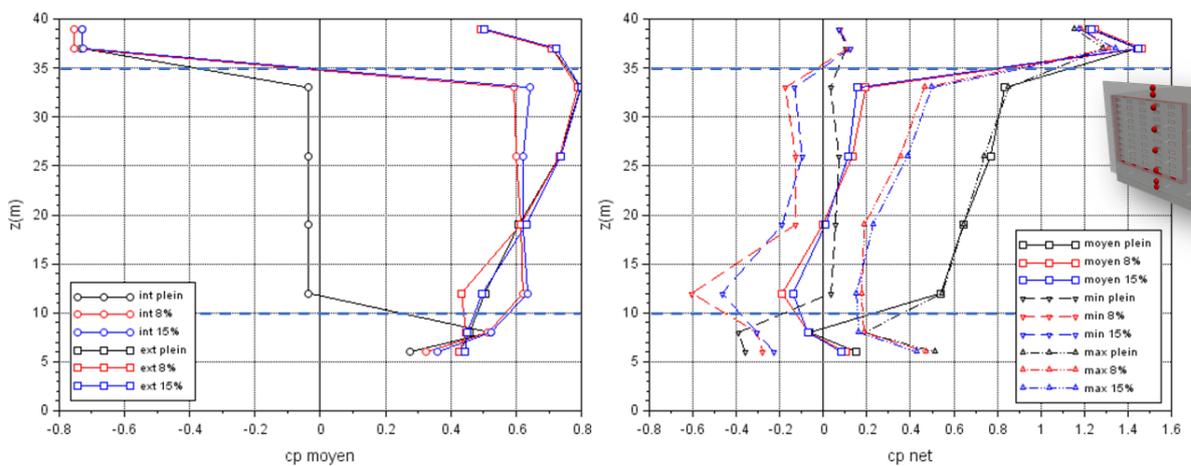


Figure 93 - profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne et externe, et net moyen et de pointe, pour un bâtiment bas équipé d'une peau à porosité variable entièrement recoupée (configuration h_h_l_20_p_xx_s_p)

Les figures montrent alors que dans les deux configurations, la présence de la porosité va de nouveau changer l'équilibrage en pression dans la lame d'air recoupée. La pression $\overline{c_{p_{int}}}$ reste relativement homogène dans toute la zone recoupée. La Figure 94 trace, par analogie à la

Figure 89, le signal de pression pour deux prises de pression positionnées sur la face interne de la double-peau, et située de façon diamétralement opposée dans la zone recoupée.

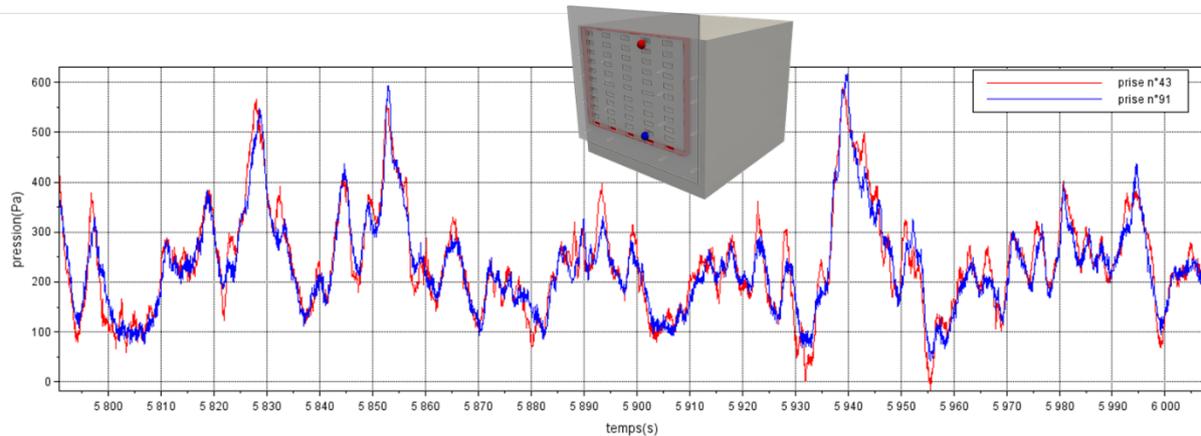


Figure 94 - extrait des signaux temporels de pression, en deux point de la lame d'air (configuration h_b_l_20_p_15_s_p)

A nouveau les signaux sont proches, et montrent que l'homogénéisation spatiale à l'échelle de la zone recoupée se fait de façon quasi-instantané dans le temps. On notera cependant que les signaux sont moins synchrones que ce qui avait pu être observé avec une peau pleine, ce qui montre qu'il existe quand même de légères variations dans l'équilibrage de pression à l'échelle de la zone recoupée.

La valeur à laquelle s'équilibre la pression $\overline{c_{p_{int}}}$ dans la lame d'air est identique pour les deux valeurs de la porosité, et pour les deux hauteurs de bâtiment. La pression dans la lame d'air s'équilibre en fait à la valeur moyenne de la pression $\overline{c_{p_{ext}}}$ sur la face externe de la zone recoupée. Compte tenu du gradient de pression sur la face externe (plus élevé en haut qu'en bas), la pression interne $\overline{c_{p_{int}}}$ sera plus faible que la pression externe $\overline{c_{p_{ext}}}$ sur la partie supérieure de la zone recoupée, et la pression interne $\overline{c_{p_{int}}}$ sera plus forte que pression externe $\overline{c_{p_{ext}}}$ sur la partie inférieure.

En termes de différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$, il en résulte alors que la partie supérieure de la zone recoupée est légèrement en compression, alors que la partie inférieure de la zone recoupée est légèrement en arrachement. Les valeurs moyennes $\overline{c_{p_{net}}}$ sont faibles, mais les valeurs de pointes $\widehat{c_{p_{net}}}$ sont plus élevées, et peuvent être négatives ou positives.

Afin d'illustrer cette dynamique, la Figure 95 trace les PDF des signaux de pression interne, externe et net, en 3 points de la façade pour une configuration avec un bâtiment bas.

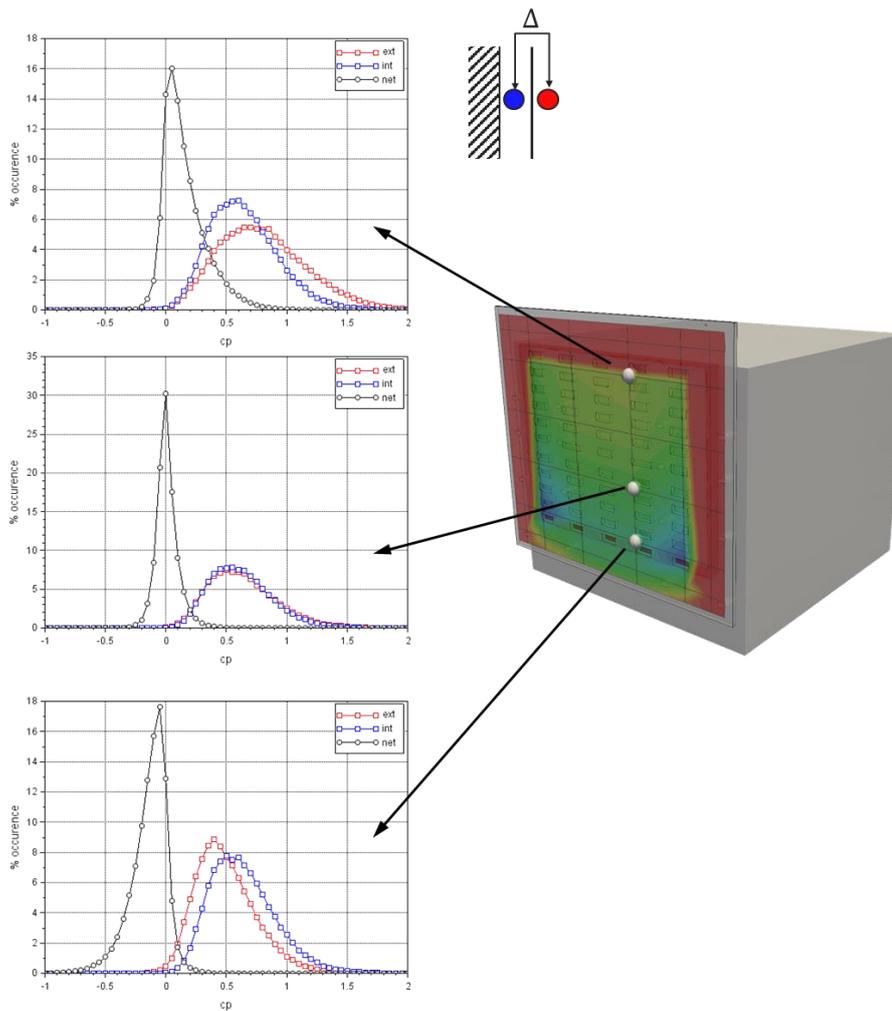


Figure 95 - PDF du coefficient de pression, intérieur, extérieur et net, en trois point de la façade double-peau (configuration h_b_I_20_p_15_s_p)

La figure montre alors que les PDF de pression interne $\overline{c_{p_{int}}}$ sont identiques sur les 3 points de mesure, mettant alors en évidence une dynamique homogène dans toute la zone recoupée, et ce en accord avec les signaux temporels de pression vus Figure 94. La PDF de pression externe $\overline{c_{p_{ext}}}$ évolue par contre entre la partie haute et la partie basse de la zone recoupée, et ce du fait du gradient de vent amont au bâtiment. Le décalage entre la PDF de pression externe et la PDF de pression interne semble alors façonner la PDF du différentiel de pression $\overline{c_{p_{net}}}$. Au centre de la zone recoupée, on peut constater que les PDF de pression externe et interne sont quasiment superposées. La PDF du différentiel de pression est alors très étroite et centrée sur une valeur proche de 0, indiquant ainsi que la façade sera alternativement en compression et en arrachement. Sur la partie haute de la zone recoupée, la PDF du différentiel de pression est décentrée vers des valeurs positives, ce qui semble indiquer que la façade sera alors le plus souvent en compression. Au contraire, sur la partie inférieure de la zone recoupée, la PDF du différentiel de pression est décentrée vers des valeurs négatives, montrant ainsi que la façade sera principalement en arrachement.

On notera également sur les profils de la Figure 93 que les valeurs de pointes $\widehat{c_{p_{net}}}$ sont proches pour les deux valeurs de la porosité de la double-peau, ainsi que pour les deux hauteurs de bâtiments. L'influence du taux de porosité sur l'équilibrage en pression semble donc assez faible.

La Figure 96 trace les coefficients de pression moyens mesurés sur la face externe $\overline{c_{p_{ext}}}$, interne $\overline{c_{p_{int}}}$, ainsi que le différentiel de pression moyen noté $\overline{c_{p_{net}}}$ pour une peau poreuse à 15%, entièrement recoupée, et ce pour deux configurations de bâtiments : bas et haut. La Figure 97 propose un tracé des profils de pression correspondants. Les figures sont donc analogues à la Figure 87 et à la Figure 88, mais cette fois-ci avec une peau poreuse à 15%.

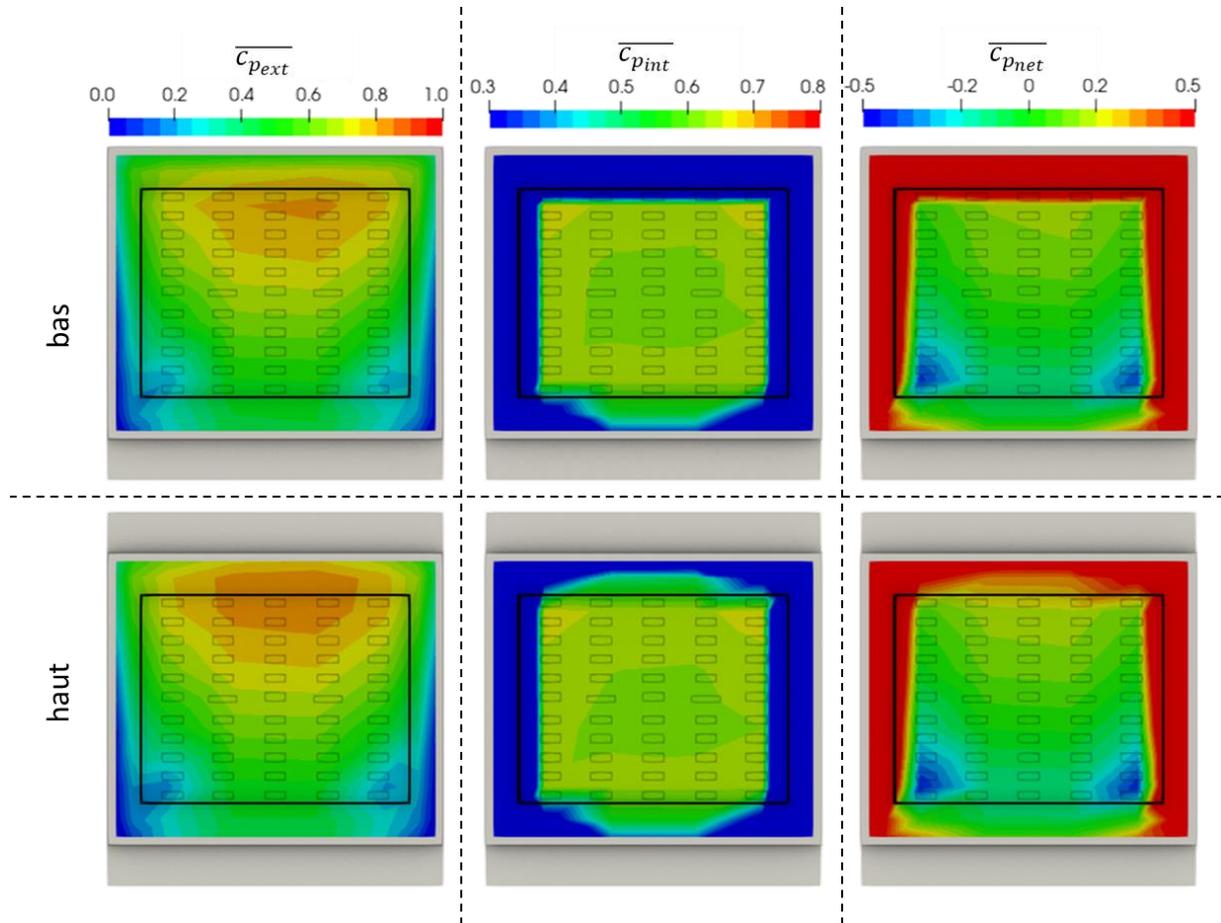


Figure 96 - Coefficients de pression moyens pour un bâtiment bas et haut équipé d'une peau poreuse à 15% entièrement recoupée (configuration h_x_l_20_p_15_s_p)

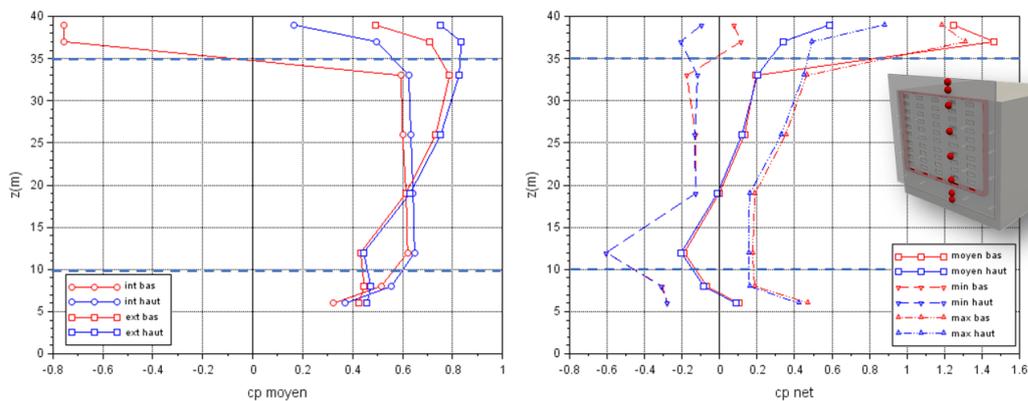


Figure 97 – profil du coefficient de pression moyen sur la façade double-peau interne et externe, et net moyen et de pointe, pour un bâtiment bas (rouge) et haut (bleu) équipé d'une peau poreuse à 15% entièrement recoupée (configuration h_x_l_20_p_15_s_p)

Contrairement à ce qui a pu être observé pour une peau pleine entièrement recoupée, les profils de pression dans la zone recoupée sont ici identiques pour les deux hauteurs de

bâtiments. L'équilibrage en pression est non seulement identique en moyenne, mais également pour les valeurs de pointe. Ceci semble donc indiquer que pour une façade double-peau entièrement recoupée et poreuse, l'équilibrage en pression va se faire uniquement à partir de la dynamique de la pression sur la face externe de la zone recoupée, et ce de manière indépendante de l'écoulement sur le reste de la façade double-peau. C'est une hypothèse forte qui peut être utile pour le dimensionnement de grandes façades double-peau.

La cartographie du différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ met en évidence deux zones d'arrachement plus élevées sur les coins inférieurs de la zone recoupée. Ces zones d'arrachement seraient liées à un écoulement se constituant dans la lame d'air et résultant de la différence de pression externe entre le haut et le bas de la zone recoupée. Cet écoulement est illustré par une simulation numérique Figure 98. Il s'engouffrerait dans la lame d'air sur la partie supérieure de la zone recoupée, et s'échapperait par la partie inférieure, a priori préférentiellement par les côtés, et ce de façon cohérente avec les arrachements constatés sur la cartographie du différentiel de pression.

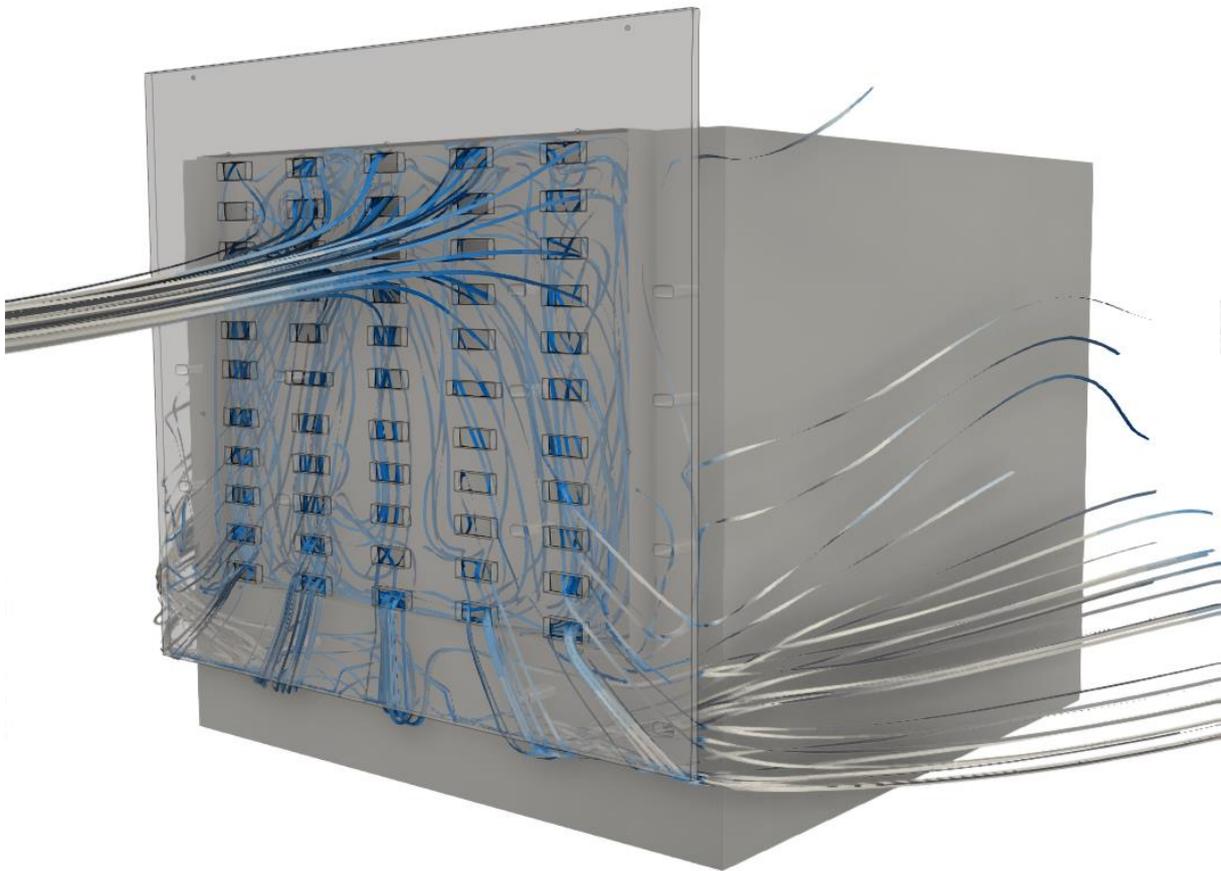


Figure 98 - structure de l'écoulement au sein de la zone recoupée issu d'une simulation numérique (configuration h_b_l_20_p_15_s_p)

Cette configuration est intéressante, car la faible dépendance à la porosité et à l'écoulement autour du bâtiment permet d'avoir une bonne maîtrise de l'équilibrage en pression de la lame d'air et des charges au vent. Cette configuration est en fait décrite dans le §7.2.10 de l'Eurocode [8] avec la notion de :

« murs et les toitures comportant une paroi (enveloppe) intérieure imperméable et une paroi extérieure perméable avec une perméabilité à peu près uniformément répartie »

Dans ce cas l' Eurocode propose l'approximation suivante pour le différentiel de pointe :

$$\widehat{c_{p_{net}}} = \frac{2}{3} \widehat{c_{p_{ext}}} \text{ pour les compressions}$$

$$\widehat{c_{p_{net}}} = \frac{1}{3} \widehat{c_{p_{ext}}} \text{ pour les arrachements}$$

La Figure 99 trace à nouveau le profil du différentiel de pression sur un peau entièrement recoupée et poreuse à 15% en le comparant avec le dimensionnement proposé par l'Eurocode.

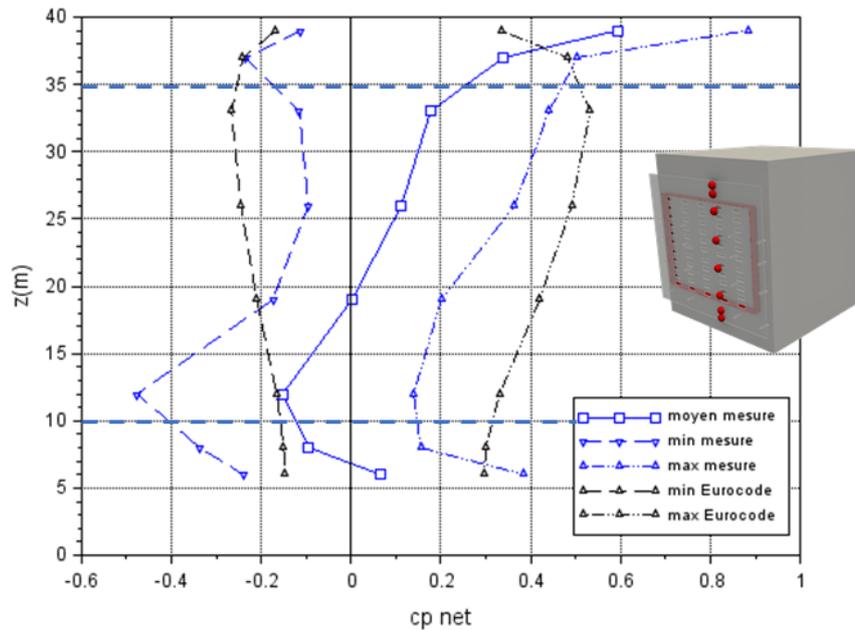


Figure 99 – comparaison des mesures du différentiel de pointe par rapport aux valeurs proposées par l'Eurocode (configuration h_h_I_20_p_15_s_p)

La figure montre alors que les valeurs proposées par l'Eurocode sont du même ordre de grandeurs que les pointes effectivement mesurées, tout en restant légèrement conservatives, ce qui est généralement le cas avec les dimensionnements proposés par l'Eurocode. On notera cependant que les arrachements de pointes en pied de façade sont légèrement sous-estimés par le dimensionnement Eurocode, par rapport à ce qui a été effectivement mesuré en soufflerie.

4.6 PEAU PERIPHERIQUE

L'étude s'intéresse à présent au cas d'une double-peau se propageant sur les quatre façades du bâtiment, sans aucun recouvrement, tel qu'illustré Figure 22. Les analyses des mesures précédentes ont montré que la pression dans la lame d'air allait s'équilibrer en fonction des pressions imposées par l'écoulement externe à ses bornes. Dans le cas où cette lame d'air parcourt l'ensemble des façades, on peut se demander comment la pression va s'équilibrer quand une partie des façades sera en compression, alors que l'autre partie des façades sera en dépression. Les fluctuations de pression peuvent-elles se propager d'une façade à l'autre ? Et perturber ainsi l'équilibrage en pression de la lame d'air ?

L'analyse se porte dans un premier temps sur le cas d'un bâtiment haut. La Figure 100 se propose d'étudier la dynamique de l'équilibrage en pression au centre de la façade double-peau en traçant la PDF des pressions interne et externe, ainsi que du différentiel net. L'analyse est faite pour 3 directions de vent, et les résultats sont comparé au cas d'une double-peau limitée à une seule façade.

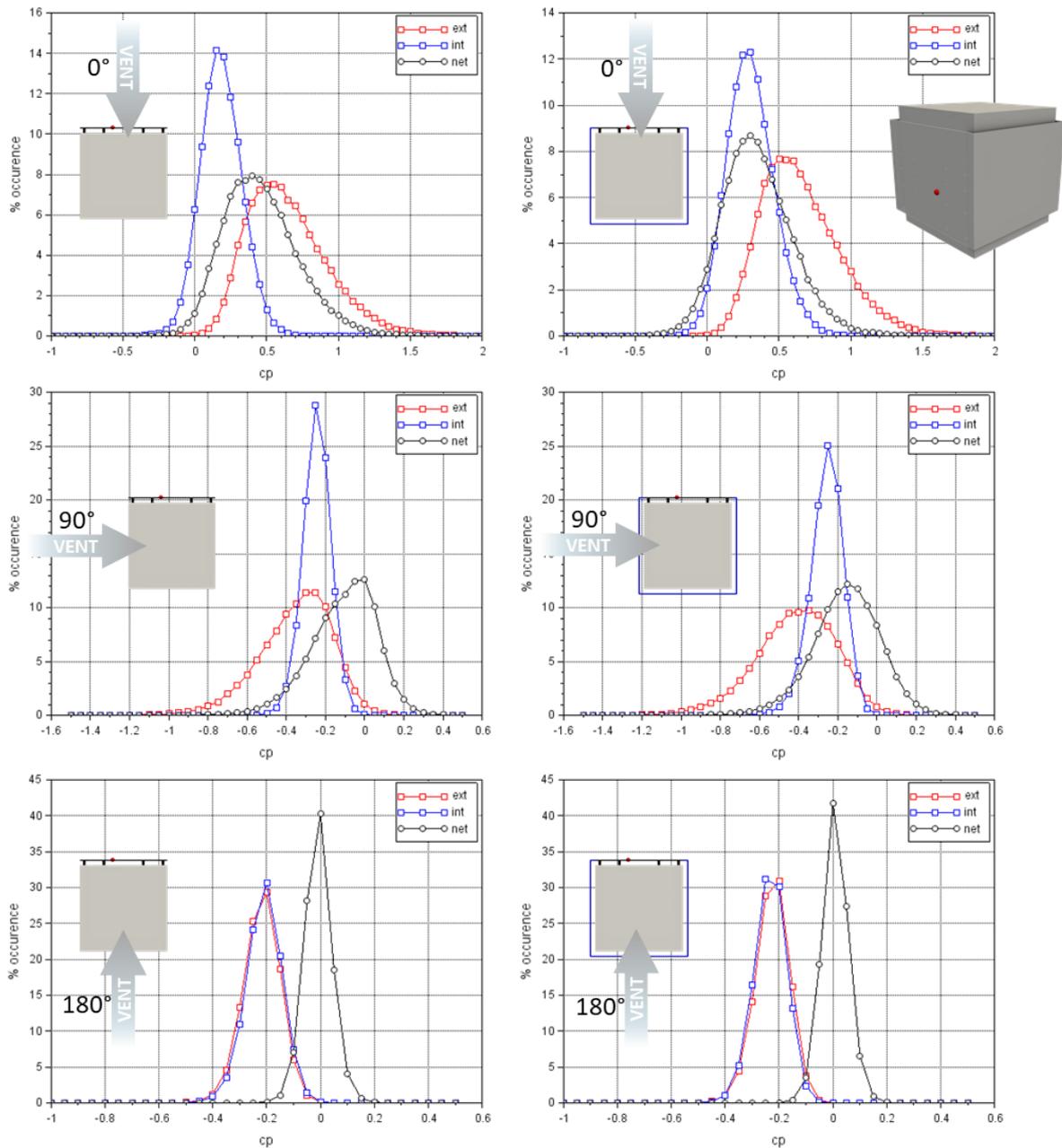


Figure 100 - PDF du coefficient de pression, intérieur, extérieur et net, en un point de la façade double-peau pour un bâtiment haut, selon 3 directions de vent, avec (droite) et sans (gauche) peau périphérique

De manière générale, les figures ne mettent pas en évidence un changement majeur de la dynamique de pression dans la lame d'air du fait de la présence de la peau périphérique, pour aucune des 3 directions de vent.

Pour une direction de 0° , la PDF de pression interne $c_{p_{int}}$ est légèrement décentrée vers des pressions positives en présence de la peau périphérique. Ceci peut s'expliquer par le fait que la peau périphérique va couper l'accès aux pressions négatives sur les rives latérales de la double-peau, selon le même principe que les segmentations verticales. Ceci conduit à augmenter le niveau de pression dans la lame d'air, et abaisser les charges nettes $c_{p_{net}}$.

Pour une direction de vent de 90° , les PDF de pression interne $c_{p_{int}}$ sont assez faiblement affectées par la présence de la peau périphérique. De légères variations, observées à la fois

sur la pression interne $c_{p_{int}}$ et la pression externe $c_{p_{ext}}$ de la façade double peau, peuvent être attribuées au changement de géométrie induite par la présence de la peau périphérique. Elle peut en effet avoir un impact sur la façon dont l'écoulement va se structurer le long la façade pour cette direction de vent où l'écoulement est rasant. On n'observe pas en tout cas la présence de fluctuations de pression positives qui auraient pu se propager depuis la façade au vent.

Enfin pour une direction de vent de 180° , les PDF sont identiques pour les deux configurations. Là encore cette comparaison montre, qu'a priori, il n'y a pas de fluctuations de pression qui pourraient se propager depuis des façades où la pression serait beaucoup plus faible, ou au contraire beaucoup plus élevée.

La Figure 101 et la Figure 102 tracent respectivement les compressions et arrachements de pointe, toutes directions de vent confondues, pour un bâtiment bas et un bâtiment haut, équipés d'une peau pleine et non recoupée, avec et sans peau périphérique.

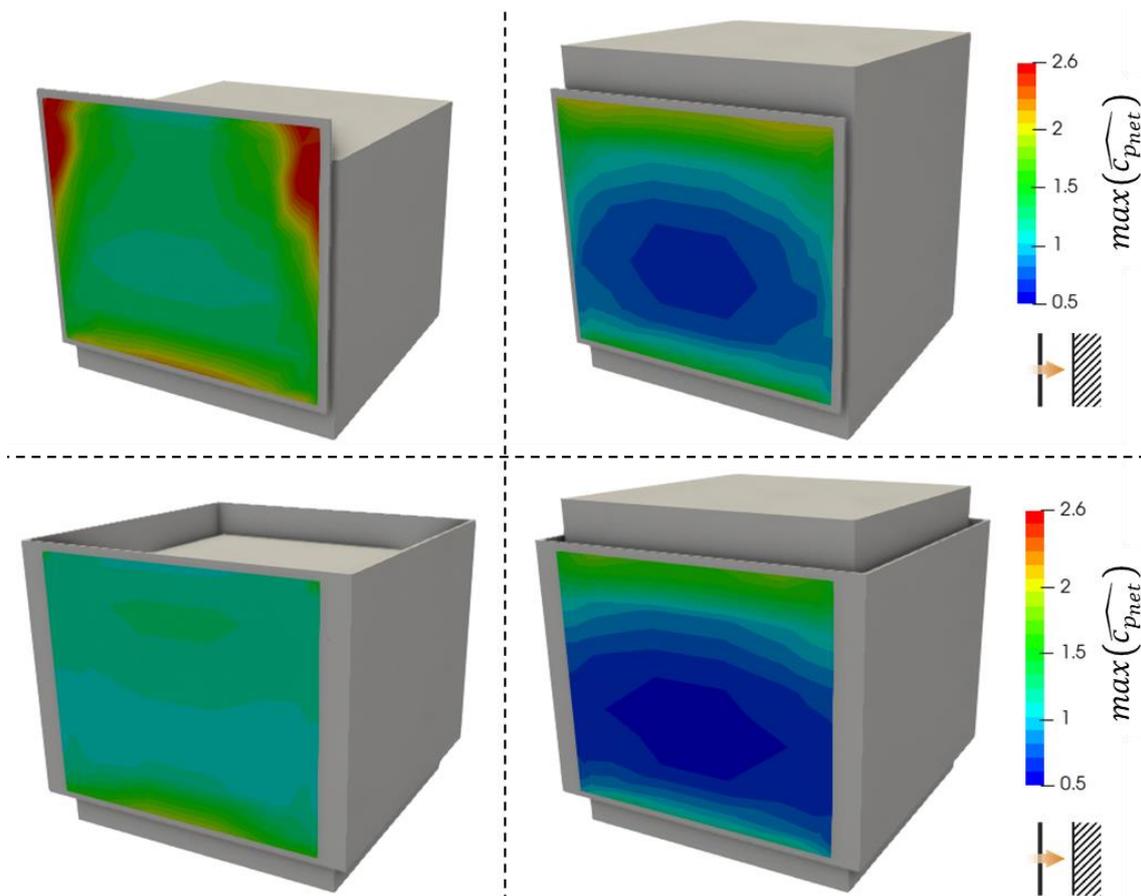


Figure 101 - cartographie du coefficient du différentiel de pression de pointe maximum (compressions de pointes) toutes direction de vents confondues, pour un bâtiment bas et haut, avec et sans peau périphérique

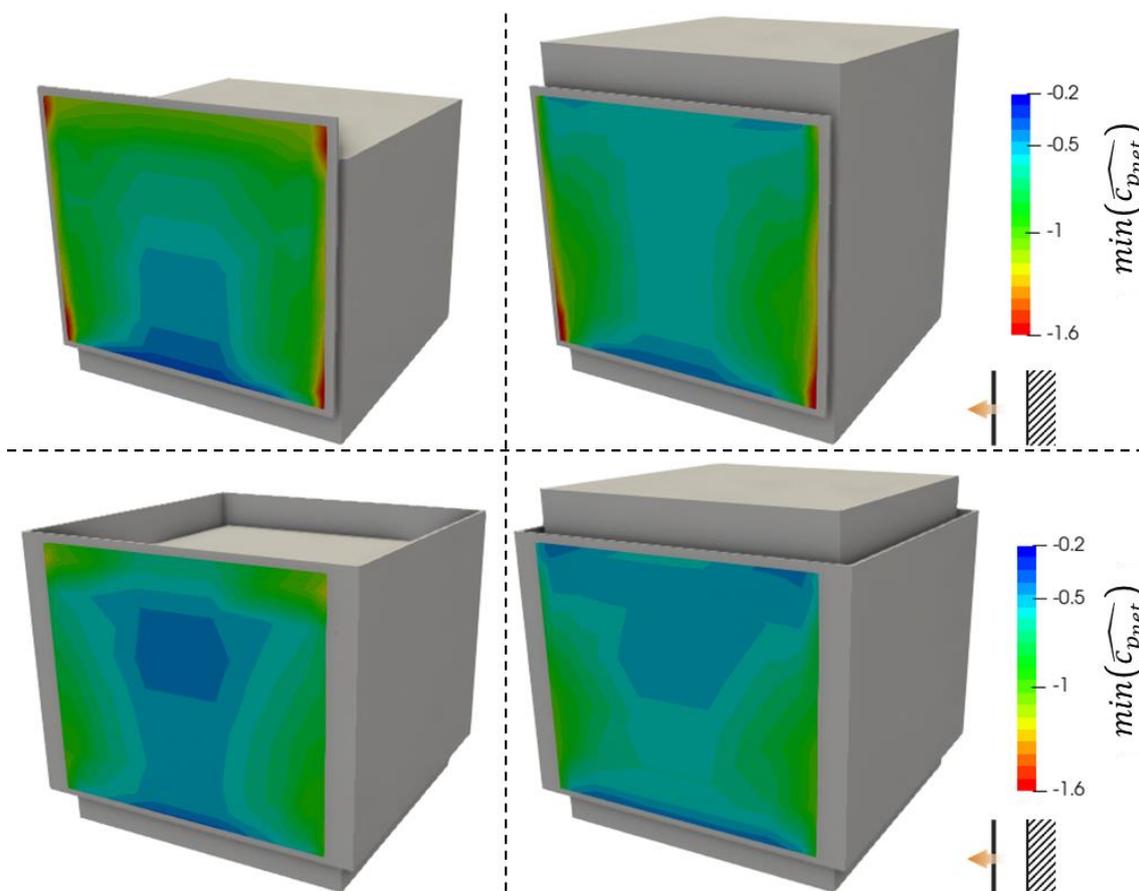


Figure 102 - cartographie du coefficient du différentiel de pression de pointe minimum (arrachements de pointes) toutes direction de vents confondues, pour un bâtiment bas et haut, avec et sans peau périphérique

L'analyse des cartographies montre que la présence d'une peau périphérique induit une diminution des charges sur les bordures de la double-peau. Cette diminution est constatée pour les deux configurations de bâtiment bas et haut. Ceci peut s'expliquer par la disparition de configurations où l'écoulement s'engouffre par les bords latéraux de la double-peau, et engendre de fortes accélérations dans la lame d'air, générant ainsi des charges nettes très élevée (cf §4.2.3). Au centre de la façade, les charges sont très peu modifiées par la présence de la peau périphérique. À nouveau ces cartographies des charges de pointe ne mettent pas en évidence la possibilité de fluctuations de pression venant des autres façades, et qui pourraient se propager dans la lame d'air pour affecter de façon significative les chargements de pointe de la façade double-peau.

4.7 SYNTHÈSE SUR LES CHARGES AU VENT

Cette étude a permis de mettre en évidence la très forte variabilité des charges au vent sur la façade double-peau selon les différentes modularités géométriques qui ont été investiguées. Ainsi pour une même double-peau de 35m de haut par 40m de large adossée à la façade d'un bâtiment, les charges au vent vont dépendre très fortement de la géométrie du bâtiment, de la direction du vent, de la présence de segmentations, de l'épaisseur de la lame d'air, ou de la porosité de la double-peau. Tous ces paramètres vont avoir une influence comparable, et les différentes combinaisons de ces paramètres vont conduire à des résultats différents quant à l'équilibrage et à la dynamique de la pression dans la lame d'air.

4.7.1 Charges maximales toutes configurations confondues

On se propose dans un premier temps de regarder les charges de pointes maximales qui ont été mesurées sur la façade double-peau afin de dresser un portrait le plus conservatif possible des charges qui peuvent s'exercer sur cette façade. La Figure 103 dresse ainsi une cartographie du coefficient du différentiel de pression de pointe maximum et minimum obtenu pour toutes les directions de vent et pour toutes les configurations géométriques investiguées.

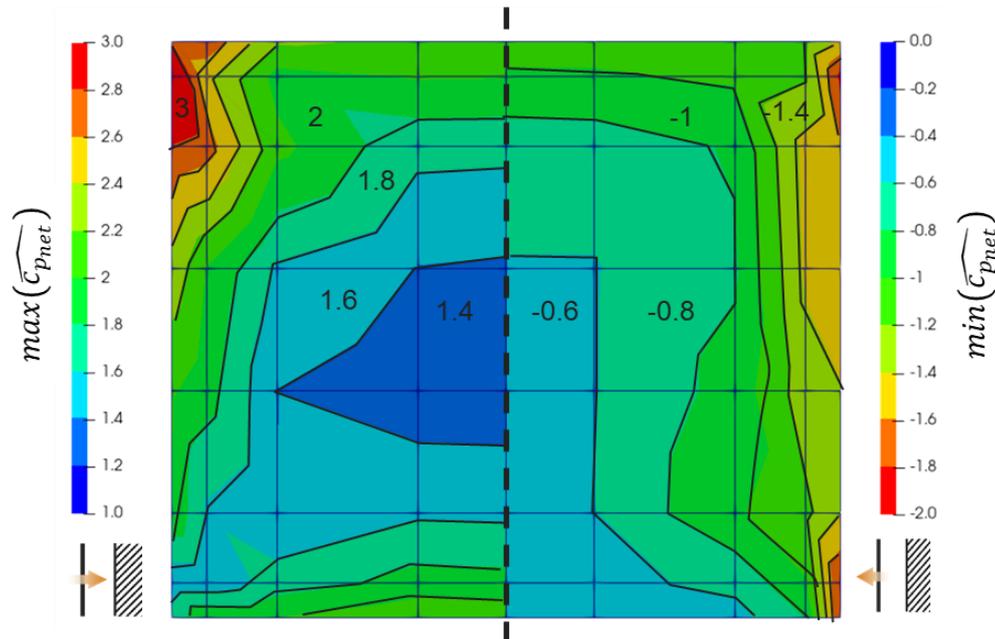


Figure 103 - Coefficient du différentiel de pression de pointe maximum (compressions de pointe) et minimum (arrachements de pointe) toutes directions de vents, et toutes configurations géométriques confondues

Cette cartographie montre dans un premier temps que, pour les configurations géométriques considérées dans cette étude, la façade double-peau est plus fortement sollicitée en compression qu'en arrachement. Les compressions de pointes vont varier entre +1.4 et +3, alors que les arrachements de pointe vont varier entre -0.6 et -1.8. Sur une façade « classique », ce sont plutôt les arrachements qui vont être dimensionnants.

Les arrachements de pointe les plus élevés correspondent essentiellement à des décollements locaux en bordure de la façade, pour des configurations où l'écoulement est rasant à la façade. Ces décollements vont générer des différentiels de pression élevés comme illustré Figure 58. Au centre de la façade, les arrachements de pointes maximums correspondent aux fluctuations de pression les plus fortes quand la pression s'équilibre en moyenne de part et d'autre de la peau, comme illustré par exemple Figure 95.

Les compressions de pointes les plus élevées, de l'ordre de +3 et observées sur le coin supérieur de la façade, correspondent à des configurations d'écoulement avec un bâtiment bas, où la façade est alors en drapeau par rapport au toit du bâtiment, comme illustré Figure 66. La façade double-peau peut alors être assimilable à un acrotère. Le coefficient de pression mesuré sur la double-peau est effectivement en accord avec des valeurs qui pourraient être proposées par l'Eurocode [8] pour ces objets. En dehors de ces zones, très localisées aux bords de la façade, on retrouve une zone plus étendue en périphérie de la façade avec des coefficients compris entre +2 et +2.4. Elles correspondent à des zones où l'écoulement va s'engouffrer dans la lame d'air, et où l'accélération de l'écoulement va faire baisser la valeur de la pression sur la face interne de la double peau, augmentant les charges nettes. Au centre de la façade, le coefficient diminue à +1.4. Cette valeur plus faible s'explique en partie par la diminution de la pression sur la face externe de la façade, du fait du gradient de pression dynamique en amont du bâtiment.

Aussi une des difficultés dans la généralisation des résultats de cette étude va être de déterminer ce qui conditionne la transition d'une zone où le coefficient est de l'ordre de +2, à une zone où le coefficient est de l'ordre de +1.5.

Quoi qu'il en soit, ce cas de charge toutes configurations confondues montre que les préconisations de la fiche SNFA [11], reprises dans le programme RAGE [12], ne permettent pas de couvrir de façon conservatrice certaines configurations testées dans cette étude, puisque les charges nettes de pointes dépassent largement la valeur +1.5 proposées par ces documents.

4.7.2 Mécanismes de l'équilibrage en pression

Les mesures réalisées dans cette étude ont permis de mieux comprendre la mécanique de l'équilibrage en pression de la lame d'air. Il semble difficile d'être exhaustif sur tout ce qui peut se passer, tant la combinaison des différents paramètres peut générer un très grand nombre de situations différentes. On peut cependant tenter de résumer les mécanismes à l'œuvre à partir de quelques grands principes :

- 1) la lame d'air va s'équilibrer en fonction des pressions qui vont s'appliquer sur l'ensemble de ses ouvertures
- 2) cet équilibrage se fait de manière quasi instantanée
- 3) s'il existe une différence de pression suffisante entre deux ouvertures de la lame d'air, elle va générer un écoulement allant des plus hautes pressions vers les plus basses pressions
- 4) auquel cas la pression dynamique de cet écoulement va avoir un impact sur la pression statique de la face interne de la double-peau, et par conséquent sur les charges au vent
- 5) auquel cas l'engouffrement de l'écoulement dans la lame d'air peut générer localement des accélérations qui augmentent de façon très significative les charges au vent.

L'expérimentation modèle permet de caractériser directement l'équilibrage en pression de la lame d'air par une mesure directe de la pression sur la face interne de la double-peau. Dans le cas où la maquette ne permettrait pas de mesurer directement la pression dans la lame d'air, la caractérisation de l'équilibrage en pression va alors reposer sur :

- 1) la détermination des pressions instantanées au niveau de chaque ouverture de la lame d'air
- 2) la détermination de l'écoulement généré dans la lame d'air et son impact sur l'équilibrage en pression de la peau
- 3) la détermination de potentiels effets locaux au niveau des engoncements de l'écoulement dans la lame d'air

Le premier point peut être adressé assez facilement en plaçant judicieusement des prises de pression sur une maquette en soufflerie à Couche Limite Atmosphérique, et en enregistrant les signaux de pression de façon synchrone.

Le second point va faire l'objet de tentatives de modélisation par approche nodale qui seront détaillées dans la partie suivante

5 MODELISATION NODALE

La problématique du dimensionnement au vent des façades double-peau repose donc essentiellement sur l'équilibrage en pression de la lame d'air, et la détermination de la pression instantanée en son sein, et ce de façon synchrone avec la pression appliquée sur la face externe de la double-peau.

Compte tenu de la faible épaisseur de la lame d'air, l'écoulement dans cette dernière peut être assimilée à celui d'un canal plan dans le cas de double-peau segmentées, ou d'un d'écoulement 2D en l'absence de segmentation. L'idée serait alors d'utiliser des modélisations simples de type approche nodale, beaucoup plus rapides en termes de temps de calcul que des approches de type CFD, afin de déterminer l'équilibrage en pression instantané dans la lame d'air, à partir des seuls signaux de pressions mesurés aux bornes de cette dernière. Le principe est illustré Figure 104.

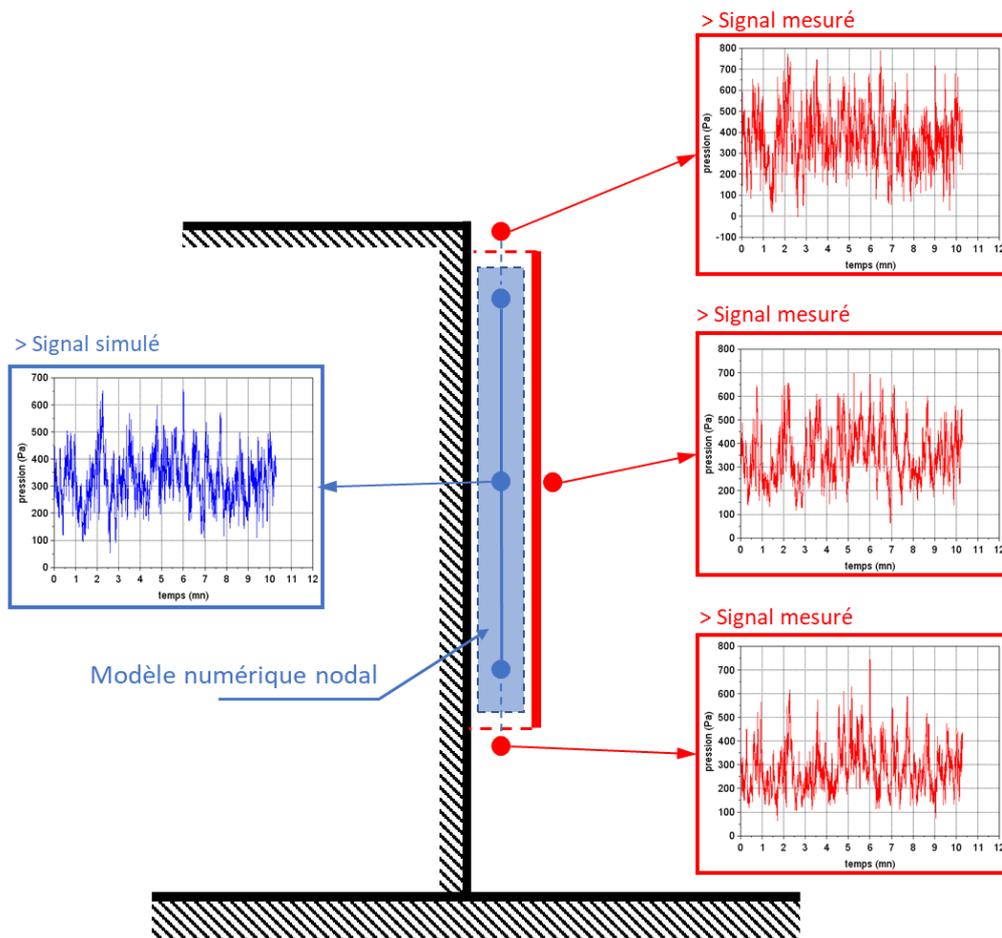


Figure 104 - principe d'utilisation de l'approche nodale pour la détermination de l'équilibrage instantané de la pression dans la lame d'air

Ce principe permettrait ainsi d'accéder à une « mesure virtuelle » de la pression à l'intérieur de la lame d'air pour des maquettes qui ne permettraient pas, pour des raisons d'échelle, de mesurer directement la pression dans la lame d'air. Afin d'évaluer la pertinence de cette approche, on se propose de l'appliquer à l'expérience modèle, et de comparer les résultats ainsi obtenus aux mesures réalisées en soufflerie.

5.1 APPROCHE NODALE ET CODE MATHIS

L'approche nodale est classiquement utilisée pour des problèmes d'aéroulque, i.e. l'étude des écoulements confinés et se propageant dans une série de conduites. Le réseau aéroulque est alors discrétisé sous forme de nœuds (d'où le nom de nodal) connectés entre eux par des branches. Ces branches permettent non seulement de modéliser la canalisation du débit par les conduites d'un nœud vers l'autre, mais également de modéliser les pertes de charges engendrées par la circulation de l'air dans les conduites. Selon le type de connexion entre les nœuds, on appliquera alors différents types de modèles de pertes de charge.

Ainsi le problème de canal exposé au §2.2 peut se simplifier par un réseau nodal tel qu'illustré Figure 105. Le réseau est constitué de 4 nœuds (en bleu) et de 2 conditions aux limites (en rouge). Les différents nœuds sont reliés entre eux par des branches dans lesquelles on modélisera les pertes de charges par frottements (pertes de charges dites linéiques). Les nœuds d'extrémité sont reliés aux conditions aux limites par des branches traduisant des pertes de charge singulières du fait de l'engoncement de l'écoulement dans le canal, ou du refoulement vers l'extérieur.

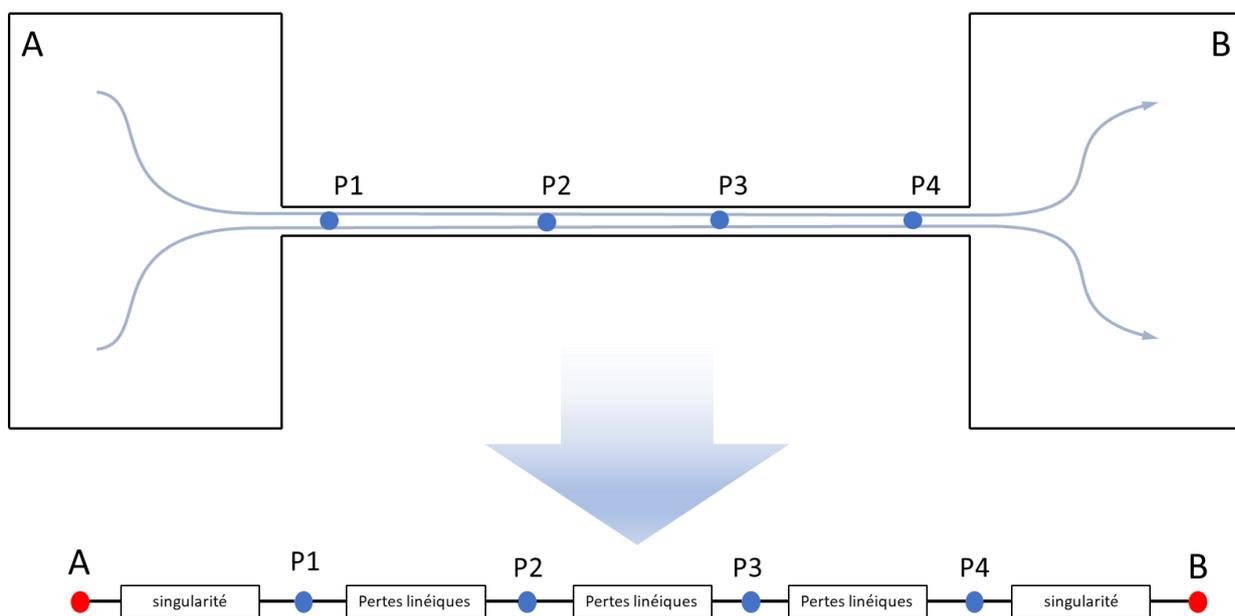


Figure 105 -modélisation d'un canal connecté à deux volumes en pression

Le §2.2 avait montré comment la pression à l'intérieur du canal variait beaucoup en fonction des sections d'entrée, et de l'équilibrage en pression résultant. Ce calcul est réalisé à l'aide d'un code de calcul nodal, qui résout la conservation de la masse et de l'énergie mécanique dans le réseau aéroulque.

Dans le cadre de cette étude, le code de calcul nodal MATHIS est utilisé. Ce code de calcul open source a été développé au CSTB par François Demouge (<https://gitlab.com/CSTB/mathis>). Le code de calcul MATHIS a été développé afin de prendre en compte finement les problématiques thermo-aéroulques des réseaux de ventilation des bâtiments. Dans le cadre de cette étude, le code est principalement utilisé pour sa capacité à retranscrire un équilibrage de pression instantané dans un réseau aéroulque. Il est important de souligner ici que cette étude n'a pas pour objectif de valider le code de calcul MATHIS, qui a déjà fait l'objet de plusieurs campagnes de validation, mais bien la capacité d'une approche nodale à déterminer l'équilibrage en pression de la lame d'air en vue du dimensionnement au vent d'une façade double-peau. Ce n'est pas l'outil qui est évalué mais la pertinence à l'utiliser pour cet usage.

5.2 MODELE NODAL DE LA LAME D'AIR

5.2.1 Discrétisation de la lame d'air

On se propose de constituer un modèle nodal permettant d'étudier l'équilibrage en pression de la lame d'air de la façade double-peau de l'expérience modèle. La Figure 106 et la Figure 107 proposent une visualisation du modèle nodal ainsi constitué respectivement en 2D, et en 3D superposé à la géométrie de la façade. Le modèle est constitué de 64 nœuds (en bleu) répartis aux emplacements des prises de pression de la maquette de l'expérience modèle.

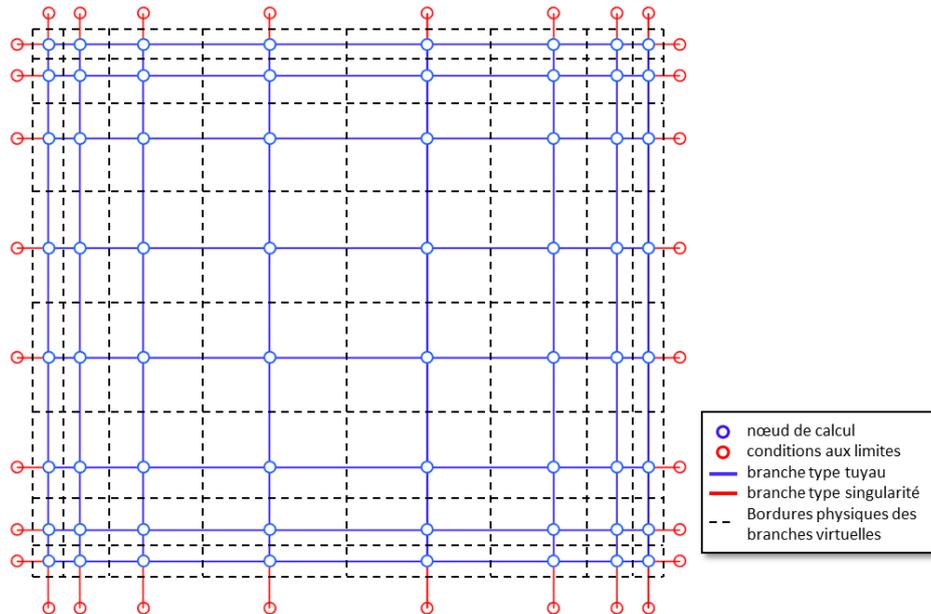


Figure 106 -visualisation 2D du modèle nodale de la lame d'air de la façade double-peau

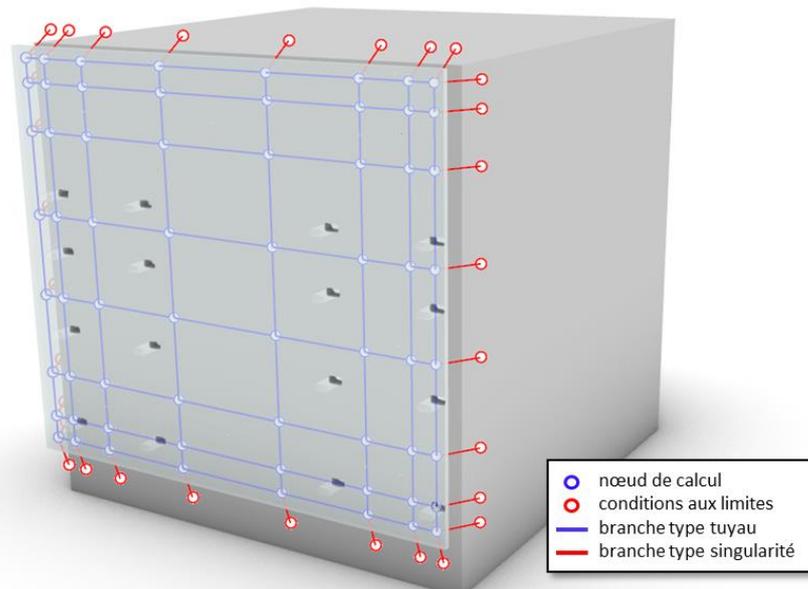


Figure 107 – visualisation 3D du modèle nodale de la lame d'air de la façade double-peau

En périphérie du modèle, les nœuds d'extrémités sont reliés à 32 nœuds de conditions aux limites (en rouges). Ces conditions aux limites correspondent aux prises de pression localisées sur la façade du bâtiment, à l'extérieur de la lame d'air. Pour la bordure inférieure, elles

correspondent aux prises de pression localisées en pied de façade. Pour les bords latéraux, elles correspondent aux prises de pression localisées sur les deux flancs latéraux du bâtiment. Pour la bordure supérieure, elles correspondent soit aux prises de pression localisées en toiture pour le bâtiment à niveau, soit aux prises de pression localisées sur le haut de la façade pour le bâtiment haut.

Sur ces conditions aux limites (en rouge), on prescrira le signal de pression qui a été mesuré en soufflerie. Sur les nœuds de calcul (en bleu), on relèvera la pression calculée par le modèle nodal, et la comparera à la pression effectivement mesurée en soufflerie.

Les nœuds de calcul sont interconnectés entre eux par des branches (en bleu sur les figures) disposées selon un axe vertical et horizontal. Dans ces branches, définies comme des types « TUYAU » dans le code MATHIS, on prescrit une loi de perte de charge linéique représentant les frottements [13]. Pour ce faire une section de conduite et une rugosité de surface sont définies. La section de la conduite est définie par l'épaisseur de la lame d'air et la somme des deux mi-distance séparant les nœuds voisins. La conduite ainsi considérée est représentée par des traits pointillés sur la Figure 106. La rugosité de surface est considérée négligeable et prise égale à 1µm.

Les nœuds de calcul en périphérie sont connectés aux conditions aux limites par des branches (en rouge) définies comme des types « SINGULARITE » dans le code MATHIS [13]. Ces branches vont permettre de simuler la perte de charge engendrée par l'engoncement ou le refoulement de l'écoulement dans le canal. Elles vont prescrire une perte de charge sous la forme d'une loi quadratique de la vitesse comme vu §2.2

$$\Delta p_{singul} = \frac{1}{2} \xi \rho U^2$$

Le coefficient ξ va varier suivant le sens de l'écoulement dans la branche. Si l'écoulement rentre dans la lame d'air $\xi = 0.5$. Si l'écoulement sort de la lame $\xi = 1.5$. Ces valeurs, classiquement utilisées dans les simulations aérauliques de ventilation de tunnels [14], ont également fait l'objet d'une étude de sensibilité, non présentée dans ce rapport.

5.2.2 Calcul de la pression statique dans la lame d'air

Le calcul est mené échelle maquette. Le pas de temps du calcul est celui de l'acquisition du signal de pression en soufflerie, soit 0.00195s (512Hz). La simulation est faite en mode isotherme. Tous les autres paramètres du code sont pris par défaut. La simulation est menée sur une durée de 300s soit toute la durée d'acquisition du signal en soufflerie. Le calcul représente donc 153600 pas de temps. La simulation nécessite 3.5h de calcul (un calcul CFD instationnaire équivalent demanderait plusieurs jours).

Le code de calcul permet alors d'obtenir pour chaque pas de temps, la pression totale calculée en chaque nœud de calcul. Or l'information pertinente pour le dimensionnement au vent est la pression statique sur la face interne de la double-peau : $p_{stat} = p_{tot} - \frac{1}{2} \rho U^2$. Il est donc nécessaire de remonter à la vitesse de l'écoulement au niveau de chaque nœud. Les nœuds sont des objets mathématiques sans volume, qui ne permettent pas de déterminer directement une notion de vitesse. Il est alors nécessaire de considérer les débits calculés dans chacune des branches connectées au nœud. La Figure 108 représente les quatre branches connectées au nœud de calcul, en discriminant les deux branches horizontales notées H , des deux branches verticales notées V . Soit S_H et S_V les sections des branches, respectivement horizontales et verticales.

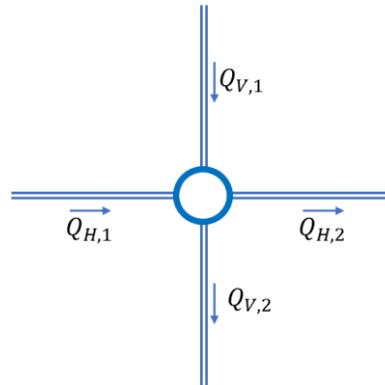


Figure 108 -débits dans les quatre branches reliées à un nœud de calcul

On définit alors pour chaque nœud une vitesse horizontale U_x et une vitesse verticale U_y :

$$U_x = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{H,1} + Q_{H,2}}{S_H} \right)$$

$$U_y = \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{V,1} + Q_{V,2}}{S_V} \right)$$

Le procédé permet ainsi d'apporter également une notion de directivité de l'écoulement dans la lame d'air. On définit alors la norme de la vitesse ainsi calculée $U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$

Ce calcul de la vitesse et de la pression statique est fait en post-traitement des simulations MATHIS. Les signaux de pression « virtuels » ainsi calculés en chaque nœud sont ensuite stockés, et traités de la même façon que les signaux de pression mesurés en soufflerie.

5.2.3 Limitations intrinsèques du modèle

Avant même de rentrer dans l'analyse des résultats obtenus avec ce modèle, on peut souligner certaines de ses limites intrinsèques, vis-à-vis des mécanismes physiques qu'il se doit de modéliser.

Par construction, le modèle va considérer une vitesse constante et uniforme dans chacune des branches. Or l'analyse des mesures en soufflerie a montré que dans certaines parties de la lame d'air, notamment au niveau de l'engoncement de l'écoulement dans la lame, la vitesse pouvait présenter de fortes inhomogénéités dans l'épaisseur de la lame d'air.

Une autre limitation va porter sur la modélisation des conditions aux limites sur lesquelles on prescrit des pressions mesurées, qui sont ici des pressions statiques. Or le code de calcul attend une pression totale pour ces conditions aux limites. En d'autres termes, suivant la configuration de l'écoulement aux bornes de la lame, le modèle ne prend pas forcément en compte la pression dynamique de cet écoulement. Ceci peut alors induire un biais de modélisation du fait que l'on ne prend pas en compte une certaine « inertie » de l'écoulement dans la lame d'air induite par l'écoulement à l'échelle du bâtiment.

Enfin les coefficients de perte de charge singuliers prescrits au niveau des branches d'entrée/sortie ne sont pas forcément représentatifs de la topologie de l'écoulement local, suivant la façon dont l'écoulement de la lame d'air se sépare/rejoint l'écoulement à l'échelle du bâtiment.

5.3 RESULTATS

Ce paragraphe a pour objectif de présenter les résultats du modèle sur certaines configurations testées en soufflerie, afin d'évaluer la capacité du modèle à prédire l'équilibrage en pression instationnaire de la lame d'air.

5.3.1 Peau segmentée verticalement

On se place dans le cas de référence d'une peau segmentée verticalement. Cette configuration est celle qui se rapproche le plus d'un canal plan, auquel on applique un différentiel de pression à chacune de ses extrémités. Elle devrait donc être particulièrement adaptée à la modélisation nodale. On considère dans un premier temps un bâtiment à niveau tel qu'étudié §4.1.1.

La Figure 109 trace le profil du coefficient de pression calculé par l'approche nodale dans la lame d'air, et le compare aux valeurs mesurées sur la face interne de la double-peau et sur le bâtiment.

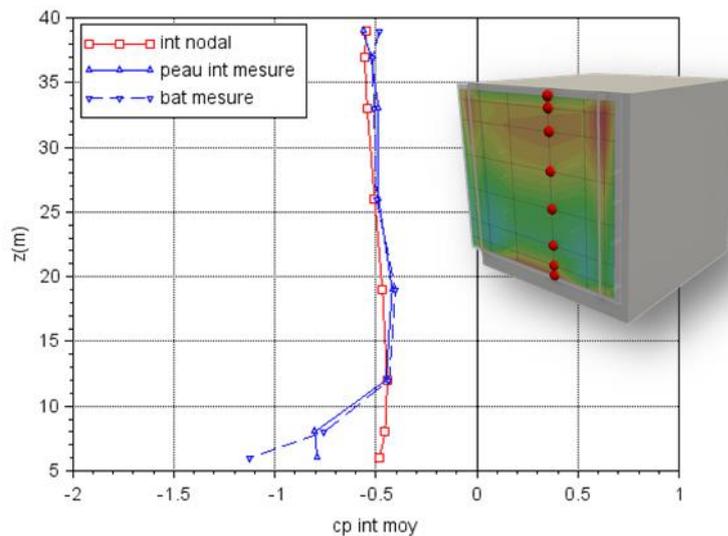


Figure 109 - profil du coefficient de pression moyenne interne obtenue par calcul, comparaison à la pression mesurée sur la face interne de la double peau et sur la paroi du bâtiment (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

La figure montre alors une bonne adéquation entre la valeur de la pression calculée par le modèle nodal et la valeur mesurée en soufflerie. Dans cette configuration géométrique, où la pression est quasiment uniforme dans la lame d'air, l'équilibrage en pression va essentiellement reposer sur les valeurs de pression aux bornes de la lame, et les coefficients de perte de charge choisis en entrée et en sortie. Le fait que le modèle s'équilibre à la bonne valeur de pression permet ainsi d'entériner le choix effectué sur les valeurs des coefficients de perte de charge prescrits en entrée et en sortie du domaine.

La figure montre tout de même un écart significatif en pied de façade entre les valeurs calculées par le modèle et celle mesurées. Alors que la pression chute fortement sur les mesures, elle reste constante dans le modèle. L'analyse des mesures avait montré que cette baisse de pression était induite par une accélération à l'engoncement de l'écoulement dans la lame d'air. La Figure 41 avait présenté un champ de vitesse issu de simulations CFD, qui avait mis en évidence une forte inhomogénéité de la vitesse dans l'épaisseur de la lame d'air. Le calcul nodal ne peut représenter cette inhomogénéité, et ne peut par conséquent traduire la baisse de pression qu'elle induit. C'est donc une première limitation de l'approche dans la restitution de ces forts arrachements.

La Figure 110 trace un extrait du signal temporel de la pression interne dans la lame d'air calculé à chaque pas de temps de la simulation, et la compare au signal mesuré en soufflerie. Elle trace également le différentiel de pression net obtenu en soustrayant la valeur calculée dans la lame d'air à la valeur synchrone mesurée sur la face externe de la double-peau. Le tracé est réalisé en un point situé au centre de la façade.

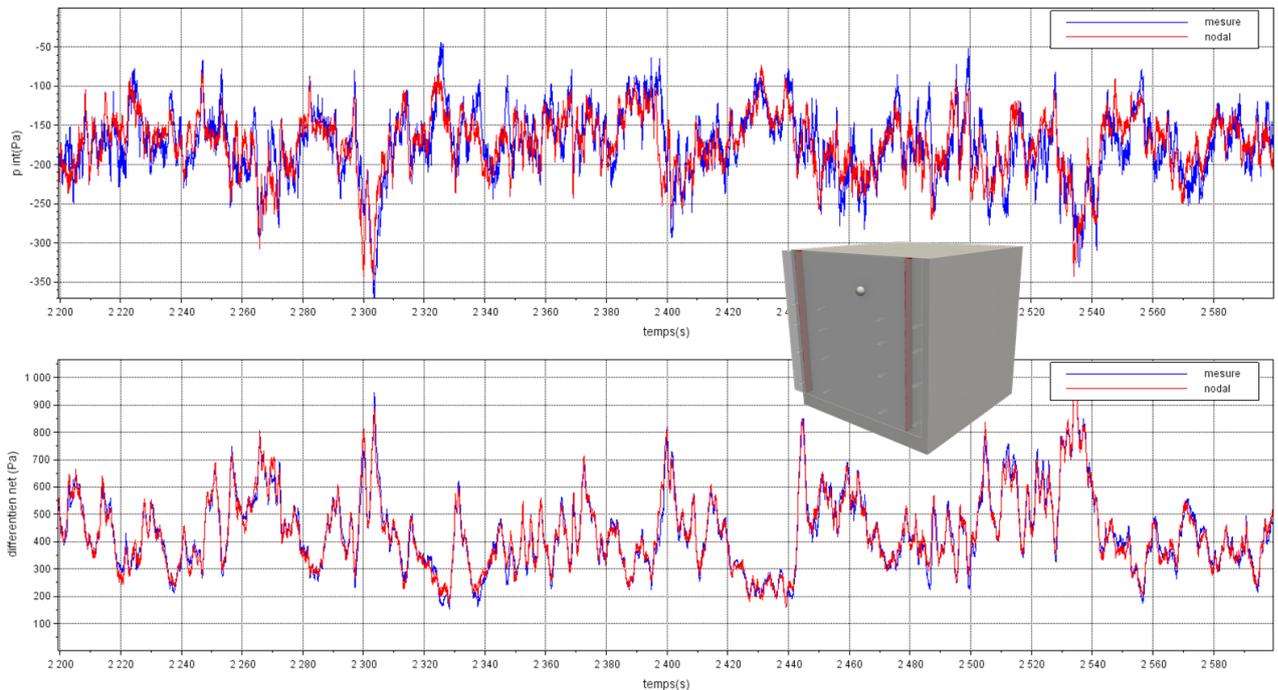


Figure 110 -extraits des signaux temporels de la pression interne (en haut) et du différentiel net (en bas) calculés par le modèle au centre de la façade, comparaison aux mesures en soufflerie (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

La figure montre que le signal de pression interne calculé suit relativement bien les plus fortes fluctuations du signal de pression mesuré en soufflerie. Les fluctuations à plus petite échelle ne sont pas forcément toutes bien restituées. Les fluctuations du signal du différentiel de pression semblent beaucoup mieux restituées. Cela s'explique en partie par le fait que les fluctuations sont majoritairement induites par le signal de pression extérieur, qui est identique dans la génération des deux signaux comparés. Cela étant, cela montre la capacité du modèle à restituer de façon synchrone la variation de pression de part et d'autre de la façade double-peau.

La Figure 111 trace le profil de pression interne et le différentiel net, moyens et de pointes, calculés par le modèle nodal, et les compare aux valeurs mesurées en soufflerie.

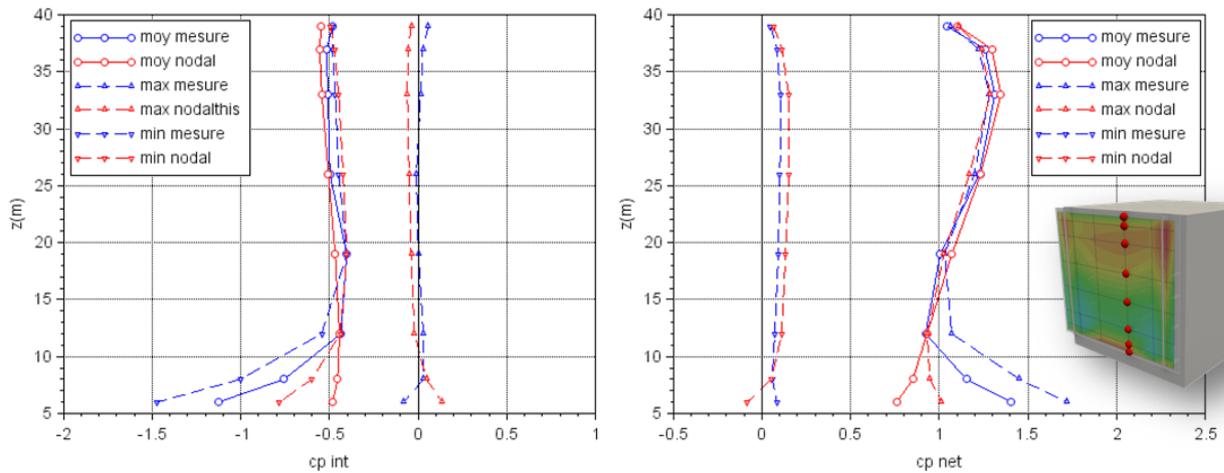


Figure 111- profil du coefficient de pression, moyenne et de pointe, intérieur à gauche et net à droite, comparaison des valeurs calculées et mesurées (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

La figure montre ainsi que les valeurs de pointes simulées par l'approche nodale sont en très bon accord avec les valeurs mesurées en soufflerie. La prédiction de ces valeurs de pointe est même meilleure que celle des valeurs moyennes. On constate en outre que les valeurs de pointe sur le différentiel de pression sont également en très bon accord. Ceci indique alors que les fluctuations de pression entre l'intérieur et l'extérieur de la lame d'air sont bien restituées de façon synchrone par l'approche nodale, et induisent des différentiels de pointe identiques à ceux mesurés en soufflerie. En pied de façade, on retrouve un écart aux mesures qui s'explique à nouveau par l'incapacité du modèle nodal à traduire l'accélération de l'écoulement à l'engoncement dans la lame d'air.

La Figure 112 se propose d'analyser plus en profondeur l'aspect dynamique en traçant les PDF des signaux de pression calculés, et de les comparer aux mesures en soufflerie. L'analyse est faite en 3 points de la façade.

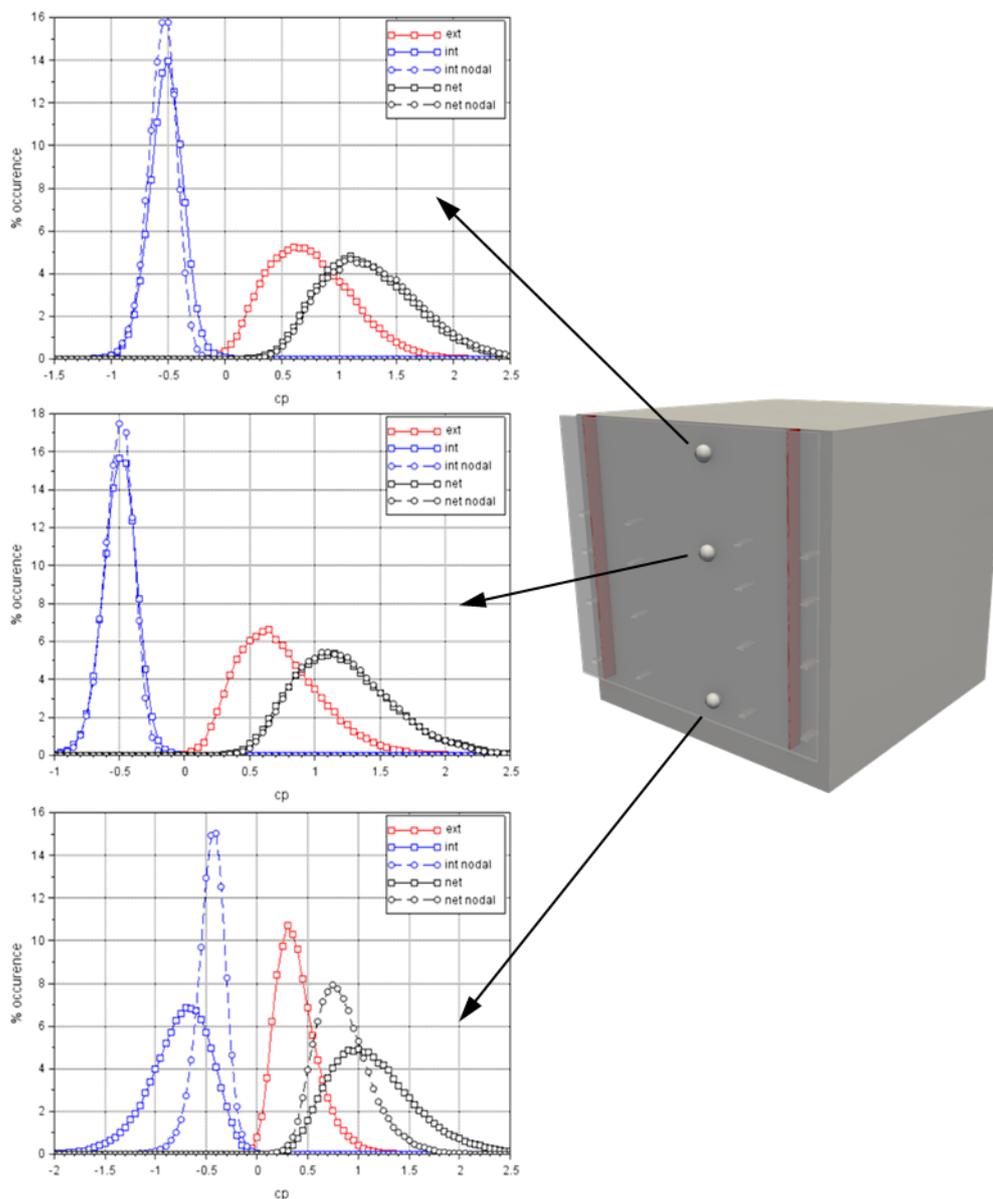


Figure 112 - PDF du coefficient de pression, intérieur, extérieur et net, en trois points de la façade double-peau, comparaison des valeurs calculées et mesurées (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

Au centre de la façade, la figure montre une superposition à la fois de la PDF de la pression interne, mais également de la PDF du différentiel de pression. À nouveau cela témoigne qu'au centre de la façade, la dynamique de l'équilibrage en pression est parfaitement restituée par le modèle nodal et ce de façon synchrone, permettant ainsi de restituer une dynamique du différentiel de pression tout à fait similaire à celle mesurée en soufflerie.

En haut de la façade, les PDF calculés sont à nouveau assez proches de celles mesurées en soufflerie, même si on observe un léger écart sur les pressions internes. En pied de façade, on constate en revanche que la dynamique des signaux de pression interne et du différentiel net ne sont pas du tout en accord avec les mesures. Ceci témoigne à nouveau de l'incapacité du modèle nodal à restituer la dynamique de l'écoulement à l'entrée de la lame d'air.

Afin de mieux prendre en compte l'engoncement de l'écoulement en pied de façade, on se propose de modifier le modèle en diminuant la section des canaux dans les premières branches en pied de façade. Ceci vise ainsi à mimer l'inhomogénéité de l'écoulement, en

l'accélérant de façon artificielle. L'épaisseur de la lame d'air est ainsi diminuée aux 2/3 de l'épaisseur initiale dans les premières branches en pied de façade, en accord avec les observations faite sur les coupes du champ de vitesses obtenues par CFD. La Figure 113 présente alors les profils de pression, moyenne et de pointe, ainsi obtenus.

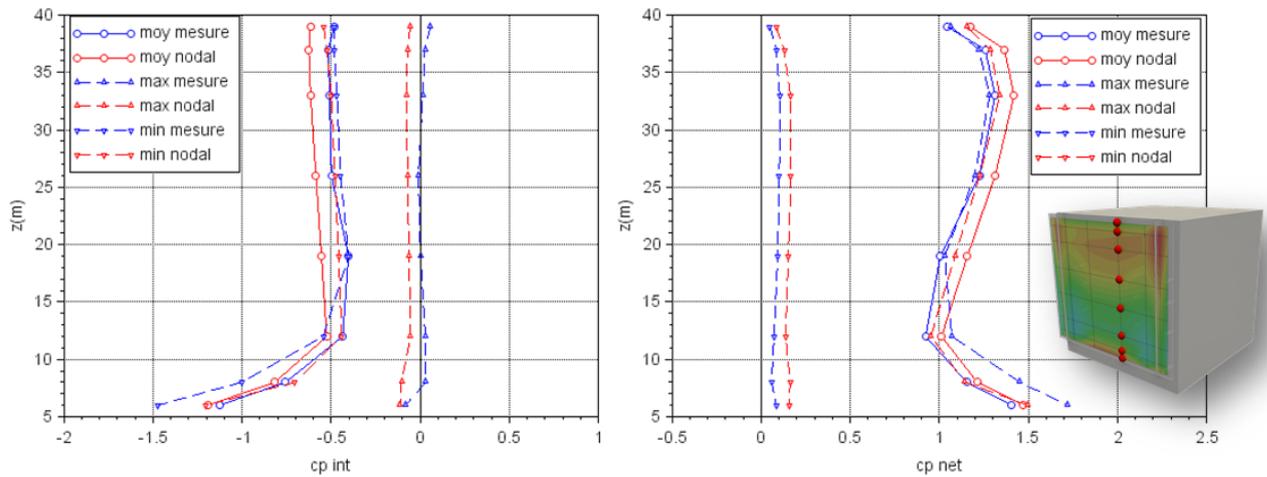


Figure 113 - profil du coefficient de pression, moyenne et de pointe, intérieur à gauche, et net à droite, comparaison des valeurs calculées et mesurées, modèle modifié en pied de façade (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

La figure montre une amélioration significative du profil de pression sur la partie inférieure de la façade. Ceci se fait cependant au détriment de l'équilibrage en pression dans le reste de la lame d'air, puisque la pression à l'intérieur de la lame devient en effet inférieure à celle mesurée en soufflerie. Ainsi la modification du modèle en pied de façade doit certainement se faire de pair avec une modification du coefficient de perte de charge à l'entrée de la lame d'air, modification qui reste à déterminer.

La figure montre également que les valeurs de pointe en pied de façade, bien que supérieures à celles observées avant la modification du modèle, restent plus faibles que celles qui ont pu être mesurées en soufflerie. La Figure 114 propose de tracer à nouveau les PDF des signaux calculés par le modèle nodal ainsi modifié.

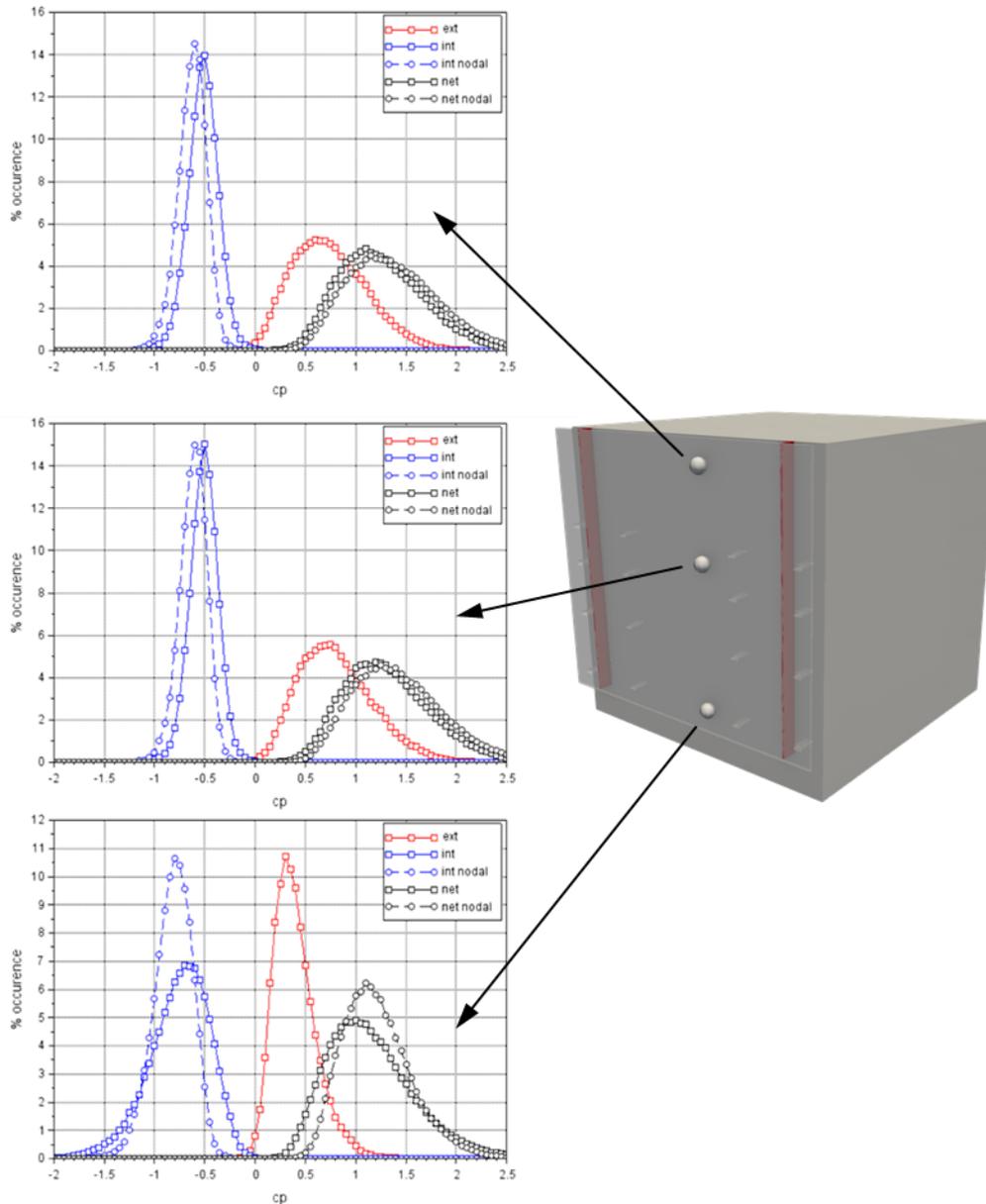


Figure 114 - PDF du coefficient de pression, intérieur, extérieur et net, en trois points de la façade double-peau, comparaison des valeurs calculées et mesurées, modèle modifié en pied de façade (configuration h_n_l_20_p_00_s_vert)

La figure montre qu'au centre et en haut de la façade, la modification du modèle entraîne un décalage de la PDF vers des valeurs de pressions plus faibles, et une modification de la PDF du différentiel de pression. Ce décalage est en accord avec ce qui a pu être observé sur les profils de la Figure 113. En pied de façade, la modification du modèle permet d'améliorer l'aspect des PDF du signal simulé, mais elles restent assez loin de celles qui ont pu être mesurées en soufflerie.

Ainsi si la modification proposée permet une meilleure restitution des charges en pied de façade, elle ne permet donc pas de reproduire assez finement la dynamique de l'équilibrage en pression de la lame d'air. De plus cette modification demanderait de connaître à priori quelle serait la valeur de réduction de l'épaisseur de la lame d'air à appliquer. Paramètre qui ne semble pas forcément trivial à déterminer, même si un pré-calcul CFD semble pouvoir donner une bonne indication.

On se propose à présent d'observer le comportement du modèle nodal en changeant la hauteur du bâtiment. L'analyse des mesures avait montré que cela induisait un changement radical de l'équilibrage en pression de la lame d'air. La Figure 115 trace le profil de pression interne et le différentiel net, moyens et de pointes, calculés par le modèle nodal, et les compare aux valeurs mesurées en soufflerie.

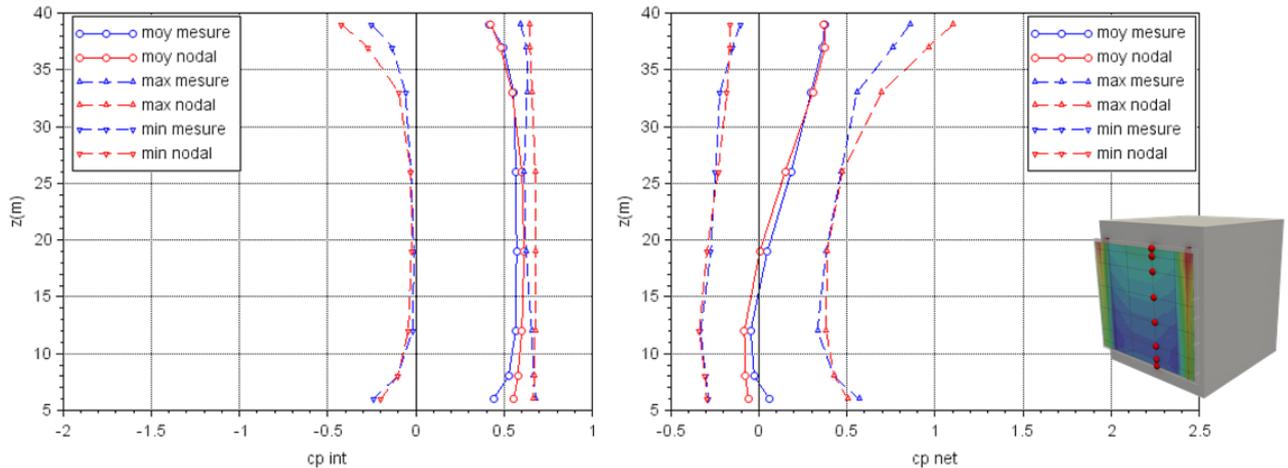


Figure 115 - profil du coefficient de pression, moyenne et de pointe, intérieur à gauche, et net à droite, comparaison des valeurs calculées et mesurées (configuration h_h_l_20_p_00_s_vert)

La figure illustre à nouveau un changement radical de l'équilibrage en pression dans la lame d'air avec l'augmentation de la hauteur du bâtiment. A nouveau le modèle nodal semble à même d'équilibrer la pression dans la lame d'air à une valeur comparable à celle mesurée en soufflerie. Le profil de pression moyenne interne $\overline{c_{p_{int}}}$ semble en accord avec les mesures sur toute la hauteur de la façade, même si l'on observe un léger écart en pied de façade. Les pressions internes de pointe $\widehat{c_{p_{int}}}$ sont également en très bon accord avec celles qui peuvent être mesurées, ce qui montre à nouveau la capacité du modèle nodal à restituer la dynamique de l'équilibrage en pression de la lame d'air. On notera cependant un léger écart sur les pressions minimales de pointe en haut de la façade. Cet écart peut à nouveau être attribué à l'engoncement de l'écoulement dans la lame d'air qui est mal restitué par le modèle.

De manière intéressante, le profil du différentiel de pression $c_{p_{net}}$ est en très bon accord avec celui mesuré en soufflerie. La valeur moyenne montre à nouveau un changement de signe de la charge nette entre la partie supérieure et la partie inférieure de la façade. Les profils du différentiel de pression de pointe $\widehat{c_{p_{net}}}$ calculés sont également très bien restitués, même si la valeur de pointe maximum calculée en haut de la façade est supérieure à celle mesurée.

La Figure 116 se propose d'analyser plus en profondeur l'aspect dynamique en traçant les PDF des signaux de pression calculés, et de les comparer aux mesures en soufflerie. L'analyse est faite en 3 points de la façade.

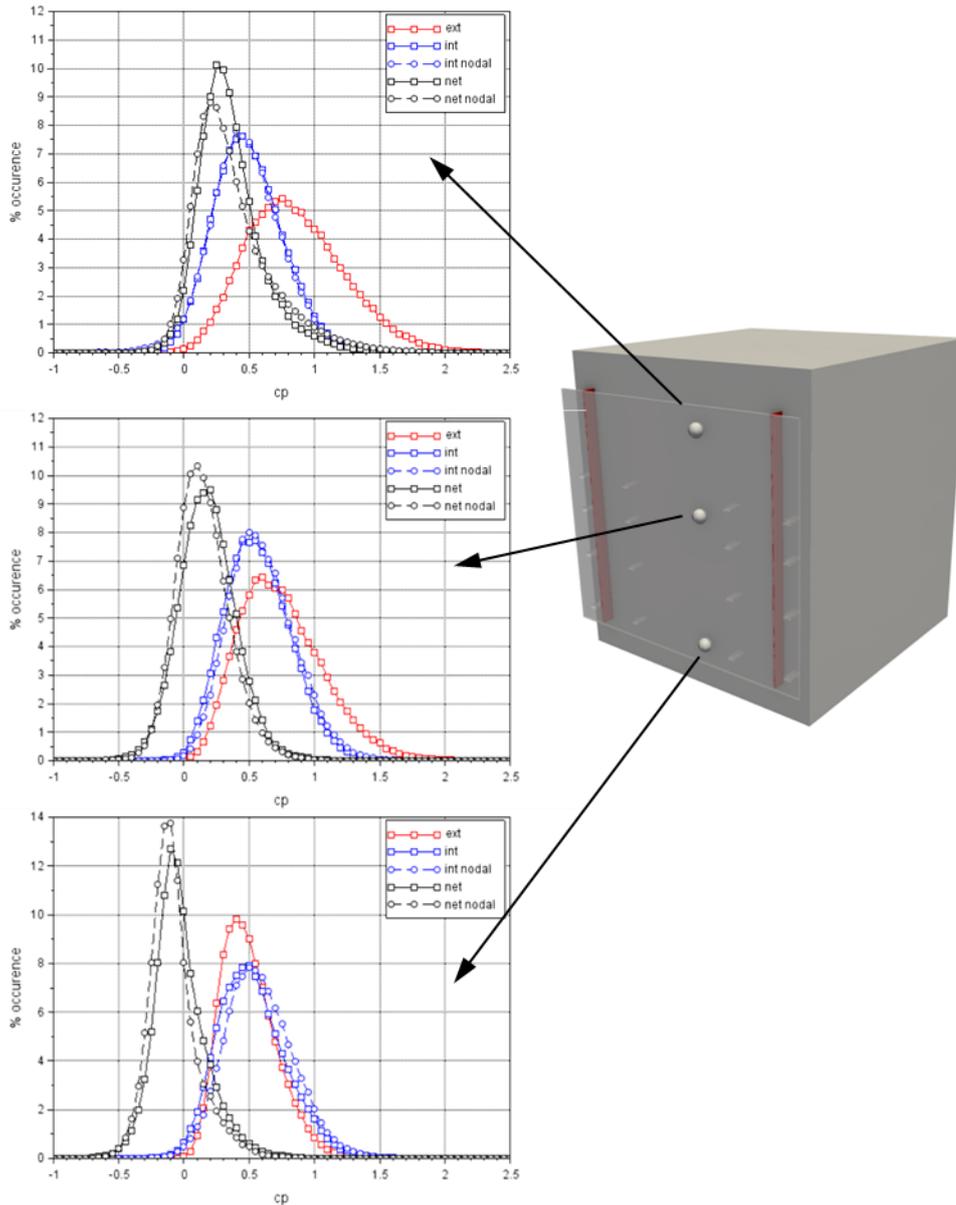


Figure 116 - PDF du coefficient de pression, intérieur, extérieur et net, en trois points de la façade double-peau, comparaison valeurs calculées et mesurées (configuration h_h_l_20_p_00_s_vert)

Au centre et en haut de la façade, l'analyse de la figure montre une superposition des PDF de la pression interne avec celles mesurées. Le modèle est donc à nouveau capable de très bien restituer la dynamique du signal de pression dans la lame d'air. Cependant les PDF du différentiel de pression calculées sont légèrement différentes de celles mesurées, et ce malgré le très bon accord des PDF de pression interne. Ainsi la reproduction de la dynamique du signal de pression interne ne suffit pas à restituer la dynamique du différentiel de pression, il faut également que les fluctuations à l'intérieur de la lame d'air soient synchrones avec les fluctuations sur la face extérieure.

En pied de façade, on constate au contraire une légère déviation de la PDF de la pression interne, alors que la PDF du différentiel de pression est en meilleur accord avec celle mesurée.

Même si l'analyse a mis en évidence des écarts entre les mesures en soufflerie et les valeurs calculées par le modèle, elle permet in fine de montrer que le modèle est non seulement capable de restituer le changement significatif de l'équilibrage en pression de la lame d'air avec la modification de la hauteur du bâtiment, mais aussi et surtout, de restituer une

dynamique en accord avec celle mesurée. La faiblesse principale du modèle réside essentiellement dans son incapacité à traduire les effets d'accélération de l'écoulement à l'entrée de la lame d'air, et les augmentations de charges associées.

5.3.2 Peau ouverte sur 4 pans

On s'intéresse à présent à une configuration géométrique dépourvue de segmentations. Elle s'écarte alors de la situation de canal plan qu'induisait les segmentations verticales. On s'intéresse dans un premier temps à une configuration avec un bâtiment à niveau. La Figure 117 trace le profil de pression interne et le différentiel net, moyens et de pointes, calculés par le modèle nodal, et les compare aux valeurs mesurées en soufflerie.

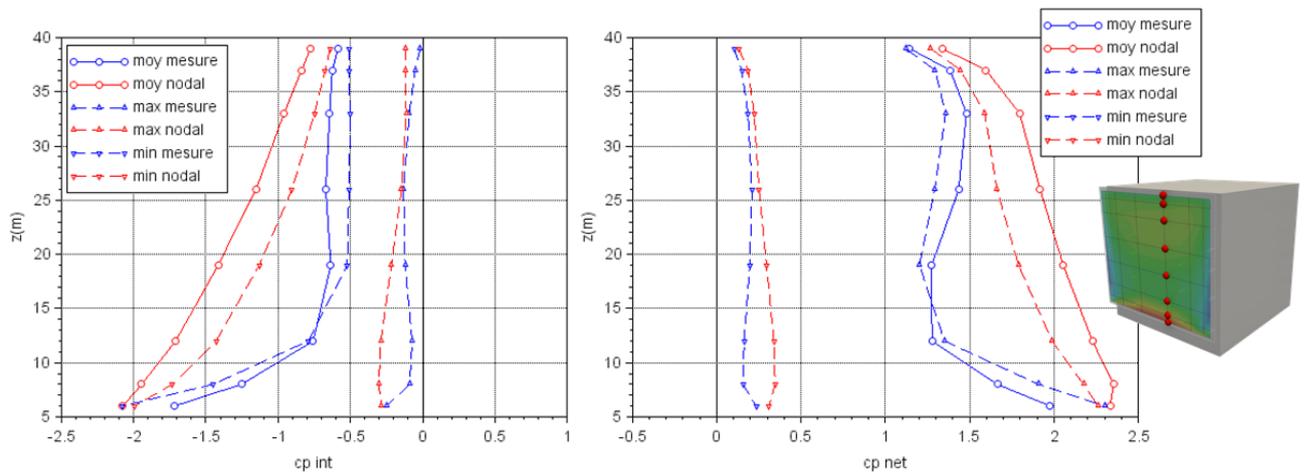


Figure 117 - profil du coefficient de pression, moyenne et de pointe, intérieur à gauche et net à droite, comparaison des valeurs calculées et mesurées (configuration h_n_l_20_p_00_s_n)

L'analyse de la figure montre un écart important entre les pressions calculées et mesurées dans la lame d'air, à la fois pour les valeurs moyennes et pour les valeurs de pointe. Si les pressions en haut et en pied de façade sont du même ordre de grandeur, c'est surtout sur la forme du profil que sur fait la différence. Alors que dans les mesures la pression était à peu près constante sur les 2/3 supérieurs de la lame d'air, on observe une pression qui va évoluer tout du long de la façade pour les valeurs calculées. La pression à l'intérieur de la lame d'air est alors plus faible que celle qui a été mesurée, et il en résulte alors une charge nette calculée significativement supérieure à celle mesurée.

La Figure 118 présente une cartographie du coefficient de pression moyen intérieur $\overline{c_{p_{int}}}$ et du différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ mesurés et calculés dans cette configuration afin de représenter le caractère bidimensionnel du champ pression.

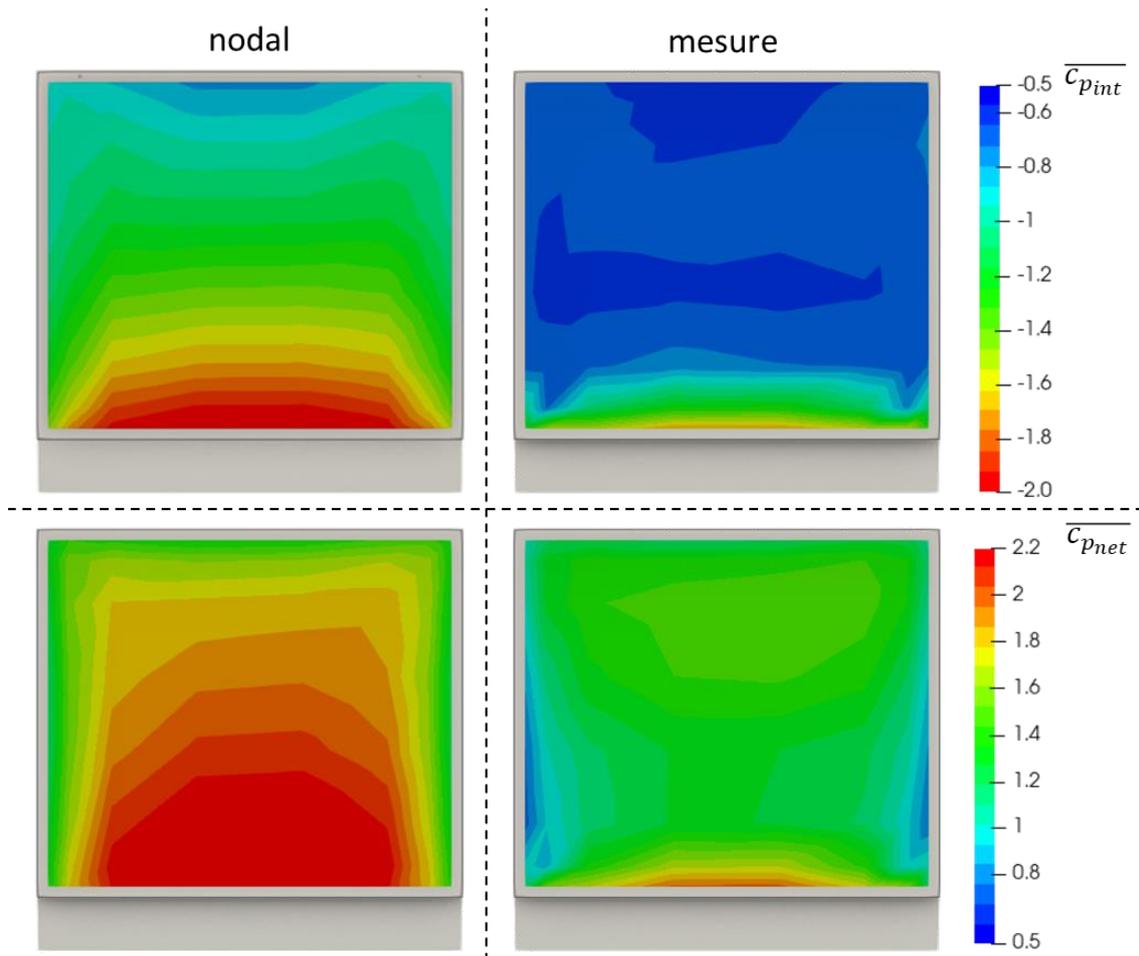


Figure 118 – cartographie du coefficient de pression moyenne, intérieur (en haut) et net (en bas), comparaison des valeurs calculées (à gauche) et mesurées (à droite) (configuration h_n_l_20_p_00_s_n)

Là encore, on observe une différence significative sur l'organisation du champ de pression calculé par rapport à celui mesuré. Si le modèle restitue bien l'augmentation des charges en pied de façade du fait de l'engouffrement de l'air à l'intérieur de la double-peau, son effet se propage sur une plus grande partie de la façade, a contrario de ce qui avait pu être observé dans le cas d'une peau segmentée verticalement.

Ainsi le modèle ne semble pas être en mesure d'équilibrer correctement la pression dans la lame d'air à partir des 3 bords en dépression et du bord en surpression

Cette limitation du modèle peut être imputable à plusieurs facteurs :

- la difficulté de représenter le caractère bidimensionnel et instationnaire de l'écoulement à partir d'un réseau constitué par une simple grille
- la non prise en compte de la dynamique de l'écoulement extérieur en entrée et en sortie du canal
- l'inhomogénéité de l'écoulement à l'engouffrement de l'écoulement

Mais c'est essentiellement la forte dynamique de l'écoulement dans la lame d'air qui semble mettre en défaut la modélisation nodale dans cette configuration.

La Figure 119 trace les PDF des signaux de pression calculés, et les compare aux mesures en soufflerie. L'analyse est faite en 3 points de la façade.

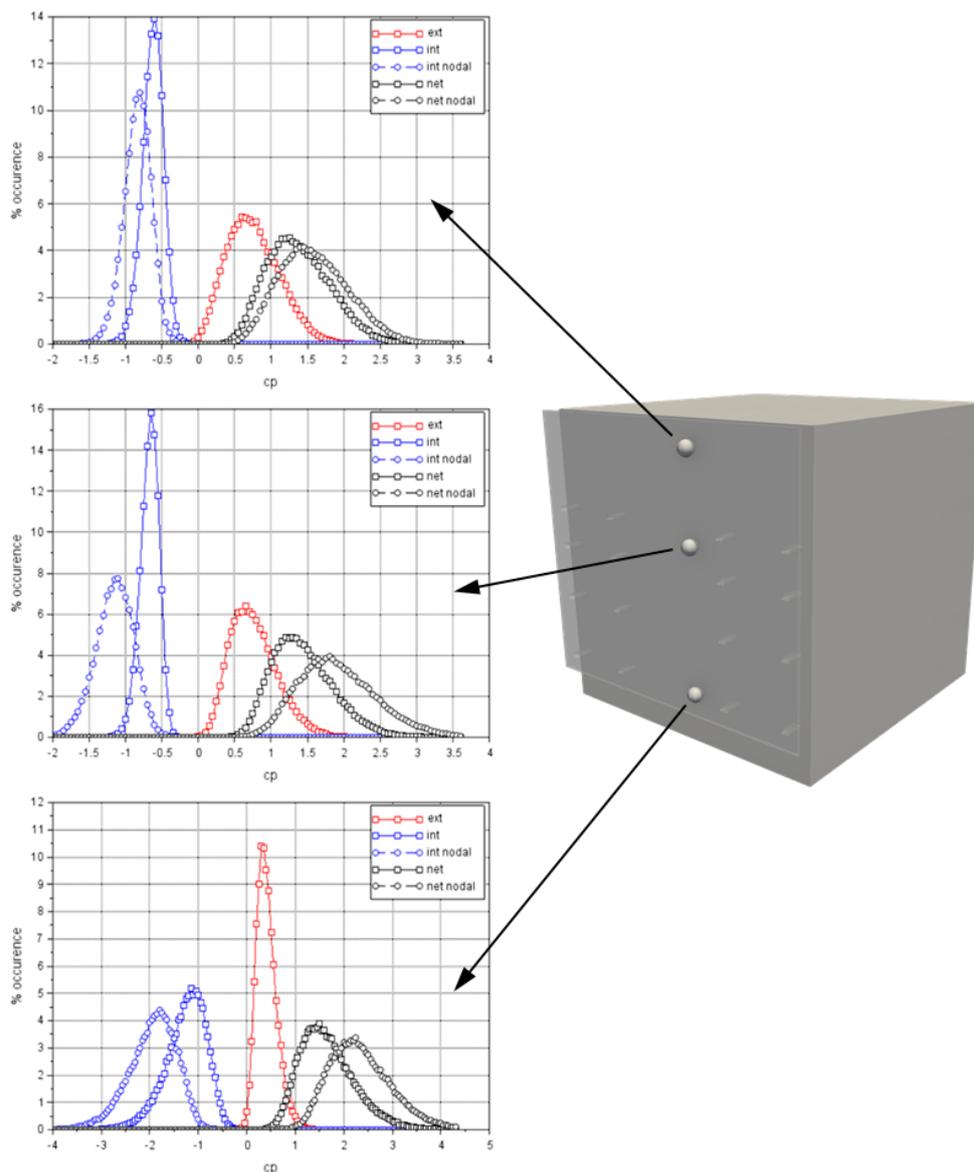


Figure 119 – PDF du coefficient de pression, intérieur, extérieur et net, en trois points de la façade double-peau, comparaison valeurs calculées et mesurées (configuration h_n_l_20_p_00_s_n)

La figure montre que dans cette configuration, les PDF obtenues par le modèle nodal sont très éloignées de celles mesurées. Même si qualitativement le modèle semble à même de restituer l'évolution de la forme de la PDF entre le haut et le bas de la façade, la comparaison avec les mesures montre que le modèle a du mal à restituer la bonne dynamique du signal de pression dans la lame d'air pour cette configuration.

On se propose à présent d'étudier le cas du bâtiment haut, toujours avec une façade non recoupée et ouverte sur ses 4 pans. La Figure 120 trace le profil de pression interne et le différentiel net, moyens et de points, alors que la Figure 121 présente une cartographie du coefficient de pression moyen intérieur $\overline{c_{p_{int}}}$ et du différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ mesurés et calculés.

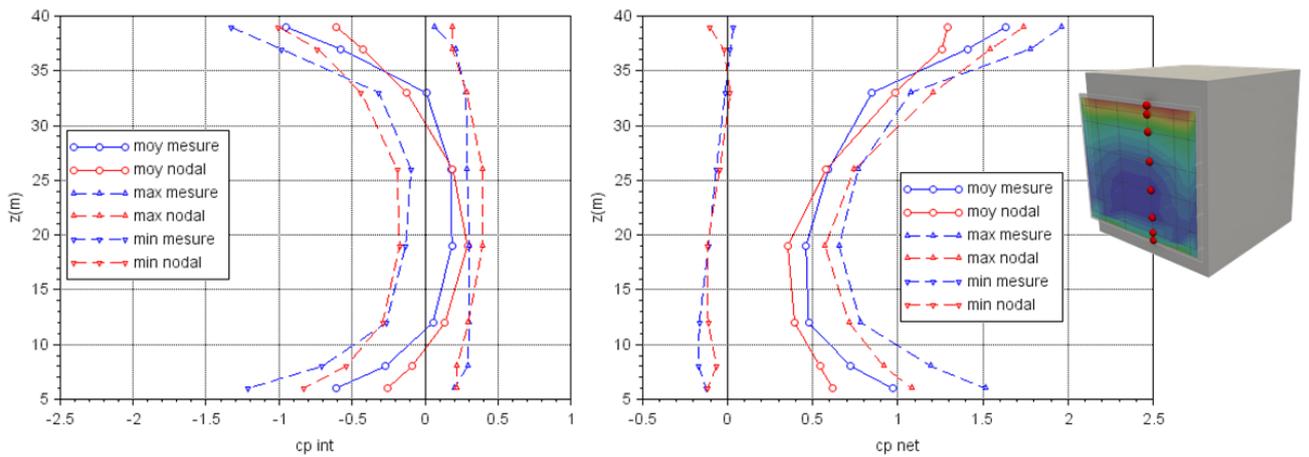


Figure 120- profil du coefficient de pression, moyenne et de pointe, intérieur à gauche et net à droite, comparaison des valeurs calculées et mesurées (configuration h_h_l_20_p_00_s_n)

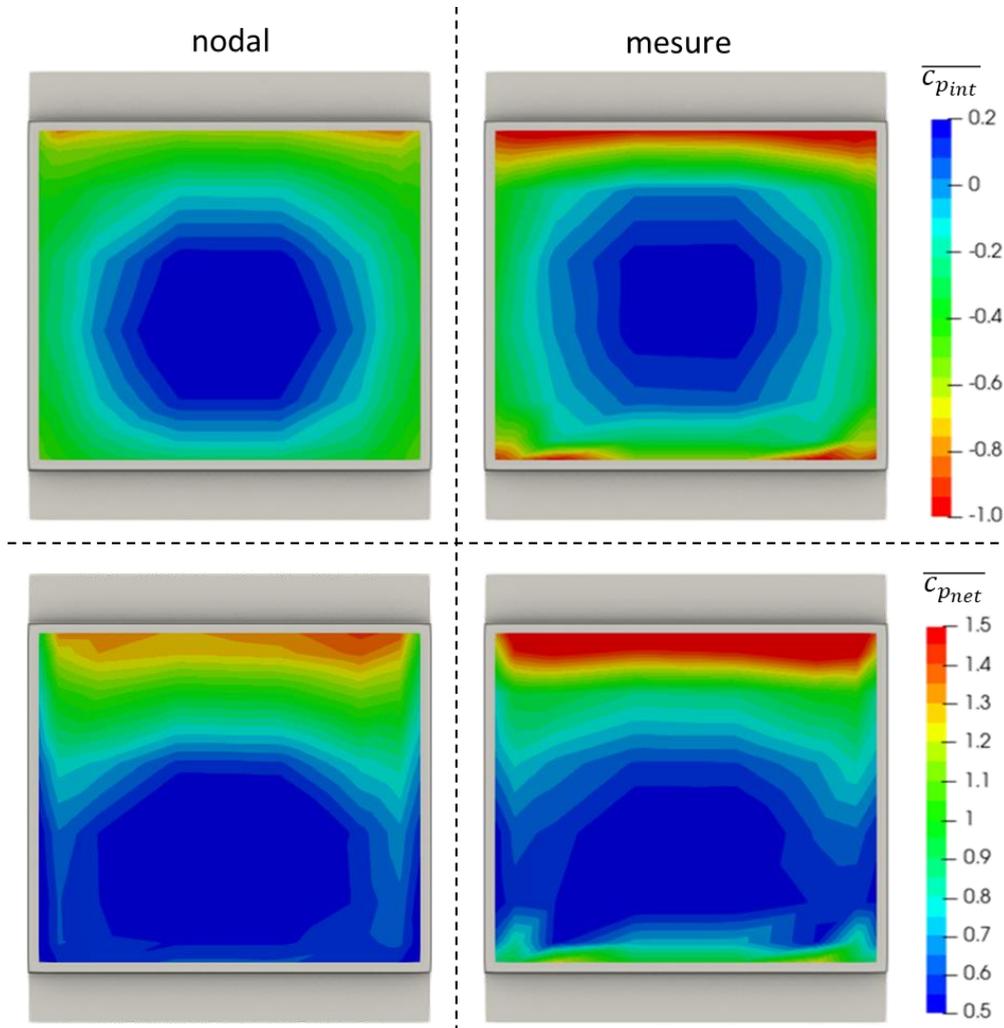


Figure 121 – cartographie du coefficient de pression moyenne, intérieur (en haut) et net (en bas), comparaison des valeurs calculées (à gauche) et mesurées (à droite) (configuration h_h_l_20_p_00_s_n)

Les figures montrent une meilleure restitution de l'évolution de la pression calculée dans la lame d'air par rapport au cas du bâtiment à niveau. Le modèle semble ainsi capable de prédire que le centre de la lame d'air sera en surpression, alors que la périphérie sera en dépression. Le différentiel de pression calculé présente également une allure satisfaisante, même si

encore une fois les fortes charges induites par l'engouffrement de l'écoulement dans la lame d'air ne sont pas bien restituées par le modèle.

La Figure 122 trace les PDF des signaux de pression calculés, et les compare aux mesures en soufflerie. L'analyse est faite en 3 points de la façade.

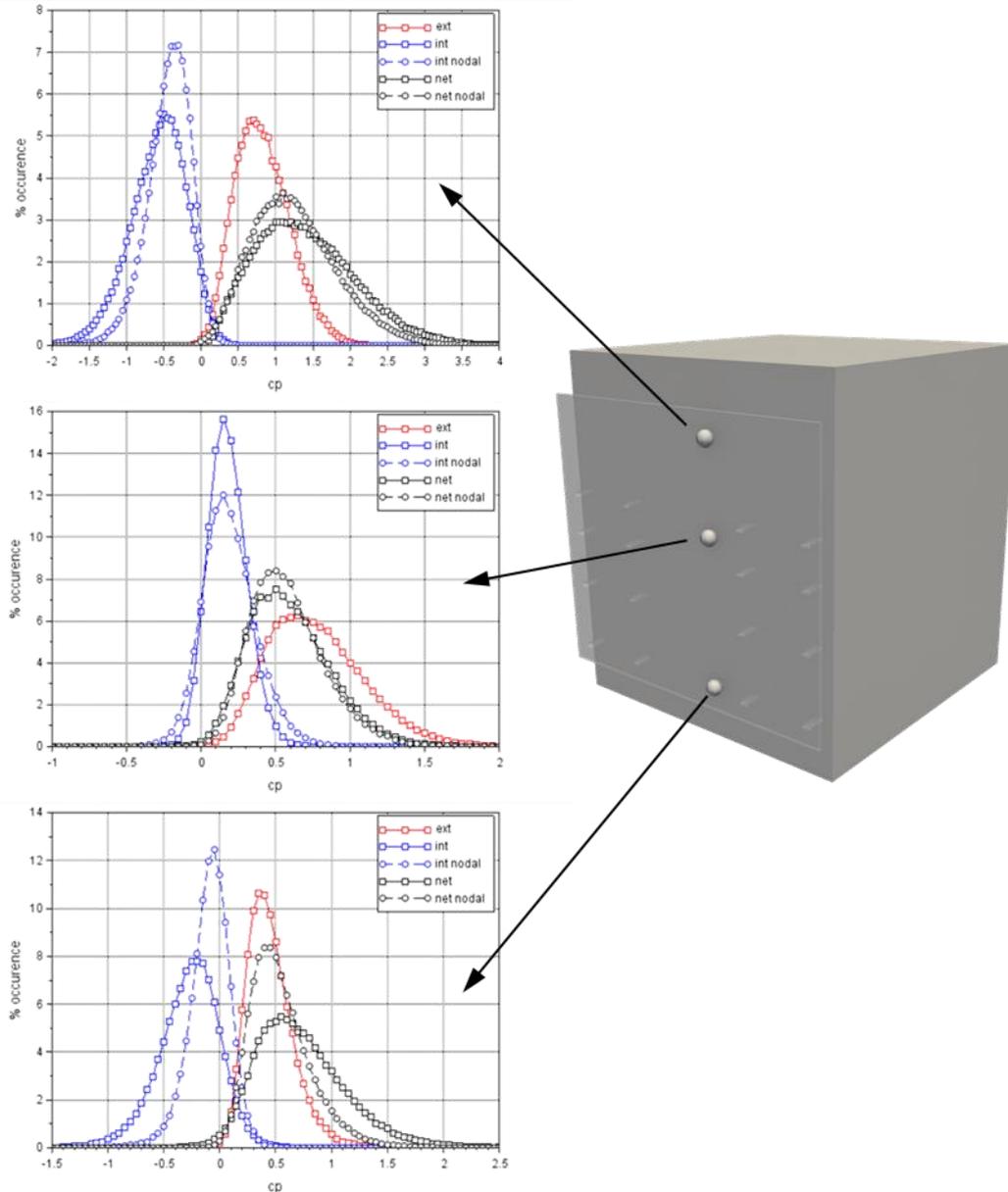


Figure 122 - PDF du coefficient de pression, intérieur, extérieur et net, en trois points de la façade double-peau, comparaison des valeurs calculées et mesurées (configuration h_h_l_20_p_00_s_n)

La figure montre qu'au centre de la façade, la PDF de la pression interne simulée par le modèle est en assez bon accord avec celle mesurée, quand bien même l'amplitude de la distribution semble plus large. La PDF du différentiel de pression est quant à elle bien reproduite. Ceci s'explique à nouveau par le fait que dans cette configuration, la dynamique du différentiel de pression est en grande partie induite par la dynamique du signal de pression sur la face extérieure de la double-peau. En partie haute et en pied de façade, le modèle ne semble pas par contre être en mesure de reproduire toutes la dynamique du signal. Ceci à nouveau du fait que le modèle ne peut reproduire les effets d'engouffrement de l'écoulement dans la lame.

Cette configuration d'une peau ouverte sur ses 4 pans est donc beaucoup plus challengeante pour le modèle nodal que la configuration avec segmentations verticales. La configuration du bâtiment à niveau, qui génère une très forte dynamique d'écoulement dans la lame d'air, ne semble pas pouvoir être reproduite par le modèle nodal. Cependant la configuration avec bâtiment haut, qui génère une dynamique plus raisonnable, semble quant à elle plus favorable à une restitution de l'équilibrage en pression de la lame d'air par le modèle.

5.3.3 Peau segmentée horizontalement

On s'intéresse à présent au cas d'une peau segmentée horizontalement. L'analyse §4.3 avait montré que ces segmentations, qui coupaient l'accès à la bordure supérieure ou inférieure de la lame d'air, entraînaient alors une modification significative de l'équilibrage en pression.

La Figure 123 à la Figure 126 présentent les cartographies du coefficient de pression moyen intérieur $\overline{c_{p_{int}}}$ et du différentiel de pression moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ mesurés et calculés pour deux hauteurs de bâtiment et les deux positions de la segmentation horizontale. La Figure 127 trace le profil de pression interne et le différentiel net, moyens et de pointes pour les 4 configurations.

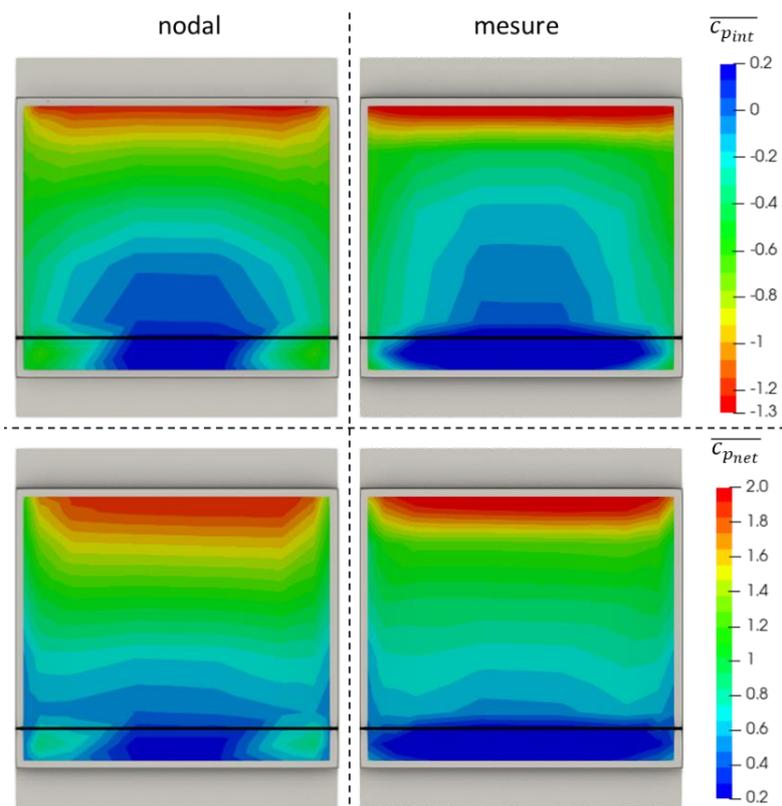


Figure 123 - cartographie du coefficient de pression moyenne, intérieur (en haut) et net (en bas), comparaison des valeurs calculées (à gauche) et mesurées (à droite) (configuration h_h_I_20_p_00_s_hb00)

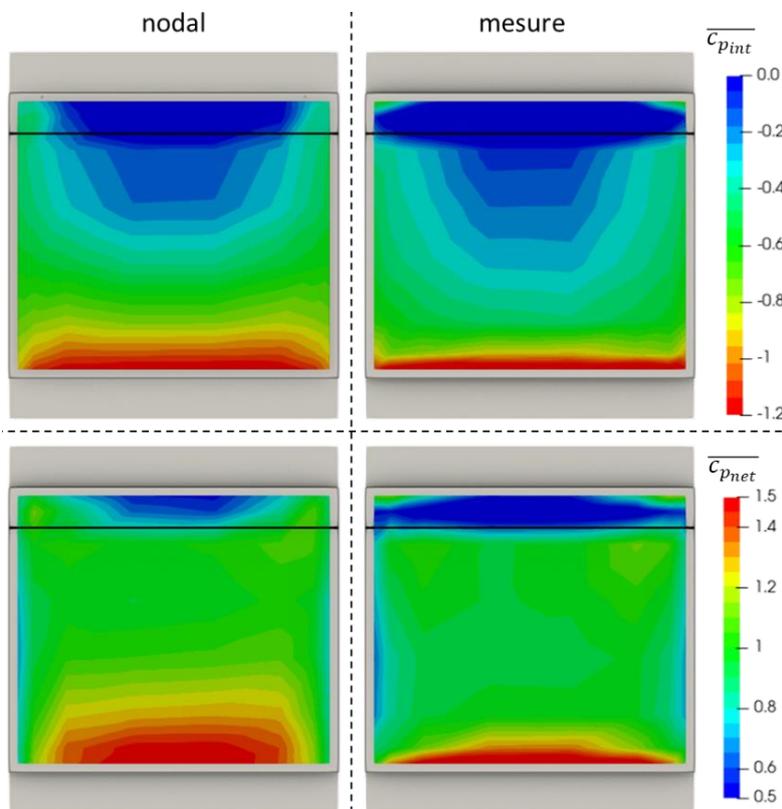


Figure 124 - cartographie du coefficient de pression moyenne, intérieur (en haut) et net (en bas), comparaison des valeurs calculées (à gauche) et mesurées (à droite) (configuration h_h_I_20_p_00_s_hh00)

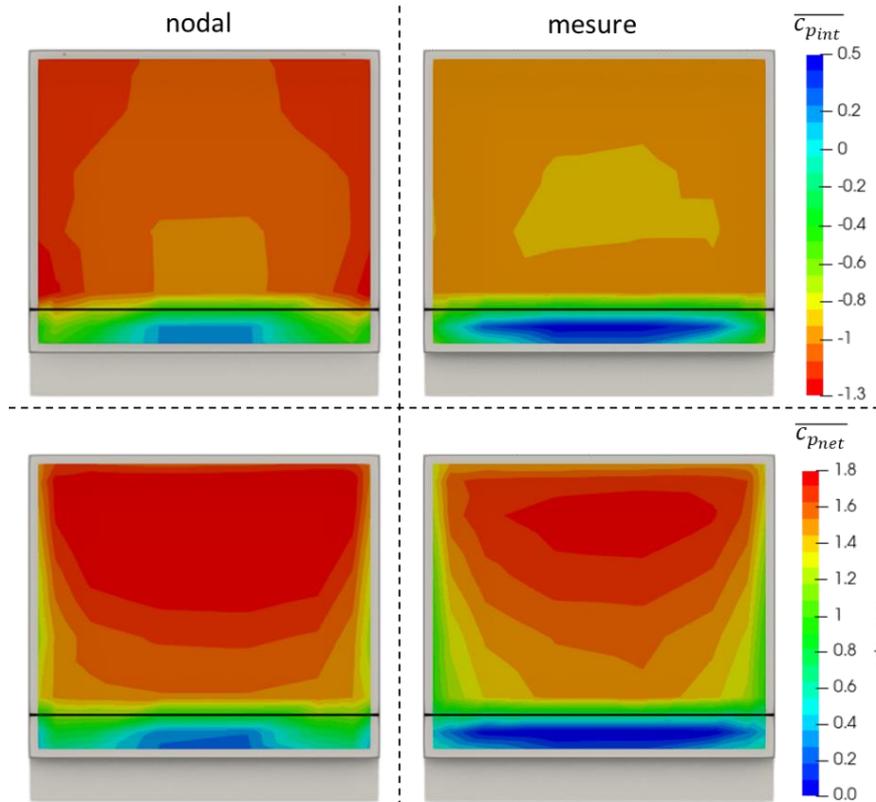


Figure 125 - cartographie du coefficient de pression moyenne, intérieur (en haut) et net (en bas), comparaison des valeurs calculées (à gauche) et mesurées (à droite) (configuration h_n_l_20_p_00_s_hb00)

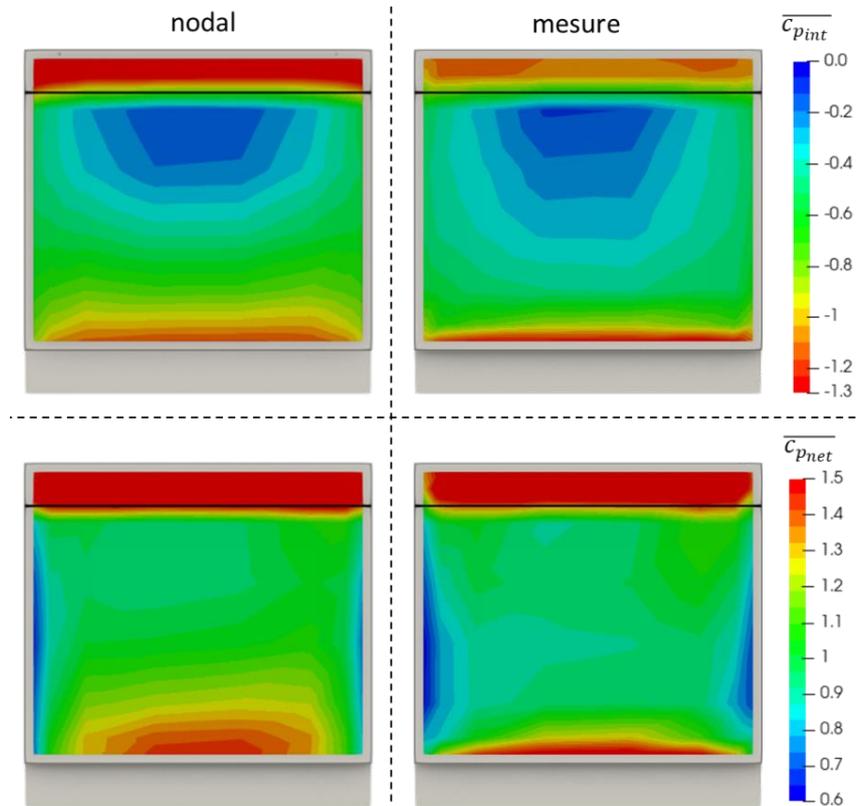


Figure 126 - cartographie du coefficient de pression moyenne, intérieur (en haut) et net (en bas), comparaison des valeurs calculées (à gauche) et mesurées (à droite) (configuration h_n_l_20_p_00_s_hh00)

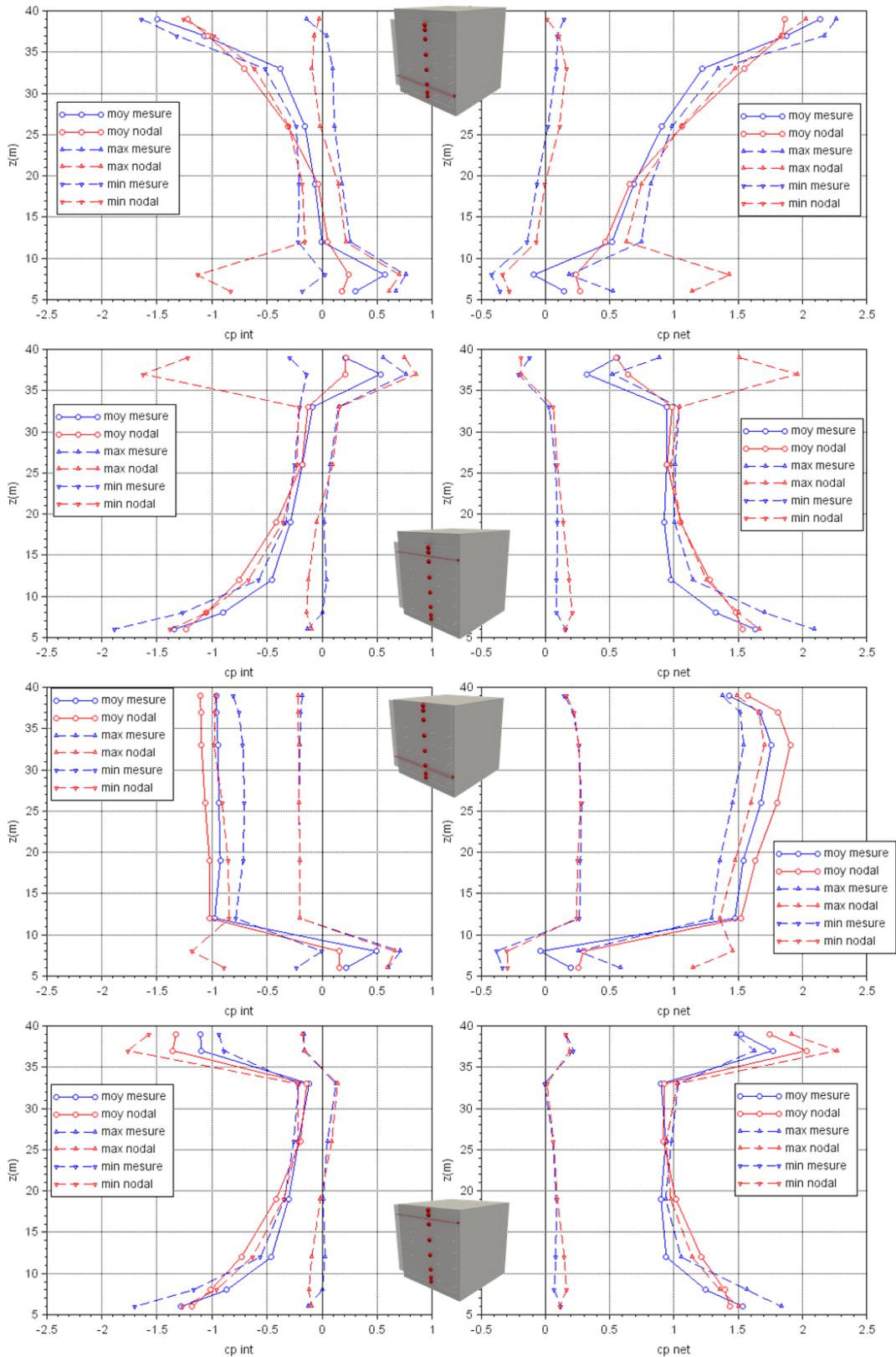


Figure 127 - profil du coefficient de pression, moyenne et de pointe, intérieur à gauche et net à droite, comparaison des valeurs calculées et mesurées, de haut en bas : $h_{h_l_20_p_00_s_hb00}$, $h_{h_l_20_p_00_s_hh00}$, $h_{n_l_20_p_00_s_hb00}$, $h_{n_l_20_p_00_s_hh00}$

Les cartographies des coefficients de pression moyenne obtenus par le modèle nodal dans ces 4 configurations sont qualitativement satisfaisantes. Le modèle semble en mesure de

prédire les variations importantes de l'équilibrage en pression induits par le changement de la hauteur du bâtiment ou la présence de segmentation horizontales. De plus le modèle semble à même de restituer l'évolution bidimensionnelle de la pression, dans le sens de la hauteur et de la largeur de la façade, de façon qualitativement satisfaisante.

Quantitativement, les profils de pression moyenne et de pointe montrent des écarts parfois significatifs entre les valeurs obtenues par le modèle nodal et celles mesurées en soufflerie. A nouveau les écarts les plus importants se situent au niveau des bordures des façades, du fait des difficultés du modèle à restituer les effets d'engoncement de l'écoulement dans la lame d'air. Si les écarts sur ces bordures conduisent à des chargements calculés inférieurs à ceux mesurés, au centre de la façade c'est plutôt l'inverse qui se produit, à savoir des charges supérieures à celles mesurées, ce qui est alors plutôt sécuritaire.

Pour les deux configurations avec segmentation haute, la peau est en compression sur la partie inférieure, et en dépression sur les bords latéraux. L'analyse des mesures avait montré que l'écoulement allait alors s'engouffrer par le pied de la façade, et s'évacuer par les côtés. La configuration est donc proche de celle d'une peau ouverte sur les 4 pans avec un bâtiment à niveau, configuration qui avait mis en défaut le modèle nodal. On peut constater ici une meilleure performance du modèle, même si les effets de grille en pied de façade sont à nouveau assez visibles.

La configuration bâtiment haut avec segmentation basse est similaire, avec un engouffrement de l'écoulement par le haut et une évacuation par les côtés. Les conclusions sur les performances du modèle sont assez similaires aux configurations précédentes.

Enfin pour la configuration du bâtiment à niveau avec segmentation basse, les 3 pans de la double-peau sont en dépression. C'est ainsi la configuration générant le plus faible débit dans la lame d'air. On retrouve alors un profil de pression calculé uniforme dans toute la hauteur de la lame d'air. La valeur de la pression interne $c_{p_{int}}$ calculée au centre de la façade est plus faible que celle mesurée, entraînant des charges nettes $c_{p_{net}}$ plus élevées. On retiendra au passage que le ratio entre les valeurs de pointe et les valeurs moyennes calculées est similaire au ratio entre les valeurs de pointe et les valeurs moyennes mesurées.

De façon générale, et modulo les écarts soulignés sur les valeurs moyennes, également applicables aux valeurs de pointes, la dynamique de l'écoulement dans la lame d'air semble bien restituée par le modèle nodal.

Les résultats obtenus sur cette configuration avec 3 pans ouverts sont donc plus satisfaisants que ceux obtenus avec la peau ouverte sur ses 4 pans. Le modèle semble à même de déterminer de façon qualitative le comportement de l'équilibrage en pression selon les différentes variations géométriques, quand bien même il subsiste des écarts assez élevés quantitativement, surtout en bordure de façade.

5.3.4 Peau poreuse

On se propose à présent d'étudier la possibilité de modéliser une peau poreuse avec l'approche nodale. On considère le cas d'une peau poreuse à 15%, segmentée verticalement et adossée à un bâtiment à niveau. C'est une des configurations étudiées §4.5.1 qui avait montré un impact très significatif de la porosité sur l'équilibrage en pression de la lame d'air.

Afin de prendre en compte l'effet de la porosité, le modèle nodal est complété de nouvelles conditions aux limites sur lesquelles on prescrit les pressions mesurées sur la face externe de la façade double-peau. Ces nouvelles conditions limites sont alors reliées aux nœuds de calcul par des branches dites de « perméabilité ». Ces branches ne sont considérées que pour les

nœuds de calcul inclus dans la zone poreuse de la façade. Un schéma de principe est proposé Figure 128.

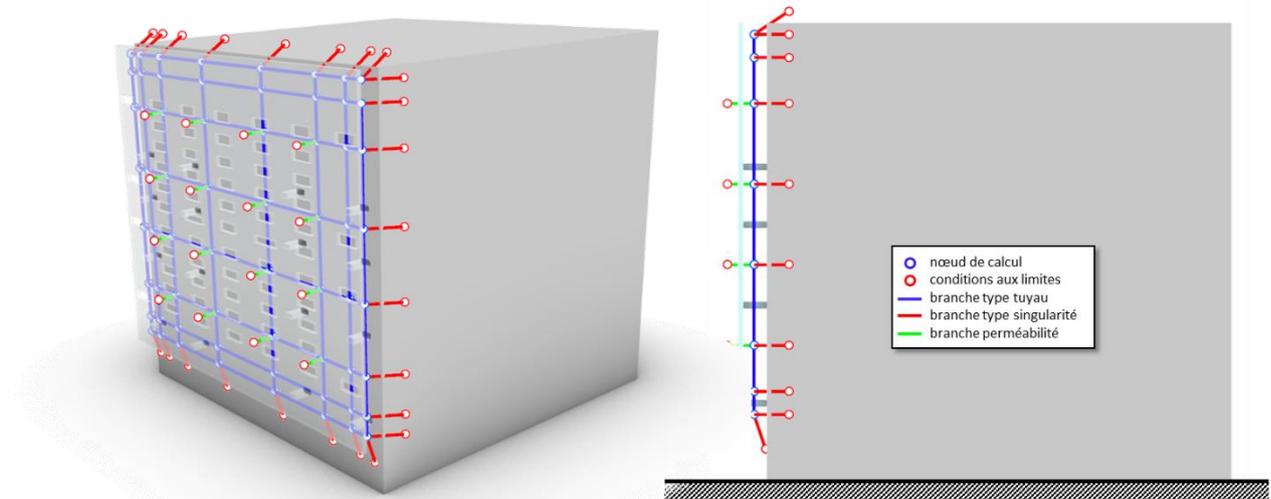


Figure 128 - adaptation du modèle nodal pour la prise en compte de la porosité

Les branches de perméabilité correspondent à un modèle proposé dans le code de calcul MATHIS [13] qui permet de simuler le passage d'un débit d'air à travers une surface poreuse. Le modèle prend en entrée deux paramètres qui sont le débit traversant la branche Q_{permea} en fonction du delta de pression Δp_{permea} appliqué aux bornes de la branche. On se propose de déterminer ces paramètres à l'aide d'un coefficient de pertes de charge :

$$\Delta p_{permea} = \frac{1}{2} \rho \xi_{permea} \left(\frac{Q_{permea}}{S_{permea}} \right)^2$$

Avec S_{permea} la surface représentative de la façade couverte par la branche reliant le nœud de calcul à la condition aux limites, et ξ_{permea} une perte de charge représentative de la porosité. Cette dernière peut être par exemple évaluée avec les abaques de pertes de charge de l'Idel'Cik [15]. Ces abaques donnent ainsi pour une plaque à trous $\xi_{permea} = 400$ avec une porosité de 8%, et $\xi_{permea} = 100$ pour une porosité de 15%.

La Figure 129 trace le profil du coefficient de pression à l'intérieur de la lame d'air, ainsi que le différentiel de pression calculé pour plusieurs valeurs de ξ_{permea} , et les compare aux valeurs mesurées sur un peau ayant une porosité de 15%.

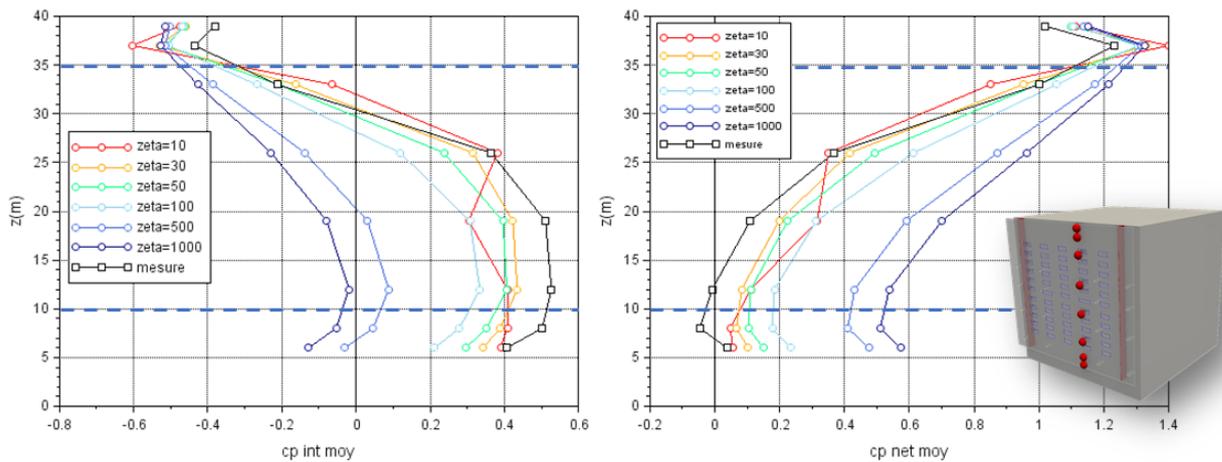


Figure 129 – profil du coefficient de pression moyenne, intérieur à gauche et net à droite, comparaison aux mesures des pressions calculées pour plusieurs valeurs de ξ_{permea} (configuration h_n_I_20_p_15_s_vert)

La figure montre que la forme des profils est représentative de celle des profils mesurés. Les profils calculés se rapprochent progressivement de ceux mesurés au fur et à mesure que ξ_{permea} diminue, et donc que la porosité augmente.

La valeur théorique de ξ_{permea} pour une porosité de 15% est $\xi_{permea} = 100$. La figure montre que cette valeur est trop élevée pour être représentative des profils de pression mesurés. Ceci est peut-être à relier à une limitation de la modélisation des conditions limites sur lesquelles on prescrit ici une pression statique, alors que le modèle attend une pression totale. En d'autres termes, ces conditions aux limites ne prennent pas en compte forcément bien en compte la pression dynamique de l'écoulement sur la face extérieure de la lame d'air. Or cette pression dynamique peut inciter l'écoulement à pénétrer au travers de la porosité de la façade. C'est peut-être pour cela qu'il faut diminuer artificiellement cette porosité pour « inciter l'écoulement à pénétrer » dans la lame d'air via la porosité.

Ainsi la valeur optimale du coefficient de pertes de charge pour se rapprocher le plus des mesures semble ici être $\xi_{permea} = 30$. En deçà, la figure montre que le profil de pression à l'intérieur de la lame d'air tend à s'écarter du profil mesuré, avec une baisse de la pression au centre de la zone poreuse. Ici, le biais de modélisation induirait un engouffrement de l'écoulement trop important dans la lame d'air, puisqu'en « réalité », l'écoulement va préférer poursuivre sa course le long de la façade extérieure, plutôt que de pénétrer dans la lame d'air. La circulation d'air trop importante dans la lame d'air va alors induire des vitesses trop élevées, abaissant ainsi la pression statique sur la face interne de la double-peau.

Ces deux biais de modélisation mettent alors en évidence une difficulté du modèle à bien restituer la compétition entre l'inertie de l'écoulement à l'extérieur de la lame d'air et les effets de porosité.

La Figure 130 trace le profil de pression interne et le différentiel net, moyens et de pointes, calculés avec $\xi_{permea} = 30$. La figure rappelle également les profils calculés avec une peau pleine (déjà présentée Figure 111) afin de mettre en relief l'effet de la porosité, et la façon dont le resitue le code nodal.

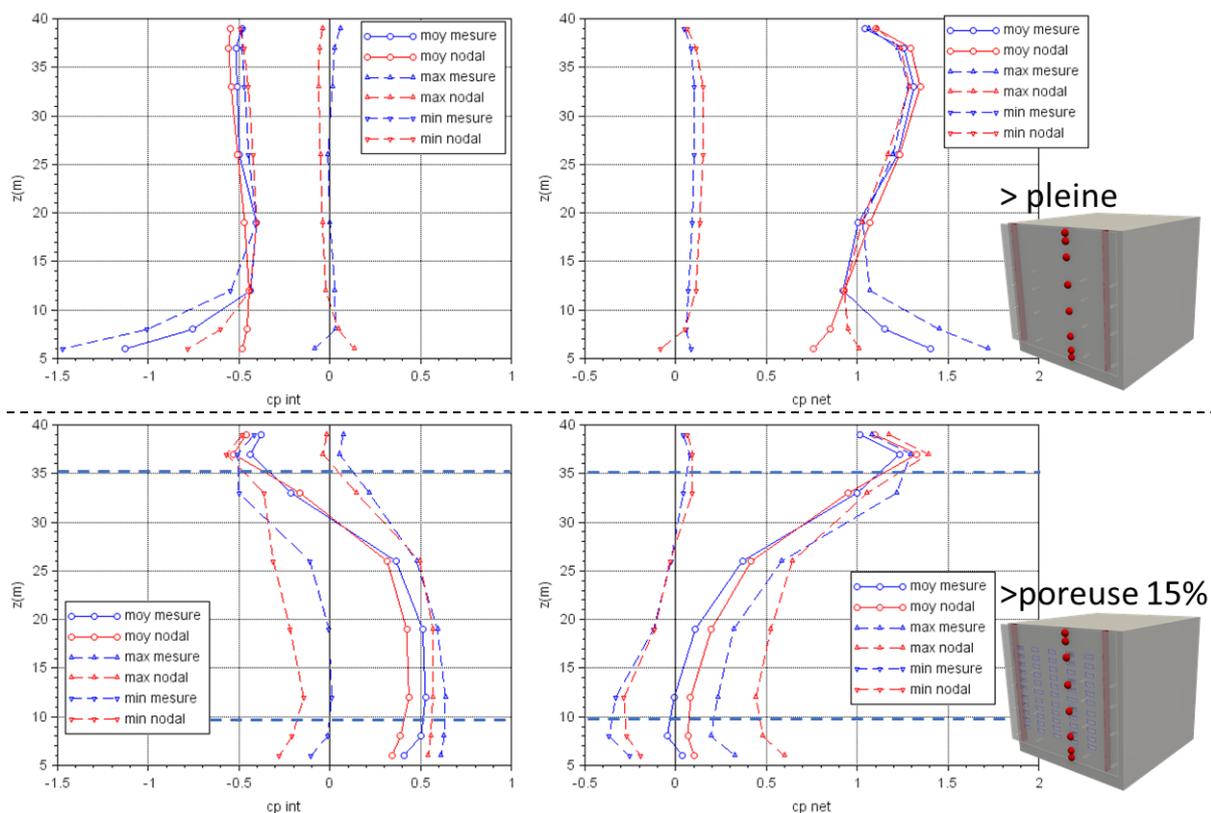


Figure 130 – profil du coefficient de pression, moyenne et de pointe, intérieur à gauche et net à droite, comparaison des valeurs calculées et mesurées, en haut: h_n_l_20_p_00_s_v ; en bas : h_n_l_20_p_15_s_v

La figure montre alors que le code nodal est à même de représenter le changement radical de l'équilibrage en pression induit par la présence de porosités sur la façade. Les profils de pression moyenne sont bien restitués, même si la pression dans la lame d'air est plus faible en pied de façade. Cet écart est amplifié sur les pressions de pointes, ce qui se répercute sur le différentiel de pression de pointe, avec des charges de pointes plus élevées en pied de façade. Pour compléter l'analyse sur la dynamique du signal la Figure 131 trace les PDF des signaux de pression calculés en 3 points de la façade.

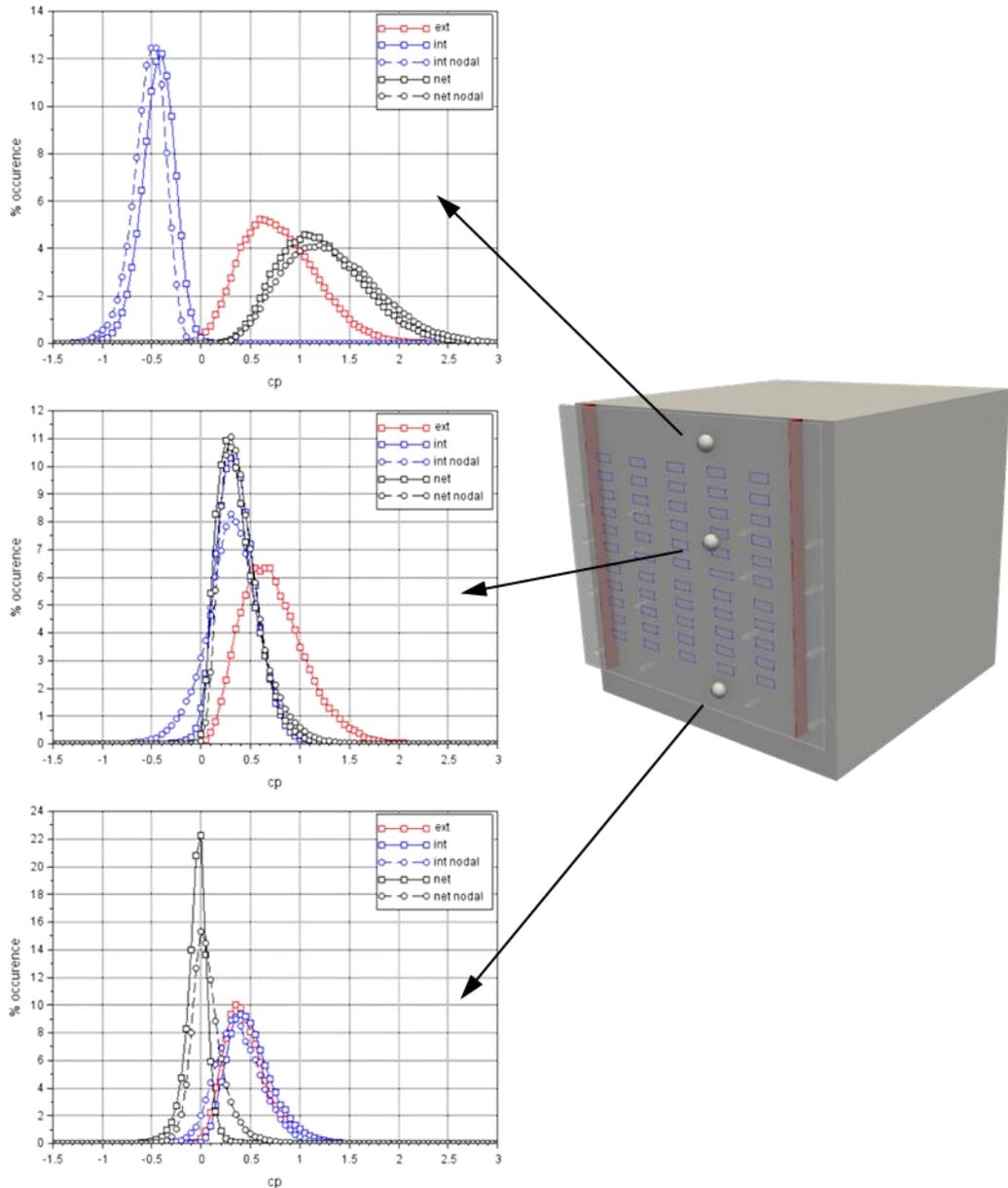


Figure 131 - PDF du coefficient de pression, intérieur, extérieur et net, en trois points de la façade double-peau, comparaison des valeurs calculées et mesurées (configuration h_n_l_20_p_15_s_vert)

A nouveau le modèle semble capable de restituer qualitativement l'évolution de la PDF de la pression à l'intérieur de la lame d'air $c_{p_{int}}$ pour les 3 points de mesure, et les conséquences sur la PDF du différentiel de pression $c_{p_{net}}$. L'analyse des PDF dans la zone poreuse met en évidence un problème de restitution de la queue de la distribution sur la partie négative de la PDF de la pression intérieure $c_{p_{int}}$. Cet écart dans la distribution est à mettre en relation avec les pressions de pointes plus basses qui ont été constatées sur le profil Figure 130. De manière symétrique, cet écart dans la distribution de la pression interne se répercute sur la queue de la distribution du différentiel de pression $c_{p_{net}}$, qui conduit à des chargements de pointes plus élevées.

Cette modification de la PDF de pression interne peut certainement être à nouveau attribuée au biais de modélisation souligné précédemment. Ces pressions très basses sont probablement associées à des vitesses fortes créées très localement dans le temps, du fait d'un engouffrement de l'air dans la peau, induit par des différentiels de pression très élevés entre le haut et le bas de la zone poreuse, eux aussi très localisés dans le temps. En « réalité »,

du fait de la dynamique de l'écoulement à l'extérieur de la façade double-peau, ces événements ne conduiraient certainement pas un engouffrement aussi fort de l'écoulement dans la lame d'air et la génération de ces fortes vitesses.

Ainsi si le code nodal permet à nouveau de bien restituer qualitativement la dynamique de l'équilibrage en pression dans la lame d'air en présence d'une porosité, certains écarts quantitatifs restent cependant à signaler. La limitation la plus forte pour l'application du modèle à cette configuration est le choix de ξ_{permea} qui est difficile à faire a priori, car il semble dépendre non seulement de la porosité de la façade, mais aussi de la dynamique de l'écoulement sur la façade extérieure.

5.3.5 Peau poreuse entièrement recoupée

On se propose de tester le modèle sur une dernière configuration qui est celle d'une double-peau entièrement recoupée et poreuse. Les mesures effectuées dans cette configuration, présentée §4.5.3, avaient montré que l'équilibrage en pression ne dépendait ni de la porosité de la peau, ni de la hauteur du bâtiment, mais juste des fluctuations de la pression appliquée par le vent sur la face extérieure de la zone recoupée.

La Figure 130 trace le profil de pression interne et le différentiel net, moyens et de pointes, calculés et les compare aux valeurs mesurées.

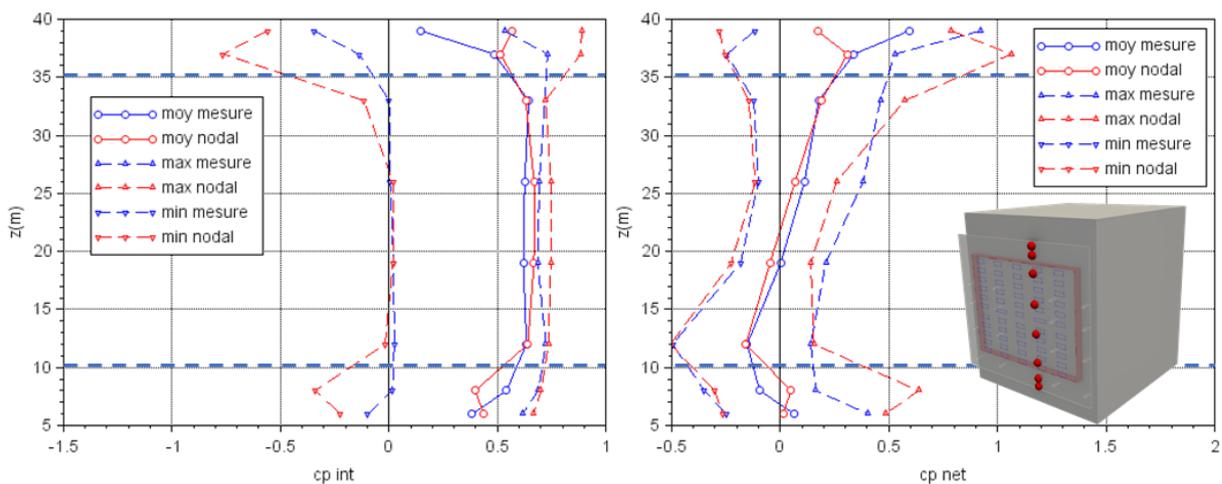


Figure 132- profil du coefficient de pression, moyenne et de pointe, intérieur à gauche et net à droite, comparaison des valeurs calculées et mesurées, (configuration h_h_l_20_p_15_s_p)

La figure montre que le profil de pression moyenne à l'intérieur de la lame d'air s'équilibre à une valeur comparable à celle mesurée en soufflerie. On retrouve notamment que la pression du différentiel moyen $\overline{c_{p_{net}}}$ change de signe entre le haut et le bas de la façade, à nouveau en accord avec ce qui a pu être mesuré en soufflerie. On notera que la valeur de la pression au centre de la zone poreuse est légèrement plus élevée que celle mesurée en soufflerie. La dynamique du signal de pression semble également bien restituée, avec des pressions de pointe calculées proches de celles qui ont pu être mesurées en soufflerie. Afin d'explorer plus en détail cette dynamique, la Figure 133 trace les PDF des signaux mesurés en 3 points de la façade.

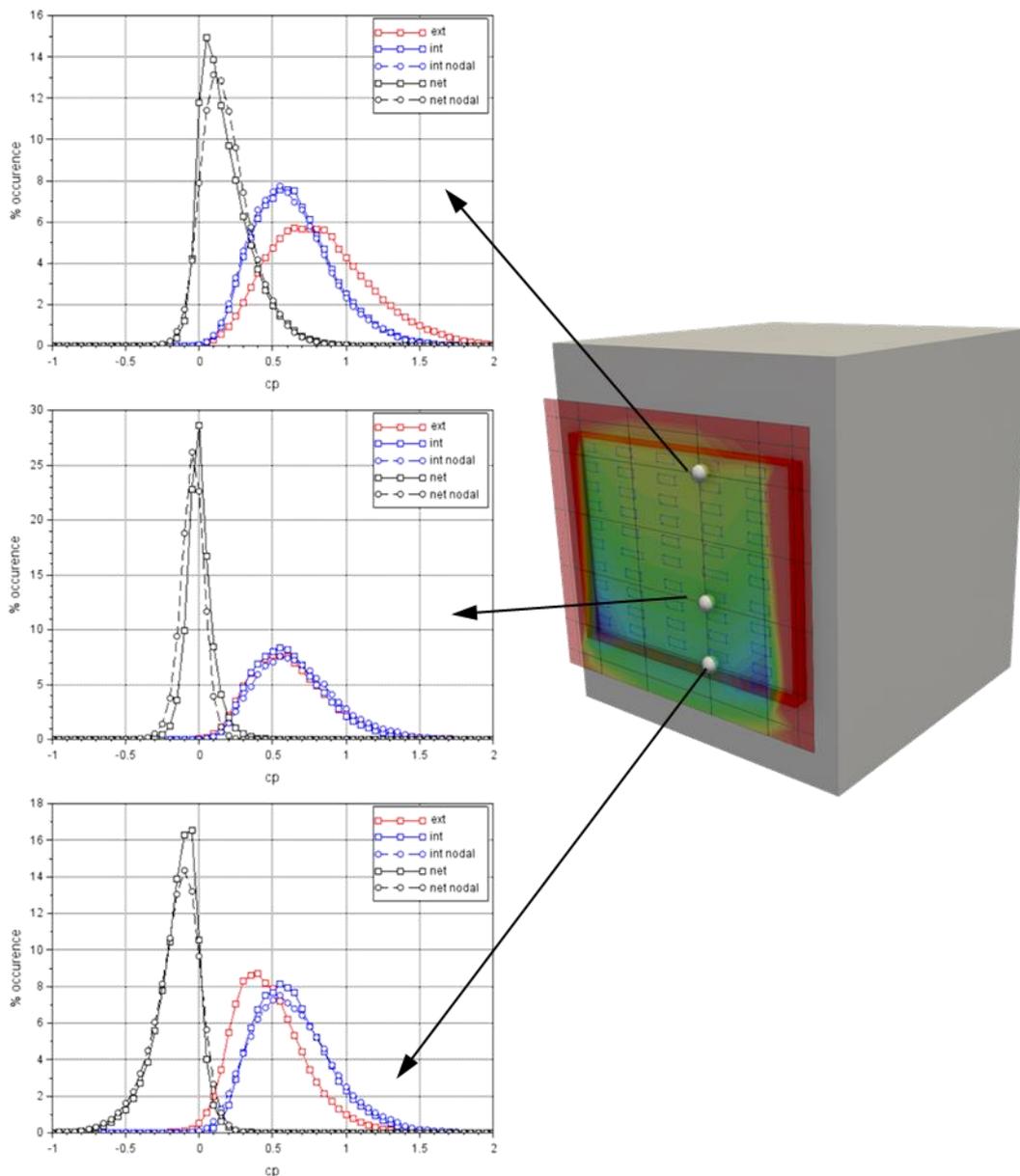


Figure 133 - PDF du coefficient de pression, intérieur, extérieur et net, en trois points de la façade double-peau, comparaison des valeurs calculées et mesurées (configuration h_p_l_20_p_15_s_p)

L'analyse de la figure montre alors que le modèle nodal est en mesure de prédire la forme de la PDF de pression intérieure $c_{p_{int}}$, mais également le changement de forme assez singulier de la PDF du différentiel de pression $c_{p_{net}}$ entre le haut et le bas de la lame d'air. En plus de la reproduction de la forme de cette PDF, les valeurs sont également quantitativement en très bon accord avec ce qui peut être mesuré en soufflerie.

Ainsi le modèle nodal semble être parfaitement capable de restituer d'équilibrage instantané de la pression à l'intérieur de la lame d'air d'une façade double-peau poreuse entièrement recoupée du fait des fluctuations de pression sur la face externe. Il permet ainsi évaluation plus précise et maîtrisée des charges au vent que ce que pouvait proposer l'Eurocode sur cette configuration, tel que présenté Figure 99.

5.4 SYNTHÈSE SUR LE MODÈLE NODAL

Pour rappel, le principal intérêt quant à l'utilisation du modèle nodal est de pouvoir simuler la propagation des fluctuations de pression au sein de la lame d'air, dans le cas où celle-ci ne pourrait être reproduite en soufflerie sur des maquettes à l'échelle trop réduite. En ce sens, le modèle présente des performances très contrastées en fonction des configurations géométriques investiguées.

Sur des configurations géométriques où la dynamique d'écoulement à l'intérieur de la lame d'air est assez faible, le modèle semble être capable de reproduire l'équilibrage dynamique en pression, avec toutes ses subtilités. La simulation des PDF, à la fois du signal de pression intérieure, mais aussi du signal du différentiel de pression net, présente des accords assez remarquables avec ce qui a pu être mesuré en soufflerie. L'outil présente alors un fort intérêt pour dimensionner des configurations où les charges moyennes sont faibles, mais les charges de pointe sont non négligeables, et semblant répondre à l'équilibrage dynamique des fluctuations de pression aux différentes ouvertures de la lame d'air.

Le modèle semble cependant présenter de fortes limitations dans certaines configurations d'écoulement :

- il restitue d'abord assez mal les charges induites par les inhomogénéités de l'écoulement à l'engouffrement dans la lame d'air. La nature même du modèle nodal ne permet pas de restituer les accélérations engendrées par ces inhomogénéités. Les tentatives de recréer artificiellement ces accélérations, via une réduction de l'épaisseur de la lame dictée par une connaissance a priori de l'écoulement, ont montré des performances somme toute assez relatives, notamment sur les aspects dynamiques du signal de pression dans la lame d'air.

- il a du mal à gérer les fortes dynamiques d'écoulement au sein de la lame d'air, notamment dans le cas d'une ouverture sur 4 pans, où l'air s'engouffre sur le pan inférieur et s'évacue par les 3 autres pans. La difficulté du modèle à prédire cette configuration peut s'expliquer par une discrétisation assez sommaire, sous forme d'une grille de canalisations, d'un écoulement 2D qui devient trop complexe.

- enfin le modèle présente des difficultés à reproduire l'engouffrement de l'air par les porosités de la double-peau, du fait qu'il ne prend pas en compte la compétition entre cet engouffrement par les porosités et la dynamique de l'écoulement à l'extérieur de la façade.

Cette problématique de la restitution de la dynamique de l'écoulement à l'extérieur de la double-peau peut également expliquer les écarts de modélisation évoqués sur les points précédents. En ce sens des artifices de modélisation sont certainement à mettre en œuvre pour améliorer les performances du modèle, et élever ainsi son niveau de confiance.

Au-delà de la seule perspective de son application pratique, ces travaux sur le modèle nodal ont permis également, via l'exploration des limites du modèle, une meilleure compréhension des mécanismes de l'équilibrage en pression de la lame d'air.

6 APPLICATION PRATIQUE AU DIMENSIONNEMENT AU VENT DES FAÇADES DOUBLE-PEAU

On se propose dans cette dernière partie de l'étude de revenir au problème d'ingénierie du dimensionnement au vent des façades double-peau, et de décliner des stratégies d'évaluation des charges aux vents à partir des enseignements dégagés des mesures sur l'expérimentation modèle et des simulations réalisées avec le modèle nodal.

6.1 APPLICATION DES RESULTATS DE L'ETUDE AU PROBLEME D'INGENIERIE

L'analyse des mesures sur l'expérimentation modèle a montré que de faibles variations de la géométrie du bâtiment sur lequel elle était adossée, ou de la géométrie de la façade double-peau elle-même, pouvaient entraîner de très fortes variations des charges au vent sur la double-peau.

Ainsi compte tenu de l'infinité de combinaisons géométriques de bâtiments et de façades double-peau qui puisse exister sur le parc de bâtiments existants ou à bâtir, il semble difficile de pouvoir dégager une règle générique permettant de couvrir l'ensemble des configurations géométriques possibles.

6.1.1 Dimensionnement majorant

Pour un bâtiment générique, en l'absence de toute connaissance sur la façon dont la pression dans la lame d'air va s'équilibrer, une démarche sécuritaire et dimensionnante consisterait à considérer la charge maximale possible qui puisse s'appliquer sur une telle façade, dans une configuration la plus majorante possible. En ce sens, l'analyse de charges obtenues toutes configurations confondues au §4.7.1 a permis de dresser une première ébauche de ce que serait un tel cas de charge majorant. Il est schématisé Figure 134.

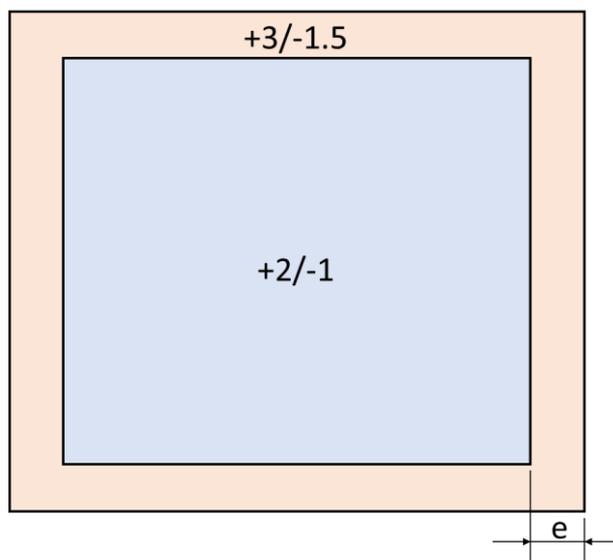


Figure 134 -définition d'un cas de charge majorant pour les façades double-peau

Au centre de la façade, une compression maximale de pointe de +2 et un arrachement de pointe de -1 sont définis. Ils résultent de configurations défavorables où la pression dans la lame d'air a un signe opposé à celui de la pression sur la face externe de la double-peau. Même si la Figure 103 présentait une zone avec des charges plus faibles au centre de la façade, l'analyse avait montré qu'il était difficile de définir les contours de cette zone, qui dépendaient fortement de la configuration géométrique de la façade et du bâtiment sur lequel elle est adossée.

En bordure de façade, une compression maximale de pointe de +3 et un arrachement de pointe de -1.5 sont définis. Les compressions maximales prennent à la fois en compte le cas d'une façade recoupée en drapeau, et alors assimilable à un acrotère, mais également les effets d'engoncement de l'écoulement dans la lame d'air qui augmentent localement les charges. Les arrachements de pointe correspondent à des configurations où l'écoulement du vent est rasant, et génère très localement des différentiels de pression élevés écartant la double-peau de la façade du bâtiment.

Il reste alors à définir la distance notée e de la bordure sur laquelle s'applique ces charges. Elle va dépendre à la fois de l'écoulement du vent à l'échelle de la façade, mais également de l'écoulement à l'échelle de la lame d'air. La valeur de e va alors résulter d'une combinaison entre l'épaisseur de la lame d'air et les prescriptions de l'Eurocode pour le dimensionnement des façades. On propose alors :

$$e = \max \left(2a, \frac{b}{5} \right)$$

Avec a l'épaisseur de la lame, et b la plus grande dimension (hauteur, largeur) de la façade.

Ainsi ce cas de charge majorant serait alors en mesure de couvrir de façon sécuritaire et conservatrice l'ensemble des configurations de façade double-peau qui pourraient être installées sur un bâtiment. On notera que ce cas de charge est plus sévère que celui proposé dans la fiche de la SNFA [11].

6.1.2 Optimisation de l'évaluation des charges

L'analyse des mesures a cependant montré que l'équilibrage en pression pouvait abaisser très grandement ces charges au vent. Il peut donc être intéressant de pouvoir proposer un dimensionnement optimisé, prenant en compte ces charges plus faibles, afin de diminuer le coût de construction de la façade double-peau. Il faut cependant que cette évaluation se fasse de façon sécuritaire.

La meilleure approche pour évaluer les charges au vent reste la mesure directe en soufflerie à Couche Limite Atmosphérique du différentiel de pression, avec une mesure synchrone de la pression de chaque côté de la façade double-peau, telle qu'elle a été réalisée sur l'expérimentation modèle. À nouveau ceci implique de pouvoir instrumenter correctement la maquette en prise de pression sans perturber l'équilibrage en pression de la lame d'air. Ceci restreint alors cette investigation aux bâtiments de faible taille, permettant ainsi de proposer une échelle maquette compatible avec les dimensions de la soufflerie à Couche Limite Atmosphérique.

Dans le cas où la taille de la maquette ne permettrait pas de représenter la lame d'air à une taille suffisamment grande pour être instrumentée en prises de pression, l'équilibrage en pression peut être simulé de façon hybride, via un modèle nodal et les signaux de pressions mesurés aux bornes de la lame d'air. Le différentiel de pression net est alors calculé par la soustraction du signal de pression mesuré sur la face externe de la double-peau avec le signal de pression virtuel calculé dans la lame d'air par le modèle nodal. Cependant les travaux réalisés dans cette étude ont montré que cette approche présentait des résultats satisfaisants dans un cadre limité de configurations géométriques de la façade double-peau. Les configurations présentant de fortes dynamiques d'écoulement dans la lame d'air, ou une ouverture sur 4 pans, ont mis en défaut le modèle nodal sur sa capacité évaluer précisément les charges de pointe.

Cette étude n'a que très peu évoqué le cas des simulations numériques de type CFD pour évaluer l'équilibrage en pression de la lame d'air, quand bien même de nombreuses illustrations de l'écoulement ont été obtenues à partir de cette approche. La CFD s'avère très intéressante afin d'évaluer qualitativement l'équilibrage en pression de la lame d'air. Elle est

même en ce sens plus performante que l'approche nodale, du fait qu'elle permet de détecter des configurations d'écoulement complexes dans le cas où la lame d'air possède de nombreuses ouvertures. Cela étant la CFD, dans son approche industrielle RANS, propose des évaluations quantitatives des charges qui sont souvent très éloignées de celles qui ont pu être observées en soufflerie à Couche Limite Atmosphérique. Aussi et surtout, la CFD RANS n'est pas en mesure de reproduire l'équilibrage instationnaire de la pression dans la lame d'air. C'est une limitation très forte pour le dimensionnement au vent, puisque les différentiels de pression de pointe ne peuvent être évalués correctement. A nouveau la simulation CFD instationnaire (LES, DES, etc..) pourrait permettre de répondre à cette question, mais à des coûts de calcul certainement rédhibitoires pour considérer une application industrielle de l'approche. Est-ce à dire que la CFD est à évacuer du processus d'évaluation des charges sur la façade double-peau ? Tout au contraire. La CFD propose une visualisation pertinente des écoulements permettant d'anticiper comment va s'équilibrer la pression dans la lame d'air, et proposer ainsi une méthode d'investigation adaptée à la mesure en soufflerie des charges de pointes, soit par mesure directe sur maquette, soit par approche hybride (mesure en soufflerie + modèle nodal).

C'est ainsi la combinaison des méthodes d'investigation qui va permettre d'établir, au cas par cas, la meilleure stratégie de dimensionnement au vent des façades double-peau.

6.2 STRATEGIES DE DIMENSIONNEMENT AU VENT EN FONCTION DU TYPE DE FAÇADE DOUBLE-PEAU

A nouveau, la meilleure stratégie pour l'évaluation des charges au vent sur une façade double-peau reste l'évaluation directe en soufflerie du différentiel de pression de pointe, si la maquette permet une instrumentation en prise de pression de la lame d'air (échelle de 1/100 ou plus).

Dans le cas contraire, on se propose dans ce paragraphe d'établir un ensemble de stratégies alternatives de dimensionnement au vent, en fonction des différentes typologies de façades double-peau.

6.2.1 Double-peau entièrement recoupée (recouvrement étanche)

On considère dans un premier temps le cas d'une double-peau entièrement recoupée, avec des recouvrements parfaitement étanches. On distingue alors la partie centrale de la peau fermée sur ses 4 bords, de la partie de la double-peau potentiellement en drapeau en bordure de façade.

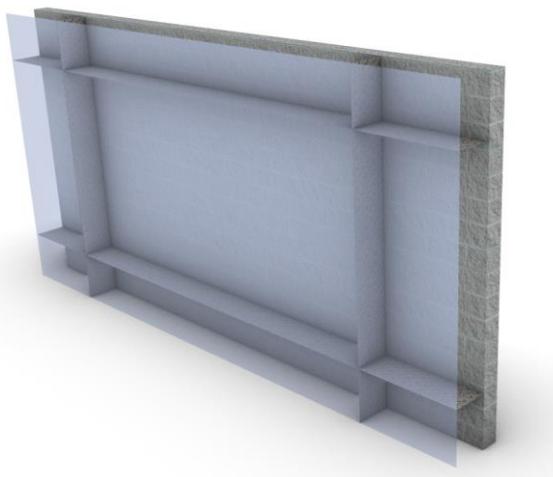


Figure 135- double-peau recoupée entièrement étanche

On distinguera deux cas de figure, selon si la peau est pleine ou poreuse :

1) Cas d'une peau pleine

→ *Sur la partie centrale entièrement recoupée :*

Ce cas se rapproche alors de celui d'une façade de bâtiment normale, et peut être appréhendé par des évaluations Eurocode standard. La pression sur la face externe p_{ext} est alors évaluée soit par approche réglementaire (Eurocode §7.2.2 [8]), soit par mesure en soufflerie, alors que la pression interne est prise réglementairement (Eurocode §7.2.9 [8]) égale à $p_{int} = +0.2 \cdot p_{dyn}$ ou $p_{int} = -0.3 \cdot p_{dyn}$, avec p_{dyn} la pression dynamique de référence à la hauteur de façade, et ce de façon à maximiser le différentiel de pression p_{net} .

→ *Sur la partie en drapeau en bordure :*

Ce cas se rapproche alors de celui d'un acrotère au sens de l'Eurocode et peut être dimensionné en tant que tel (Eurocode §7.4.1 [8])

2) Cas d'une peau poreuse

→ *Sur la partie centrale entièrement recoupée :*

Ce cas peut être traité via un calcul d'équilibrage en pression de la cavité avec un modèle nodal comme effectué §5.3.5. Les pressions mesurées sur la face externe de la double-peau sont alors utilisées à la fois comme données d'entrée pour le modèle nodal d'équilibrage, mais aussi pour calculer le différentiel de pression de pointe. Ce différentiel de pression de pointe peut également être obtenu par l'approche réglementaire (Eurocode §7.2.10 [8]) qui propose pour ce cas de figure $c_{p_{net}} = \frac{2}{3} c_{p_{ext}}$ pour les compressions et $c_{p_{net}} = -\frac{1}{3} c_{p_{ext}}$ pour les arrachements.

→ *Sur la partie en drapeau en bordure :*

Ce cas se rapproche alors de celui d'un acrotère au sens de l'Eurocode et peut être dimensionné en tant que tel (Eurocode §7.4.1 [8])

6.2.2 Double-peau recoupée type canal (horizontal / vertical)

On considère à présent une peau segmentée de façon à constituer un canal horizontal ou vertical.

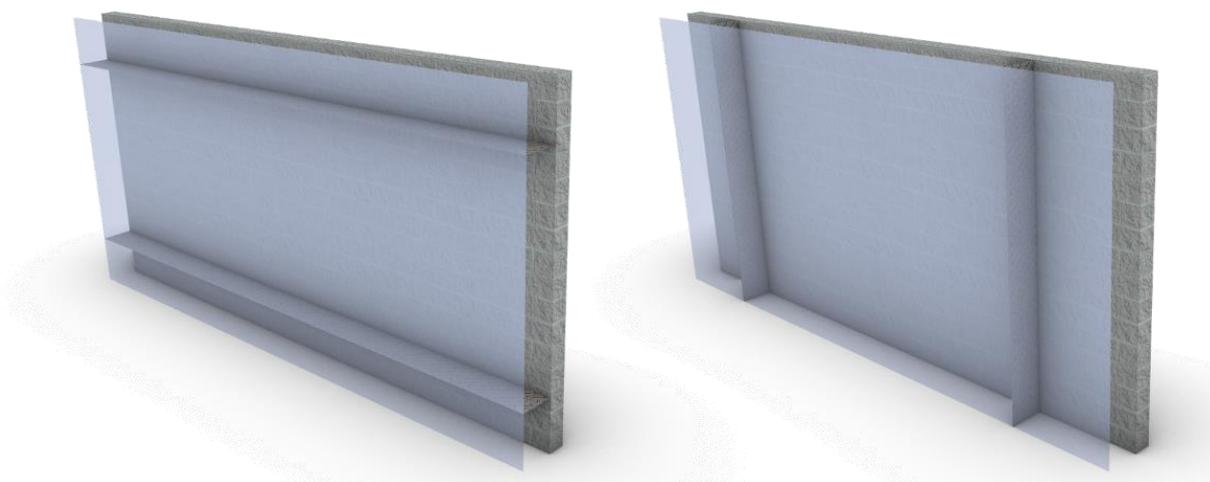


Figure 136 - double-peau recoupée type canal

On distinguera à nouveau deux cas de figure selon si la peau est pleine ou poreuse :

1) Cas d'une peau pleine

→ *Sur la partie centrale du canal :*

Ce cas peut être traité via un calcul d'équilibrage de la pression dans le canal avec un modèle nodal comme effectué §5.3.1. Les pressions mesurées sur la façade du bâtiment, au niveau des extrémités du canal, sont utilisées comme données d'entrée du modèle d'équilibrage, qui produit alors un signal de pression virtuel tout du long de la face interne de la double-peau. Les mesures de pression effectuées sur la face externe de la façade sont alors utilisées pour calculer les différentiels de pression net.

Dans le cas d'une forte dynamique d'écoulement dans la lame d'air (grand différentiel de pression aux bornes, ou débits élevés relevés dans le calcul nodal) l'étude doit être complétée par une évaluation des effets d'engorgement de l'écoulement dans la lame d'air. Cette étude peut être réalisée soit par une étude en soufflerie complémentaire, sur une maquette de l'entrée d'air à plus grande échelle, soit par approche CFD. Elle permettront ainsi d'évaluer un coefficient de majoration à appliquer aux charges de pointe obtenues par approche nodale.

→ *Sur la partie en drapeau en bordure :*

Ce cas se rapproche alors de celui d'un acrotère au sens de l'Eurocode et peut être dimensionné en tant que tel (Eurocode §7.4.1 [8])

2) Cas d'une peau poreuse

Ce cas se rapproche de celui testé §5.3.4 et s'avère plus problématique à étudier. En effet l'approche nodale a présenté dans ce cas des difficultés à restituer la compétition entre la dynamique de l'écoulement à l'extérieur de la façade et celui pénétrant au travers des porosités. Les résultats des simulations montraient alors une très forte dépendance au coefficient de perte de charge ξ_{permea} de la porosité de la façade. Aussi ce cas doit être traité en incluant une étude de sensibilité sur le coefficient ξ_{permea} , et en retenant le cas le plus majorant pour l'effort différentiel de pointe $\widehat{p_{net}}$ alors calculé. De façon plus conservative, ces peaux poreuses peuvent également être considérées comme pleines, et peuvent ainsi être traitées comme le cas de figure précédent.

6.2.3 Double-peau ouverte sur 3 ou 4 pans

On considère une peau ouverte sur 3 ou 4 pans. Ce cas se rapproche alors de celui étudié §5.3.2 et §5.3.3.

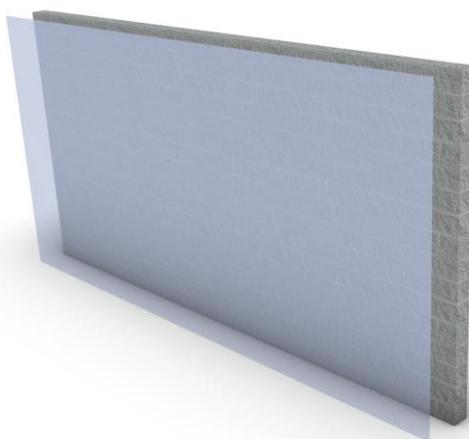


Figure 137- double-peau ouverte sur 4 pans

On considérera deux cas de figure, suivant si la dynamique de l'écoulement dans la lame d'air est faible ou élevée. Ceci peut être déterminé soit par un premier modèle nodal, soit par une évaluation de l'écoulement par approche CFD.

1) Si la dynamique est faible

Ce cas peut être traité via un calcul de l'équilibrage en pression de la lame d'air avec un modèle nodal comme effectué §5.3.2 ou §5.3.3. L'étude peut alors être complétée par une évaluation des effets d'engoncement de l'écoulement dans la lame d'air, comme évoqué pour les double-peaux recoupées de type canal.

2) Si la dynamique est élevée

C'est le cas le plus problématique et pour lequel l'approche nodale présente les plus fortes limitations. C'est aussi le cas le plus favorable à la génération de charges de pointe très élevées sur la double-peau, du fait même de cette forte dynamique d'écoulement. Aussi si ce cas ne peut être traité par des mesures en soufflerie avec une maquette de taille suffisamment grande pour assurer une bonne représentativité de la lame d'air, il n'y aura alors pour seule alternative que de considérer le cas de charge majorant présenté §6.1.1.

6.2.4 Synthèse

Le Tableau 5 se propose de résumer de façon visuelle les différentes stratégies de dimensionnement proposées dans les paragraphes précédents.

Typologie de façade		Stratégie	
		Réglementaire (Eurocode)	Hybride (mesure soufflerie + nodal)
entièrement recoupée	pleine		
	poreuse		
recoupée type canal (horizontal, vertical)	pleine		avec majoration entrée canal
	poreuse		
Ouverte sur 3 ou 4 pans	dynamique faible		
	dynamique forte		

niveau de confiance	très élevée	élevée	faible	très faible
---------------------	-------------	--------	--------	-------------

Tableau 5- synthèse des stratégies alternatives à la mesure directe en soufflerie en fonction de la typologie de façade double-peau

Ce tableau montre alors que les stratégies alternatives proposées ne couvrent qu'une partie réduite des configurations possibles de façades double-peau. Les cas qui ne sont pas couverts par ces alternatives sont également représentatifs de la complexité des écoulements générés sur ces éléments de façade, et qui sont difficilement modélisable par des approches simplifiées.

6.3 REFLEXIONS QUANT A LA CONCEPTION DES FAÇADES DOUBLE-PEAU VIS-A-VIS DU DIMENSIONNEMENT AU VENT

Vaglio propose dans le dernier volet de ses travaux de thèse [1] des préconisations quant à la conception des façades double-peau vis-à-vis du dimensionnement au vent. Ces façades peuvent avoir plusieurs fonctionnalités, dont celle d'assurer un processus de ventilation permettant de rafraîchir le bâtiment. Dans cet objectif, le but est alors de pouvoir générer un écoulement dans la lame d'air à partir de vitesses de vent relativement faibles. On comprend alors, à la lueur des mesures réalisées dans cette étude, que favoriser une telle dynamique d'écoulement dans la lame d'air peut conduire à générer des charges au vent considérables lors d'une tempête. L'optimisation de la fonctionnalité de ventilation peut donc se faire au détriment de la résistance au vent de la façade.

Les résultats de cette étude permettent alors de dresser quelques recommandations, du point de vue du dimensionnement au vent, et en mettant pour l'instant de côté les autres fonctionnalités de la façade.

Afin de limiter les charges au vent, on va chercher à cloisonner au maximum la lame d'air et aménager une porosité sur la double-peau, afin d'équilibrer la pression de part et d'autre de la façade. En plus de limiter les charges au vent sur la double-peau, cette configuration est relativement bien maîtrisée du point de vue du dimensionnement au vent, et les charges peuvent ainsi être évaluées avec suffisamment de confiance. Cet aménagement de la façade double-peau ne créera cependant qu'une circulation limitée dans la lame d'air.

Afin de créer un mouvement de convection plus conséquent, il peut être intéressant d'utiliser des recouvrements verticaux afin d'aménager des canaux, et créer une circulation d'air par la différence de pression entre le pied et le haut de la façade. Ce principe a été illustré dans cette étude sur les configurations bâtiment à niveau et bâtiment bas, équipés de segmentations verticales. Ces configurations conduiront alors à des charges plus élevées sur la façade double-peau, mais qui peuvent être mesurées assez finement avec les stratégies de modélisation proposées au paragraphe précédent.

Enfin on évitera de mettre en place des lames d'air aux ouvertures trop nombreuses, soit par l'absence de recouvrements, soit par la présence de porosités qui conduisent à une compétition entre la dynamique de l'écoulement interne et externe. Ces configurations sont assez mal maîtrisées du point de vue du dimensionnement au vent, et conduiraient à devoir s'en remettre à un cas de charge très majorant.

Ces choix de conception doivent bien entendu être mis en regard des autres fonctionnalités de la façade. En effet des charges au vent conséquentes peuvent être palliées par le renforcement de la structure, mais alors au détriment du coût du projet. Il faut donc évaluer, au cas par cas, quel est l'intérêt d'affiner l'évaluation des charges au vent. Le cas de charge majorant proposé §6.1.1 peut par exemple être compatible avec un cahier des charges ne nécessitant pas d'alléger la structure, et donc ne nécessitant pas d'affiner l'évaluation des efforts.

On peut enfin se poser la question d'une façade double-peau à géométrie variable, équipée de systèmes de volets qui s'ajusteraient en fonction des conditions de vent, afin soit d'assurer une ventilation efficace de la lame d'air, soit de diminuer les charges au vent sur la façade. De telles façades, dites « bioclimatiques », existent déjà et permettent de réguler la vitesse de l'écoulement dans la lame d'air. De tels équipements posent cependant la question de savoir qui porte la responsabilité en cas de panne du système de contrôle, panne qui ne permettrait pas de mettre la façade en position de sécurité en cas de coup de vent.

7 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ces travaux de recherche ont pour objectif d'étudier les charges exercées par le vent sur les façades double-peau.

Une première partie de l'étude présente un court état de l'art des recherches académiques sur le sujet et pose clairement le problème d'ingénierie associé, à savoir la résistance au vent d'une façade double-peau face à une tempête cinquantennale. Elle met en évidence la nécessité de mieux comprendre le phénomène de l'équilibrage en pression de la lame d'air, qui a un impact majeur sur les charges au vent de la façade double-peau. Le problème d'ingénierie est essentiellement posé par la complexité d'aller mesurer directement le différentiel de pression de part et d'autre de la façade double-peau, sur des maquettes qui sont trop petites pour représenter fidèlement l'écoulement dans la lame d'air.

L'étude repose alors sur une expérimentation modèle permettant de mesurer finement le différentiel de pression instantané de part et d'autre d'une façade double-peau représentée à grande échelle, et adossé à un bâtiment cubique. La maquette réalisée pour l'étude présente de nombreuses modularités afin d'investiguer l'effet de plusieurs paramètres géométriques sur les charges au vent. Les mesures réalisées en soufflerie à Couche Limite Atmosphérique ont montré que de faibles variations géométriques pouvaient entraîner de grandes variations des charges au vent sur la façade double-peau. Ces effets, souvent contre-intuitifs, ont été explicités à l'aide d'une analyse détaillée des mesures, complétée par des représentations graphiques de l'écoulement issues de simulations numériques.

Le nombre de configurations investiguées ne saurait prétendre à une représentation exhaustive du parc installé (ou à bâtir) de façades double-peau, tant la combinaison de paramètres géométrique peut être infini. Elles sont cependant suffisamment nombreuses pour permettre d'illustrer les mécanismes responsables de l'équilibrage en pression de la lame d'air, et leur impact sur les charges au vent de la façade double-peau. Une attention particulière a été portée à la question des charges de pointe engendrées par la turbulence de Couche Limite Atmosphérique. Cet aspect a été peu étudié dans la littérature, il est pourtant au cœur du problème d'ingénierie. Ces mesures pourront être complétées si des configurations géométriques représentatives du parc installé ne peuvent être rapprochées de configurations ayant été traitées pendant l'étude. Les mesures de pression pourraient être également complétées par des mesures de vitesse par vélocimétrie laser dans l'épaisseur de la lame d'air afin de confirmer les structures d'écoulement décrites par la simulation numérique.

L'analyse des mesures a montré que dans la plupart des configurations testées, la pression dans la lame d'air était directement reliée aux fluctuations de pression à ses bornes. Cette constatation a conduit l'étude vers l'utilisation d'un modèle nodal. Il permettrait de reconstruire virtuellement le signal de pression dans la lame d'air à partir des seules mesures de pression effectuées aux bornes et sur la face externe de la façade double-peau. Ce modèle aurait alors une application pratique directe pour des maquettes en soufflerie sur lesquelles des mesures de la pression dans la lame d'air est impossible.

Enfin des stratégies de modélisation pour des applications pratiques à des cas industriels ont été proposées. Ces stratégies ont été déduites des analyses des mesures issues de l'expérience modèle, ainsi que des simulations effectuées avec le modèle nodal. Sans pouvoir prétendre être exhaustif à l'ensemble des configurations de façade double-peau qui puissent exister, ces stratégies permettent d'offrir une première approche pratique pour mieux appréhender le dimensionnement au vent des ces façades.

LISTE DES REFERENCES

- [1] J. C. Vaglio, «Aerophysics of double-skin facades : simulation-based determination of pressure coefficients for multi-story double-skin facades,» 2015.
- [2] H. J. Gerhardt et F. Janser, «Wind loads on wind permeable facades,» *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 53, pp. 37-48, 1995.
- [3] F. Marques_da_Silva et M. Gloria_Gomes, «Gap inner pressures in multi-storey double skin facades,» *Energy and Buildings*, vol. 40, p. 1553–1559, 2008.
- [4] M. Jafari et A. Alipour, «Aerodynamic shape optimization of rectangular and elliptical double-skinfaçades to mitigate wind-induced effects on tall buildings,» *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 213, 2021.
- [5] G. Hu, S. Hassanli, K. C. S. Kwok et K. T. Tse, «Wind-induced responses of a tall building with a double-skin façade system,» *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 168, pp. 91-100, 2017.
- [6] G. Hu, J. Song, S. Hassanli, R. Ong et K. C. S. Kwok, «The effects of a double-skin façade on the cladding pressure around a tall building,» *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 191, p. 239–251, 2019.
- [7] F. H. Kemper et M. Feldmann, «Wind load assumptions for permeable cladding elements considering the installation context,» *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 184, p. 277–288, 2019.
- [8] AFNOR, «Eurocode 1: Actions sur les structures. Partie 1-4 Actions Générales -Actions du vent,» 2005.
- [9] G. Pomaranzi, N. Daniotti, P. Schito, L. Rosa et A. Zasso, «Experimental assessment of the effects of a porous double skin façadesystem on cladding loads,» *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2020.
- [10] P. Skvorc et H. Kozmar, «The effect of wind characteristics on tall buildings with porousdouble-skin façades,» *Journal of Building Engineering*, vol. 69, 2023.
- [11] SNFA, «Fiche Technique n°45 Tableaux des Pressions de vent W50 applicables aux façades légères et déterminées selon l'Annexe Nationale NF EN 1991-1-4/NA,» 2010.
- [12] RAGE, «Façad multiple : Double peau ventilée naturellement sur l'extérieur,» 2014.
- [13] F. Demouge, «MATHIS : Guide technique,» 2019.
- [14] G. Giovannelli et J. Guilhot, «Vitesse de ventilation naturelle dans la tranchée couverte Austerlitz-Tolbiac-Masséna,» 2017.
- [15] I. E. Idel'Cik, *Memento des Pertes de Charges*, Eyrolles, Éd., 1965.

- [16] M. Rahiminejad et D. Khovalyg, «Review on ventilation rates in the ventilated air-spaces behind commonwall assemblies with external cladding,» *Building and Environment*, vol. 190, 2021.
- [17] V. Yellamraju, «Evaluation and design of double-skin facades for office buildings in hot climates,» 2004.
- [18] S. Matour, V. G. Hansen, R. Drogemuller et S. Omrani, *Adaptation of Double Skin Facade for warm climate from a wind harvesting perspective in tall buildings.*

REMERCIEMENTS

Cette étude a été entièrement financée par la Direction Recherche & Développement du CSTB. L'auteur tient à remercier Hervé Charrue, Romain Mege et Nicolas Naville pour leur confiance dans l'attribution du financement associé.

L'auteur tient également à remercier :

-Julien Rogé et Nicolas Pinoteau, pour leur confiance et le suivi attentif de ces travaux de recherche.

-Bruno Béliard et Patrice Metaireau, pour la réalisation de la très belle maquette de l'expérimentation modèle.

-Cyril Vachon, pour son assistance pendant les essais en soufflerie.

-François Demouge, pour son aide inestimable dans la constitution du modèle nodal, et pour son infinie sagesse dans l'art délicat de la maîtrise des pertes de charges.

Ce rapport est dédié à la mémoire de Gabriel Giovanelli,
grand maître de l'équilibrage en pression

-



Entreprise publique au service de ses clients et de l'intérêt général, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment a pour ambition d'imaginer les bâtiments et la ville de demain, en accompagnant et sécurisant les projets de construction et de rénovation durable, pour améliorer la qualité de vie de leurs usagers en anticipant les effets du réchauffement climatique.

Il exerce pour cela cinq activités-clés : la recherche et expertise, l'évaluation, les essais, la certification et la diffusion des connaissances. Il répond ainsi à trois missions principales, au service des acteurs de la construction et de l'intérêt général : créer des connaissances et les partager, accompagner l'innovation, sécuriser et valoriser la performance.

Centre scientifique et technique du bâtiment

Siège social > 84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée cedex 2

Tél. : +33 (0)1 64 68 82 82 – www.cstb.fr

Marne-la-Vallée / Paris / Grenoble / Nantes / Sophia Antipolis