#4986

DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE PRESSION EN FACADE DES BATIMENTS

B.A. FLEURY et A.Y. GADILHE

LASH - ENTPE
rue Maurice Audin
69120 VAULX EN VELIN

Résumé : Cet article présente la problématique de la détermination des coefficients de pression en façade des bâtiments, les difficultés et les limites inhérentes aux différentes méthodes de calcul existantes.

Abstract : This paper presents the difficulties of estimating the pressure coefficients and exposes the existing methods for solving the problem and their respective limitations.

Zusammenfassung : In diesem Aufsatz werden die Problematik von der Bestimmung der Druckkoeffizienten auf der Vorseite eines Gebaüdes, die verschiedenen Methoden von dem Auflösung dieses Problems, ihre Schwierigkeiten und ihre Begrendzung dargestellt.

INTRODUCTION

Le cheminement de l'air à l'intérieur d'un bâtiment est conditionné par l'organisation intérieure du bâtiment, par le système de chauffage ou de climatisation mais aussi par le champ de pression en façade. Ce dernier paramètre est à la source des infiltrations ou des exfiltrations d'air à travers l'enveloppe ainsi que du renouvellement d'air volontaire dans le cas de la ventilation naturelle.

Le champ de pression à l'extérieur du bâtiment dépend de la topographie du site, de la disposition du bâtiment dans le plan masse et de sa forme architecturale. Sa connaissance nous permettra de calculer par différentes méthodes connues l'écoulement global de l'air en régime dynamique à l'intérieur des zones thermiques du bâtiment.

L'analyse de ces cheminements conduit à l'identification de plusieurs fonctionnements de la ventilation qui pourront s'avérer néfastes ou bénéfiques suivant le projet en situation : ventilation d'hiver ou d'été pour des bâtiments, soit d'habitation, soit tertiaires. Citons quelques-uns de ces éléments :

- air neuf mal distribué (entrée dans les pièces de service),

- non évacuation des contaminants et des pollutions soit occasionnels (cuisines), soit continus (expiration d'air chargé de vapeur d'eau par les occupants) induisant des désordres pathologiques (condensation) ou des gênes olfactives (confort et santé de l'usager),

- court circuitage de l'air, création de zones d'air stagnant

- débit traversant trop important, augmentation des déperditions thermiques

- vitesse de l'air trop grande (confort de l'occupant),

- fonctionnement anormal des bouches (débits excessifs, sifflements ou inversion du débit),

- pression relative positive ou négative (fonctionnement de la cheminée),

- taux de renouvellement d'air par pièces...

Ces points sont essentiels pour le confort de l'usager ainsi que pour sa santé. De plus, dans le cas du tertiaire, ils ont une incidence non seulement sur l'investissement initial supporté par le maître d'ouvrage mais aussi sur les coûts d'entretien - désordres pathologiques induits - supportés par le gestionnaire du bâtiment ainsi que sur la rentabilité - productivité des occupants -.

I - POSITION DU PROBLEME

1 - Environnement proche [1]

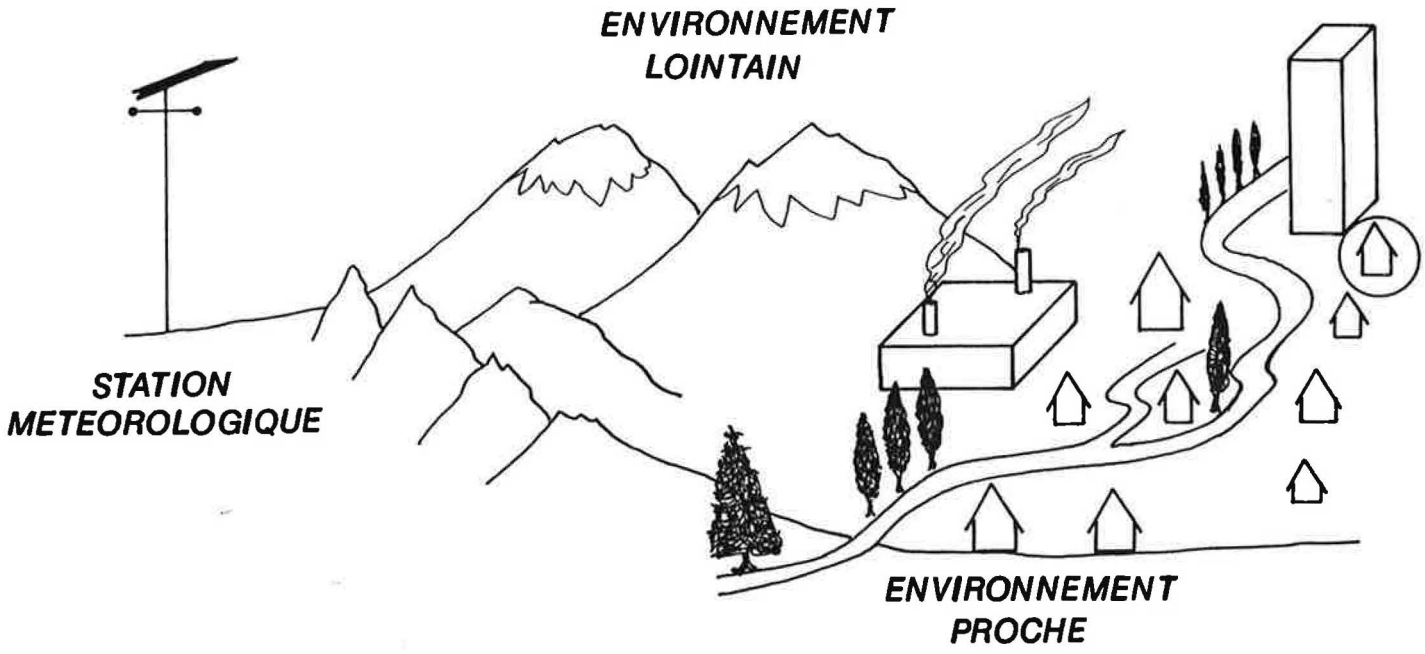
La détermination du champ de pression en façade ainsi que l'écoulement autour d'un bâtiment présentent de nombreuses difficultés. En effet, la typologie (taille et forme) du bâtiment lui-même, la présence d'obstacles proches (arbres, clôtures, autres bâtiments) modifient significativement l'écoulement autour du bâti. Le calcul des coefficients de pression en façade en sera donc affecté. Il est cependant possible d'appréhender et de prendre en compte ces éléments dans les différentes approches actuelles : mesures in situ, en soufflerie ou méthodes numériques.

2 - Conditions aux limites du vent

Les coefficients de pression en façades dépendent aussi de la direction du vent. Si nous désirons effectuer une étude sur un site réel, il conviendra de connaître à cet endroit même la distribution des vitesses du vent. Or cette donnée est souvent inexistante, nous avons en général recours aux données de la station météorologique la plus proche. Ensuite en fonction du type d'environnement du site [2], nous extrapolons un profil du vent suivant la verticale et supposons que la direction est conservée. Dans de nombreux projets, cette extrapolation est plutôt hasardeuse car la topographie avoisinante (vallée, collines, lac) ainsi que les micro-climats locaux ne sont pas pris en compte. Pour pallier à ce problème, il conviendrait de disposer des stations locales sur une période définie pour établir une rose des vents. Des recherches sont nécessaires pour améliorer notre connaissance sur la relation qui lie les données météorologiques des stations connues à celles existant en des sites plus ou moins éloignés.

3 - Prise en compte des grandes ouvertures

Maintenant supposons que la distribution des vitesses du vent sur le lieu d'intérêt ainsi que les différents obstacles soient connus, alors nous pouvons évaluer les coefficients de pression en façade suivant les différentes méthodes existantes. Pour ce calcul, nous supposons que les ouvrants sont fermés. Ceci implique que la circulation de l'air à l'intérieur du bâtiment n'interagisse pas sur l'écoulement à l'extérieur du bâtiment. Cette hypothèse s'avère exacte si le bâtiment est assez étanche. Cependant si des fenêtres, par exemple, sont ouvertes, un débit traversant le volume peut prendre naissance et modifier l'écoulement. Vichery [3] a montré que les coefficients de pression calculés ouvrants fermés, peuvent s'appliquer ouvrants ouverts si la surface des ouvrants ne dépasse pas 20% de la surface de chaque façade.



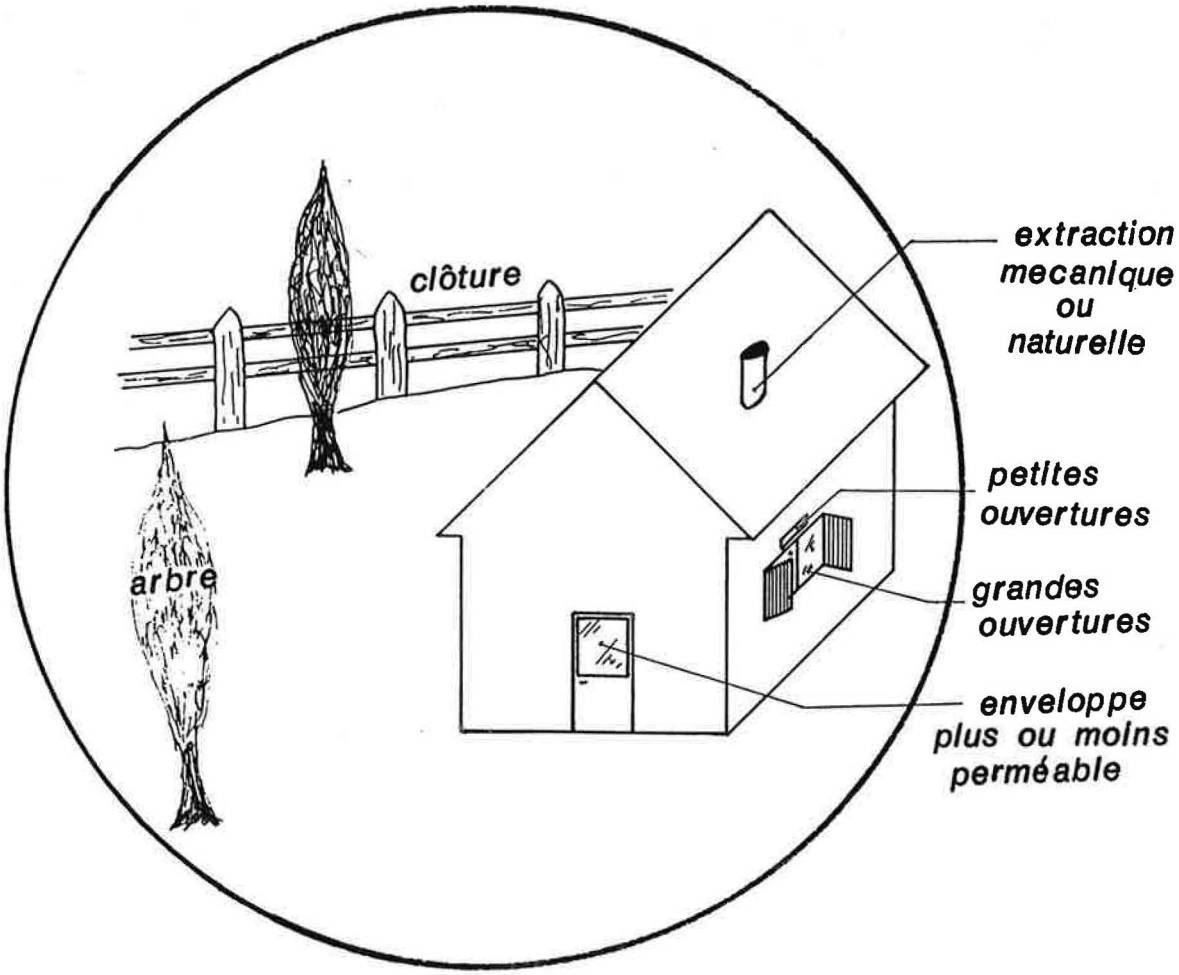


Fig.1 – Paramètres Influant sur la Pression en Façade.

4 - Fluctuations de la pression

Le vent est un phénomène très variable, le régime d'écoulement est presque toujours turbulent. Les coefficients de pression Cp en façade se décomposent en deux éléments : un Cp moyen et un Cp(t) fluctuant. A ce jour, les effets de la pression fluctuante en façade ne sont pas pris en compte pour la détermination de la pression à l'intérieur du bâtiment. L'enveloppe du bâtiment peut agir comme un filtre à certaines fréquences (fissures) ou créer des phénomènes de résonance [4].

5 - Comportement de l'enveloppe [5,6]

La connaissance du coefficient de pression sur un composant de l'enveloppe nous permet de calculer le débit traversant à condition de connaître la loi de comportement de cet élément face à des gradients de pression forts ou faibles. Or, à ce jour, cette loi est assez mal appréhendée.

6 - Evaluation de la circulation de l'air à l'intérieur du bâtiment

La circulation de l'air à l'intérieur du bâtiment, conditionnée par la distribution des coefficients de pression en façade et la loi de perméabilité de l'enveloppe, pourront être calculées par différentes méthodes, soit simplifiées (conservation de la masse - méthode ΔP) [7,8,9,10,13], soit lourdes (Equation de Navier Stokes + Equation de l'Energie) [11]. Les données nécessaires pour ce calcul sont la loi de perméabilité des différents composants intérieurs, la conception du système de climatisation ou de chauffage (position des sources froides ou chaudes, entrées et sorties d'air, dispositions intérieures). Nous ne développerons pas plus largement cet aspect fondamental dans cet article.

7 - Schéma récapitulatif

Les mouvements de l'air et la qualité de la ventilation à l'intérieur d'un bâtiment [12], à un instant donné, sont la conséquence de nombreux phénomènes successifs et interactifs. La figure 1 résume graphiquement les différentes étapes successives. Il conviendra de définir pour chaque étape la fonction de transfert correspondante .

Ecoulement autour du bâtiment et champ de pression	=	Influence de l'environnement proche et du bâtiment lui-même	x	Influence de l'environnement lointain	x	Données météorologiques d'une station connue	(1)

Qualité de la ventilation dans chaque pièce, mouvement d'air à l'intérieur du bâti.	=	Prise en compte des éléments intérieurs (chauffage, VMC, organisation)	x	Comportement de l'enveloppe	x	Ecoulement autour du bâtiment et champ de pression	(2)

Dans la suite de cette étude, nous nous intéressons uniquement à la détermination des coefficients de pression en façade (relation 1).

II - DONNEES ACTUELLES SUR LES COEFFICIENTS DE PRESSION

1 - A l'origine

La distribution des coefficients de pression est également essentielle pour le calcul de structure des bâtiments. Les ingénieurs mécaniciens s'intéressent tout particulièrement au maximum et au minimum de ces pressions pour identifier les points de charges critiques et ainsi diagnostiquer la résistance mécanique de leur structure. Il n'est alors retenu que ces extrema pour le calcul. L'utilisation de ces limites constitue une exagération pour le calcul en ventilation. Il conviendra de se méfier des coefficients de pression résultant du calcul de structures du bâtiment.

2 - Les données Françaises

Les coefficients de pression actuellement utilisés dans le domaine de la construction résultent des règles NEIGE ET VENT 65. Ces règles ont pour objet de fixer les valeurs des surcharges climatiques et de donner les méthodes d'évaluation des efforts sur la construction.

De façon générale, le vent est considéré frapper orthogonalement une des faces de la construction. Pour une face exposée au vent, le coefficient de pression à une valeur de 0.8, pour les faces sous le vent il est fonction du rapport hauteur du bâtiment sur longueur de la face frappée et de la nature de la face au vent - petite ou grande face -. Le coefficient de pression pour les toitures est donné en fonction des paramètres précédents et de l'angle d'inclinaison de la toiture sur l'horizontale.

Pour les incidences quelconques du vent, l'UTI [14] propose une formule analytique, interpolation des coefficients de pression connus pour six angles particuliers. Ces coefficients de pression particuliers sont eux-mêmes le résultat d'une interpolation en fonction de la géométrie du problème.

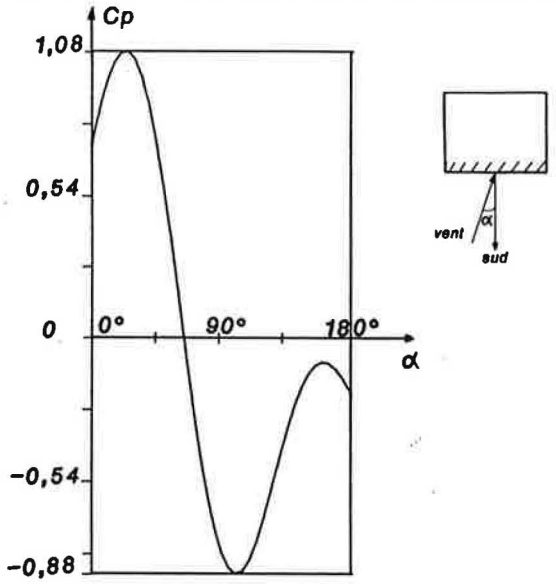


Fig.2 - Coefficient de pression en fonction de α

La figure ci-contre représente la variation du coefficient de pression pour un bâtiment supposé être un cube exposé à un vent dont l'angle d'incidence varie de 0 à 360 degrés. Remarquons que les valeurs maximales des coefficients de pression ne sont pas obtenues pour des incidences normales et que la courbe n'est pas symétrique contrairement au problème.

Pour certains bâtiments, nous disposons des études détaillées en soufflerie du CSTB, mais hélas ces études sont utilisées trop marginalement.

3 - Formules Analytiques

De nombreux résultats expérimentaux (en soufflerie ou in situ) existent dans le monde. Après avoir effectué un classement typologique des bâtiments, la compilation de tous les résultats correspondants peut conduire à des équations typiques (1er ordre, 2ème ordre...) par des méthodes de réductions de données et d'adaptation de courbes. Cette méthode a été utilisée par Swami [15]. Allen C.M. [16] a utilisé la méthode de l'analyse harmonique (série de Fourier) pour établir des formules analytiques pour le calcul des coefficients de pression.

Des aberrations inhérentes à la méthode choisie peuvent apparaître : non-symétrie, uniformisation. De plus, les conditions d'expérimentation ne sont pas toujours parfaitement définies. L'omission d'un élément peut faire que les résultats de deux cas dit semblables soient divergents. Enfin, dans certains cas, ces formules sont dénuées de tout sens physique. Ces études sont intéressantes pour la détermination de la dépendance de certaines variables par rapport à d'autres. Elles nous facilitent l'identification des variables les plus fondamentales.

4 - Valeurs discrètes

Si nous connaissons avec une certaine précision les coefficients de pression suivant certaines directions, il nous est possible, ensuite, d'extrapoler pour une direction donnée. Liddament et Allen [17] proposent un incrément angulaire maximum entre deux mesures de 45°. Si le bâtiment ne présente aucune symétrie, il faudra déterminer les coefficients de pressions pour 8 orientations différentes du vent.

III - DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE PRESSION EN SOUFFLERIE SIMULANT LE VENT NATUREL [18,19,20,21,22,23,24]

Cette technique très souple d'utilisation a donné déjà depuis plusieurs années entière satisfaction mais elle implique de nombreuses précautions expérimentales (rugosité des parois et vent typique à reproduire, bruit acoustique, ...) ainsi que la construction d'une maquette. L'expérimentation nécessite le recours à des aérodynamiciens confirmés. Comme dans de nombreuses expériences en modèles réduits, nous sommes ici aussi confrontés à des problèmes de similitude. Il est impossible de respecter certains nombres adimensionnels. Dans le cas de la soufflerie simulant le vent naturel, nous ne pouvons pas respecter :

- le nombre de Reynolds UL/ν (les conséquences sont minimes pour les bâtiments dont les formes sont à angles vifs)

- le nombre de Rossby $U/\Omega L$

- le nombre d'Eckert $U^2/C_p \Delta T$ (les phénomènes thermiques sont difficilement reproductibles en soufflerie à un coût raisonnable)

- le nombre de Richardson $\frac{\Delta T \; L \; g}{T \; U^2}$

- l'échelle longitudinale de turbulence.

Les dimensions de la soufflerie sont une limitation pour les cas d'études en milieu urbain ou péri-urbain car la reproduction de la couche limite terrestre est possible au niveau immédiat du sol, mais est déjà plus difficile dans le domaine d'étude le plus courant, c'est à dire les zones urbaines. Dans ce cas, les études en milieu urbain sont consacrées au confort des piétons plutôt qu'à la distribution des coefficients de pressions sur les façades. [25]

Cependant les mesures en soufflerie sont un moyen essentiel à ce jour pour la détermination des coefficients de pression en un nombre fini de points, et de plus, les expériences sont reproductibles. Nous pouvons faire référence aux travaux de Drs Gandemer, Vichery et Cermak [26] pour des explications détaillées.

IV - DETERMINATION NUMERIQUE DES COEFFICIENTS DE PRESSION

Les méthodes numériques ont connu ces derniers temps un développement important dans le domaine de la mécanique des fluides. Elles offrent maintenant les solutions à des problèmes difficiles à appréhender du fait de leur complexité géométrique ou physique (mouvement des fluides dans la chemise des pistons). Cependant, la pertinence des solutions obtenues résulte en général de l'exactitude des lois de comportement énoncées pour l'écoulement du fluide ainsi que des hypothèses simplificatrices émises.

L'étude des mouvements de l'air autour des bâtiments est devenu depuis peu un pôle d'intérêt. De nombreuses études avaient été consacrées aux types et à la structure de l'écoulement autour d'obstacles mais le calcul des coefficients de pression n'étaient pas la préoccupation majeure. Haggkwist [27] et Hansen [28,29] se sont intéressés à ce problème spécifique et ont conclu à la faisabilité de sa résolution numérique. Des premiers résultats significatifs viennent d'être publiés [30,31]. Solari [32] a développé avec succès un modèle pour le calcul des charges dues au vent sur la structure du bâtiment et aussi des coefficients de pression.

La simulation numérique nous donne les mouvements de l'air autour du bâtiment, le champ de pression ainsi que les coefficients convectifs d'échanges superficiels quand la variable température est prise en compte. Les coefficients d'échanges pourront être évalués suivant la direction et la vitesse du vent avec plus de précision que les valeurs aujourd'hui couramment utilisées. L'interaction entre l'écoulement de l'air autour du bâtiment et les pertes thermiques sera donc mieux prise en compte [33].

L'obstacle à ce jour réside dans la qualité du modèle de turbulence et non plus dans le temps de calcul sur ordinateur. En effet, les modèles aujourd'hui disponibles pour modéliser le régime turbulent résultent de lois approchées et empiriques et nécessitent des connaissances expérimentales à priori pour la détermination de certaines constantes. Les modèles les plus couramment utilisés ont été présentés avec détails par Spalding. [34]

L'inconnue qui réside dans la qualité du modèle retenu devra être levée par un recalage sur une expérience de référence soit en site réel, soit en modèle réduit. Ensuite, l'extrapolation du modèle retenu à des cas d'études proches sera effectuée avec plus de confiance. Cette phase préliminaire achevée, il sera possible d'effectuer des études de sensibilité pour différents paramètres.

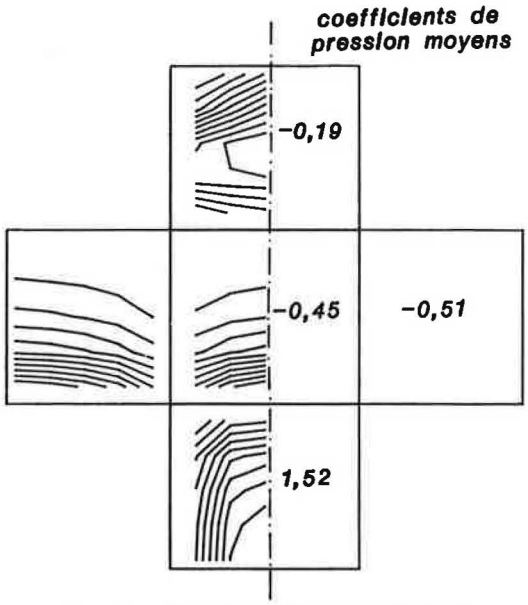


Fig.3 - Courbes d'iso-coefficient de pression

Présentons un exemple simple : soit un cube de 3.5m d'arête ne reposant pas sur le sol et exposé à un vent uniforme de 14m/s dans un site dégagé, le régime d'écoulement de l'air étant supposé laminaire. Les courbes d'iso-coefficient de pression ainsi que les valeurs moyennes du coefficient de pression sur chaque face sont portées sur la figure 3.

V - DETERMINATION EN VRAIE GRANDEUR NATURE DES COEFFICIENTS DE PRESSION [35,36]

Cette méthode à posteriori est indispensable comme nous l'avons vu pour le calage des modèles numériques et la comparaison avec les résultats des expériences en soufflerie. Elle permet aussi d'identifier le comportement de l'enveloppe. Cependant la nature est si complexe qu'il est souvent difficile d'isoler les phénomènes. Des perturbations ou anomalies peuvent considérablement modifier les conclusions d'une analyse. Il faudra donc s'entourer de toutes les précautions nécessaires afin de mieux cerner les phénomènes qui concernent la recherche envisagée.

Il convient toutefois d'éviter l'écueil de l'accumulation massive des enregistrements sans l'élaboration d'une stratégie d'analyse de ces données. Par exemple en énergétique du bâtiment nous nous trouvons aujourd'hui face à de multiples rapports sur les consommations de tels ou tels types d'opération sans qu'aucune homogénéité ne soit respectée. Il conviendrait de définir pour les futures recherches in situ un cadre minimum commun pour les conditions d'expérimentation et de mesures.

VI - CONCLUSION ET RECHERCHES FUTURES

Nous avons mis en évidence les difficultés de la détermination des coefficients en façade ainsi que les recherches nécessaires pour améliorer notre connaissance.

Nous poursuivrons l'approche numérique pour le calcul des coefficients de pression et affinerons notre modèle grâce aux résultats des mesures in situ et en soufflerie, nous rechercherons le modèle le plus adéquat pour notre cas d'étude.

REMERCIEMENTS : Cette recherche se poursuivra grâce à l'appui scientifique et financier de Gaz de France et de l'Agence Française pour la Maitrise de l'Energie. Nous tenons tout particulièrement à les remercier.

NOTATIONS :

U : vitesse longitudinale de référence du vent
L : longueur caractéristique du problème
ν : Viscosité de l'air
Ω : Vitesse angulaire du vent
C_P : capacité calorifique de l'air
ΔT : gradient de température

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] WIREN B.G. "Wind pressure distributions and ventilation losses for a single-family house as influenced by surrounding buildings - a wind tunnel study". Technical Note AIC 13.1, mars 1984.

[2] DUCHEME-MARULLAZ P. et BEGUIN D., "Détermination du vent de référence pour le calcul des déperditions thermiques liées au renouvellement d'air des locaux". CSTB

[3] VICHERY B.J., BADDOUR R.E. et KARAHATSANIS C.A., "A study of external wind pressure distributions and induced internal ventilation flow in low-rise industrial and domestic structures". BLWT-SS2,1983

[4] DAVENPORT A.G. et SURRY D., " The estimation of internal pressure due to wind with application to cladding pressures and infiltration". Technical Note AIC 13.1, mars 1984.

[5] Kvisgoard B. Bruel et Kjaer, "The influence of infiltration on air circulation in rooms". Roomvent - 87, juin 1987, Stockholm.

[6] CETE de LYON, "H2E85 - Perméabilité à l'air des logements neufs". Rapport Plan Construction, mars 1983.

[7] VALTON P., "Mise au point d'un modèle de simulation de la ventilation". Costic, octobre 1986, Pau.

[8] MALO B. et VALTON P., "Etude des modèles de ventilation et simulation du renouvellement d'air dans les locaux". Costic, juin 1987, Pau.

[9] HAUGEN T. et FEUSTEL H.E., "Applications of a simplified model for predicting air flows in multizone structures". 8th AIVC Conference, septembre 1987, Ueberlingen.

[10] FAUCONNIER R. et GRELAT A., "Les modèles de simulation hygrothermique du bâtiment : Bilga et Bilbo". Rapport CEBTP - FNB.

[11] GADGIL A., "On convective heat transfer in building energy analysis". Thèse de doctorat, Université de Californie, Berkeley, mai 1980.

[12] FLEURY B., "Mouvement de l'air dans les bâtiments". Rapport LASH 861001, octobre 1986.

[13] BYRNE S.J. et FLEURY B.A., "Computer simulation of natural ventilation airflow". ASHRAE conférence, Singapour, septembre 1987.

[14] ANSELME P., DEGRYSE T., FAUCONIER R., GUILLEMARD P., "Mise au point d'une méthode générale de calcul des échanges d'air dans l'habitat". UTI, avril 1985

[15] SWAMI M. et CHANDRA S., "Procedures for calculating natural ventilation airflow rates in building". ASHRAE Research Project 448-RP, décembre 1986.

[16] ALLEN C.M., "Computer-friendly method for the representation of surface wind pressure data". Technical Note AIC 13.1, mars 1984.

[17] LIDDAMENT M. et ALLEN C.M., "The validation and comparison of mathematical models of air infiltration". Technical Note AIC 11, septembre 1983.

[18] ALLEN C.M., "Wind pressure data requirements for air infiltration calculations". Technical Note AIC 13, janvier 1984.

[19] BARNAUD G. et GANDEMER J., "Détermination en soufflerie simulant le vent naturel, des coefficients de pression sur les structures basses". Rapport du CSTB - ADYM 75-9-R.

[20] GANDEMER J., "Boundary-layer wind tunnel and wind effects studies on buildings and structures at model scale". Rapport du CSTB-ADYM-85-17.

[21] BARNAUD G. et GANDEMER J., "Variabilité du champ de vitesse dans les ensembles bâtis en fonction de la direction du vent". Rapport du CSTB - ADYM 83-8.

[22] AYNSLEY R.M., MELBOURNE W. et VICHERY B.J., "Architectural aerodynamics". Applied Science Publishers Ltd. 1977. Londres.

[23] ASHRAE Fondamentals, 1985

[24] PALFFY S., "Aerodynamic interface between tall buildings - wind tunnel investigations." Technical Note AIC 13.1, mars 1984.

[25] GANDEMER J., "Disconfort due to wind near buildings : aerodynamic concepts and methods of wind integration in built-up areas design".

[26] CERMAK J.E., "Aerodynamics of buildings". Annual Review of fluid mechanics vol.8, 1976.

[27] HAGGKVIST K., ANDERSSON C. et TAESLER R., "Phoenics applications in building climatology". Lecture Notes in Engineering. Edited by Brebbia et Orszag.

[28] HANSON T., SUMMERS D.M. et WILSON C.B., "Numerical modeling of wind flow over buildings in two dimensions". International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol.4, 1984.

[29] SUMMERS D.M., HANSON T. et WILSON C.B., "A random votex simulation of wind flow over a building". International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol.5, 1985.

[30] HANSON T., SUMMERS D.M. et WILSON C.B., "A three dimensional simulation of wind flow around buildings". International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol.6, 1986.

[31] PATERSON D.A. et APELT C.J., "Computations of wind flows over three-dimensional buildings". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics n° 24, 1986.

[32] SOLARI G., "Mathematical model to predict 3D wind loading on buildings".

[33] HANSON T., SMITH F., SUMMERS D.M. et WILSON C.B., "Computer simulation of wind flow around buildings". International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol.14, 1982.

[34] SPALDING D.B., "Turbulence models : a lecture course". London Imperial College. Report CEDU/82/4.

[35] GUSTEN J., "Full scale wind pressure measurements on low-rise buildings". Technical Note AIC 13.1, mars 1984.

[36] HANDA K. et GUSTEN J., "Estimation of rate of air infiltration based on full-scale wind pressure measurements". 3rd AIC Conference, septembre 1982. Londres.