

aérodynamique des couvertures du point de vue de leur étanchéité : pression, écoulement d'air

par J. Gandemer

chef de la division « Aérodynamique » au CSTB (Établissement de Nantes)



1 introduction

Le mécanisme de la pénétration de la pluie les jours de vent à travers les couvertures est particulièrement complexe. En effet, il résulte de la combinaison de deux domaines fluides (l'eau et l'air, soit la pluie et le vent) et de celle de leurs comportements physiques en situation réaliste, tant au niveau des paramètres climatiques et de l'environnement que de la conception de la couverture et de sa mise en œuvre. Ainsi, on peut évoquer le rôle déterminant des facteurs suivants :

- le vent, porteur plus ou moins « fidèle » de l'aérosol eau et sa nature turbulente ;
- le champ de pression fluctuant induit par le vent sur le bâtiment : ce champ est dépendant de la direction du vent, des dimensions et de la forme du bâtiment (pente du toit notamment), de la présence ou non d'un environnement proche (ou lointain) ;
- des écoulements léchant les parois : ces écoulements sont bien évidemment liés au champ de pression induit par le vent et aux orientations locales des écoulements, compte tenu d'un environnement immédiat par exemple. Dans ce cadre, l'aérodynamique propre de la tuile peut éventuellement jouer un rôle ;
- la pression interne régnant dans les combles ou immédiatement à l'arrière du panneau de couverture : la perméabilité globale de la toiture, les pertes de charge au niveau des fentes, l'existence d'orifices particuliers et leur position sur la toiture vont conditionner ce champ de pression qui pourra d'ailleurs être différent d'un point à l'autre (gradient de pression) et présenter une nature relativement fluctuante. La conception même de la couverture, tant au niveau de l'organisation des structures supports que de la présence des lames d'air, en liaison pneumatique ou non avec les combles (présence de film protecteur, de panneau isolant, etc.), influe grandement.

A ces paramètres de type essentiellement aérodynamique, il faudra ajouter les phénomènes liés à l'écoulement eau, tels que les effets de gravité, de ruissellement, de capillarité, de siphonnage (sans même évoquer les problèmes de salissures), etc.

Il est à prévoir que, compte tenu de la combinatoire et de la complexité de ce système, du filtrage non linéaire des fuites (perte de charge en U^n avec $1 \leq n \leq 2$), des intégrations spatiales instantanées des phénomènes et de la nature typiquement turbulente des mécanismes, une formulation simple reliant les débits de fuite et la vitesse du vent ne peut être espérée.

De même, une modélisation expérimentale significative de ces phénomènes ne peut pas être sérieusement envisagée avant une meilleure connaissance dans le domaine.

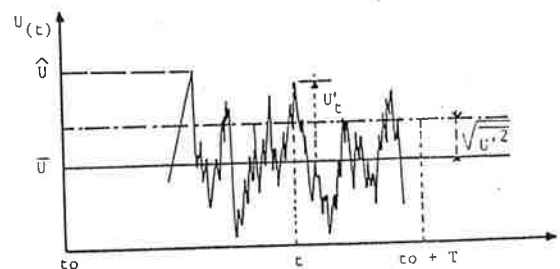
La présente note ne prétend en aucune manière résoudre la complexité du problème, ni même condamner ce qui a pu être effectué par le passé sous la nécessité des caractérisations technologiques des produits de couverture, mais sensibiliser les chercheurs et ingénieurs concernés par les problèmes d'étanchéité sur le rôle déterminant des paramètres aérodynamiques.

2 les caractéristiques du vent

Le vent est grossièrement le mouvement de l'air qui tend à équilibrer les zones de pressions différentes dans l'atmosphère.

Dans les basses couches atmosphériques (de l'ordre de 0 à 300 m), la rugosité du sol (avec sa végétation, ses constructions, etc.) induit des forces de frottement qui réduisent la vitesse du vent avec création d'une « agitation » ou turbulence importante. Localement, la vitesse du vent va donc varier en grandeur et direction.

L'écoulement turbulent vent ne peut être décrit instantanément et l'on doit adopter une représentation plus globale utilisant une formulation de type statistique : le vent peut être considéré comme la superposition d'un écoulement moyen (vitesse moyenne \bar{U} à la hauteur z) sur une période T assez longue (10 minutes par exemple pour les enregistrements météorologiques) et d'un écoulement fluctuant fonction du temps (fluctuation de vitesse U' au temps t).



À l'instant « t » et à la hauteur « z », la vitesse vaut

$$U(t) = \bar{U} + U'(t)$$

La turbulence, c'est-à-dire la dispersion de la vitesse autour de sa valeur moyenne, est caractérisée (sur la période T) par l'écart-type :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_{(t)}^2 dt}$$

Nota : la pointe de la vitesse \bar{U} sur la période T vaut approximativement :

$$\bar{U} + 3,5 \sigma$$

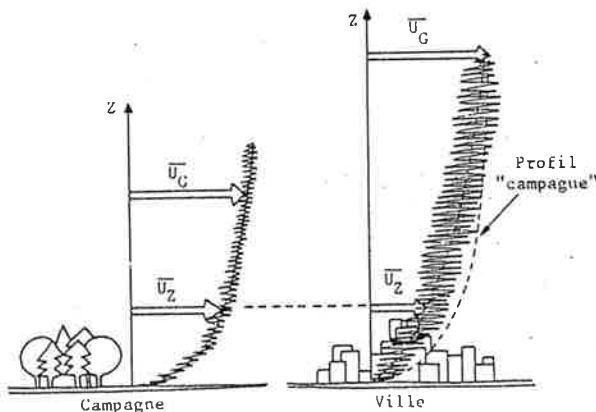
La vitesse moyenne du vent varie avec la hauteur z, la rugosité du sol et la topographie éventuelle des sites.

Nota : description logarithmique du profil de vitesse moyenne :

$$\frac{\bar{U}_z}{\bar{U}_{ref}} = k \text{ Log } \frac{z}{z_0}$$

où z_0 est le paramètre de rugosité et $k = 2,5$.

Comme on le voit, le phénomène vent est de nature complexe et il n'est pas possible de parler simplement de la « vitesse du vent ». Il s'agit en réalité d'un champ de vitesse, variable à la fois dans l'espace et dans le temps, dont la description n'est possible qu'en termes statistiques. Parler d'un vent de 100 km/h, par exemple, n'a pas de sens si l'on ne précise pas le type de vitesse considérée (moyenne, pointe,...), la hauteur au-dessus du sol, la rugosité du site, etc.



La turbulence (caractérisée par σ) est essentiellement fonction de la rugosité et de la force de la « tempête » à l'origine du vent considéré.

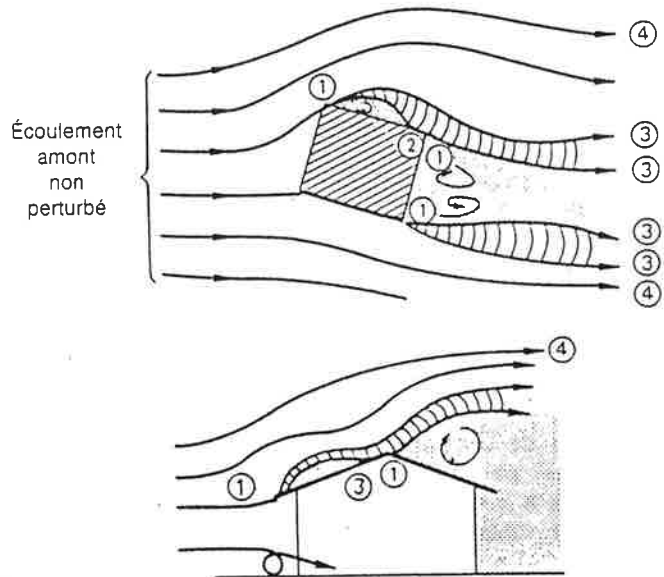
3 contournement des bâtiments par le vent : champ de vitesse et champ de pression

3,1 mécanisme de contournement des bâtiments par le vent

Toute construction perturbe, par sa présence, l'écoulement du vent en l'obligeant à le contourner. Ainsi, sur la face au vent apparaît une zone en surpression avec échappement de l'écoulement latéralement vers le haut ; un tourbillon de pied (interaction avec le sol) peut aussi apparaître. Latéralement, les filets fluides sont fortement accélérés et décollent au niveau des arêtes en induisant le long des parois des zones

- Zone décollée avec recirculation
- Sillage et circulation tourbillonnaires
- Couche de cisaillement : zone de mélange entre l'écoulement moyen et le sillage

- ① Points de décollement
- ② Points de recollement
- ③ Lignes de séparation
- ④ Lignes de flux moyen ou trajectoire moyenne



Différentes régions lors du contournement d'un immeuble à arêtes vives pour un écoulement turbulent

dépresseionnaires. L'écoulement décollé peut venir se rattacher sur la forme.

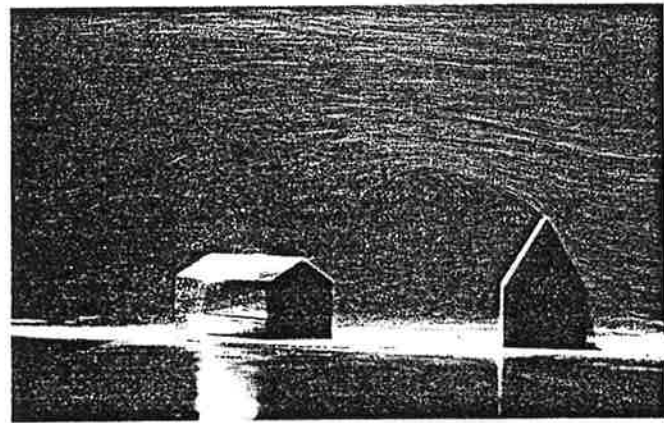
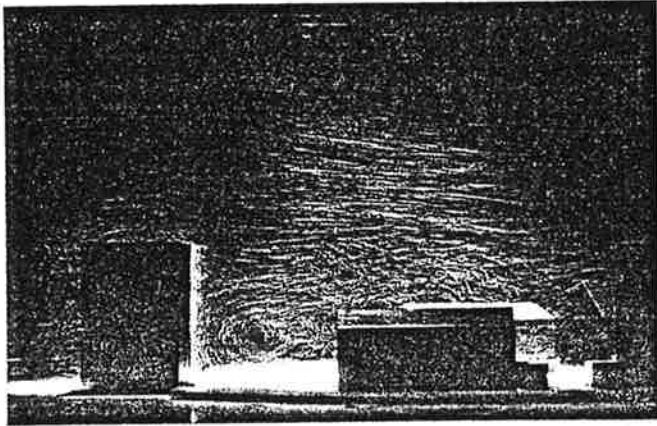
Nota : ces phénomènes de décollement peuvent apparaître aussi au voisinage des corniches suivant la pente du toit. Sous le vent de l'obstacle (zone dépressionnaire), des mouvements tourbillonnaires importants se développent pour former le sillage.

La schématisation présentée ne doit pas être vue comme un état figé, mais plutôt comme une situation moyenne dans le temps, autour de laquelle l'ensemble fluctue plus ou moins suivant les zones. On peut noter le caractère particulièrement instable des zones de recollement ou des lignes de séparation. Les pressions se développant sur le bâtiment présenteront, de la même manière que les écoulements, une nature profondément fluctuante et seront caractérisées localement par une valeur moyenne, un écart-type, une valeur de pointe, etc.

Le champ de vitesse (contournement de l'obstacle) et le champ de pression externe induit sur l'obstacle dépendent des caractéristiques du vent, des dimensions et de la forme de la construction et de la nature de l'environnement (interaction immédiate notamment). Par suite, la connaissance réaliste de ces écoulements ou des champs de pression externe ne pourra être réalisée qu'expérimentalement. Des démarches effectuées en vraie grandeur et en soufflerie atmosphérique (reproduisant les caractéristiques du vent naturel à l'échelle de la maquette) contribuent largement à la détermination de ces grandeurs.

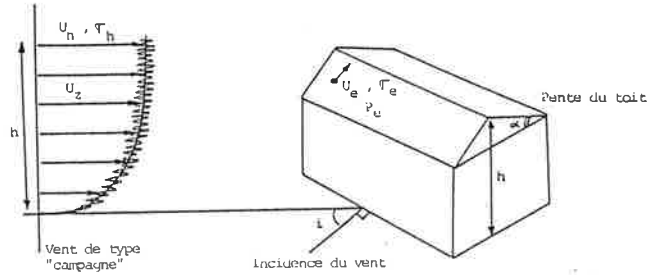
3,2 visualisation des phénomènes

Les visualisations par chronophotographie laser réalisées en soufflerie atmosphérique expriment bien la complexité et la nature particulièrement instable des phénomènes.



3,3 champs de vitesse et de pression : cas du pavillon individuel de pente de toit 22° 30'

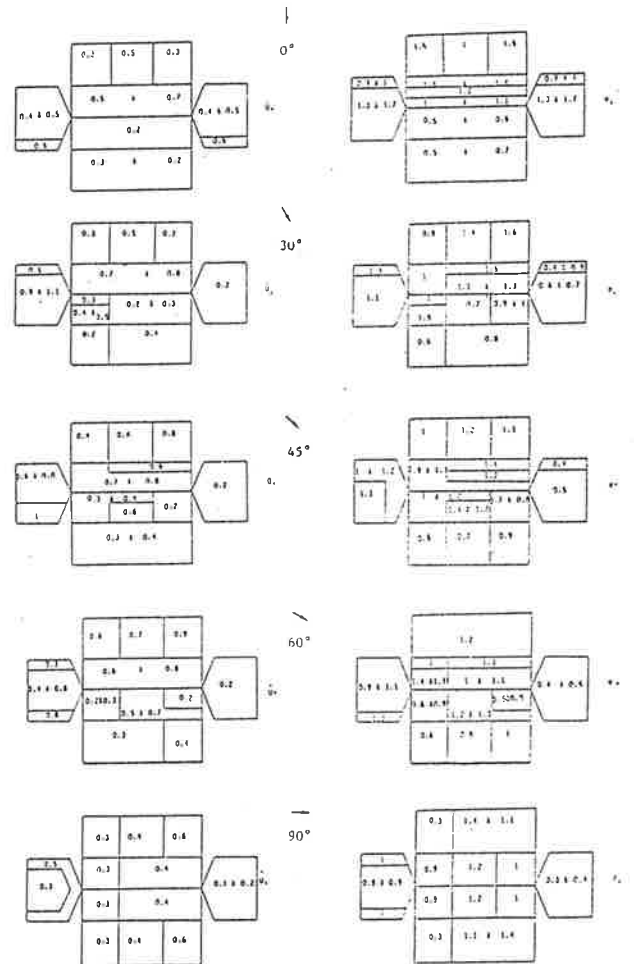
Pour fixer des ordres de grandeur, nous indiquons quelques résultats quantitatifs obtenus en soufflerie atmosphérique sur les écoulements voisins des parois et les pressions associées apparaissant sur un pavillon individuel isolé soumis à un vent de type campagne (faible rugosité du sol).



champ de vitesse et turbulence dans la couche au voisinage des parois (0 à 0,4 m) (1)

La présentation adimensionnelle des résultats est faite sous les formes suivantes :

- coefficient de vitesse moyenne : $\bar{U}_+ = \frac{\bar{U}_e}{U_h}$
- coefficient de turbulence : $\bar{\sigma}_+ = \frac{\sigma_e}{\sigma_h}$



Nota : l'influence d'un environnement du même type que la construction considérée (plan masse) conduit aux tendances suivantes : pour les faces au vent, les coefficients de vitesse peuvent être majorés jusqu'à 20% et les coefficients de turbulence jusqu'à 40% ; pour les faces sous le vent, les interactions de bâtiments peuvent, pour les deux coefficients, conduire à une majoration atteignant 40%.

Champ de pression externe(2)

La pression instantanée locale s'exprime par $P(t) = \bar{P} + P'(t)$ où \bar{P} est la pression moyenne (période T) et P' la fluctuation au temps t.

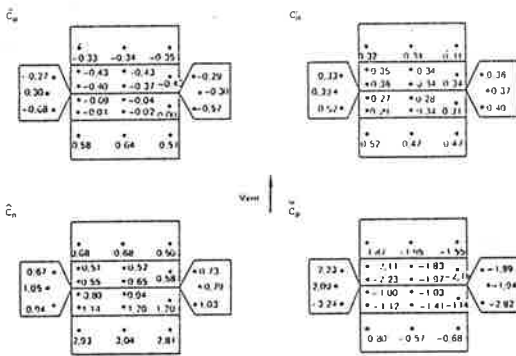
Par suite, les coefficients de pression adimensionnalisés par la pression dynamique de référence (amont) $\frac{1}{2} \rho U_h^2$ s'expriment de la manière suivante :

– coefficient de pression moyenne :
$$\bar{C}_p = \frac{\bar{P}}{\frac{1}{2} \rho U_h^2}$$

– coefficient de pression fluctuante :
$$C'_p = \frac{\sqrt{P'^2}}{\frac{1}{2} \rho U_h^2}$$

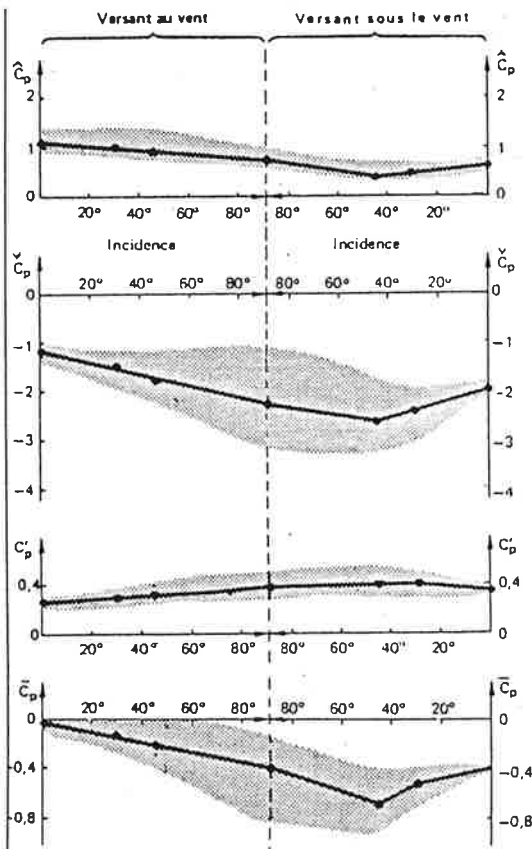
– coefficient de pointe maximale et minimale :

$$C_p = \frac{\text{Max}(P)}{\frac{1}{2} \rho U_h^2} \text{ et } C_p = \frac{\text{Min}(P)}{\frac{1}{2} \rho U_h^2}$$



Coefficients de pression sans environnement avec l'incidence 0°

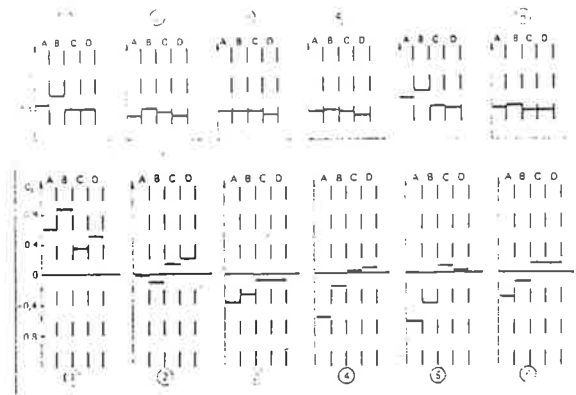
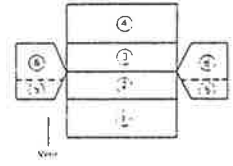
Les schémas suivants donnent l'influence de l'incidence du vent sur les coefficients de pression mesurés sur le toit.



Ces résultats montrent (et notamment la grande fourchette de valeurs sous le vent) un comportement relativement critique pour les incidences obliques ($i > 30^\circ$).

Les champs de pression vont aussi être dépendants de l'environnement. A titre d'exemple, et pour quatre types d'environnement (A, B, C et D), nous avons présenté les fourchettes de valeurs correspondantes en fonction d'une décomposition en six zones des faces de la maison déjà considérée pour l'incidence 0°.

- A : Sans environnement
- B : En lisière amont de l'environnement
- C : 250 m à l'intérieur de l'environnement
- D : 500 m à l'intérieur de l'environnement
- Fourchette des valeurs sur la zone
- Valeur moyenne sur la zone



Nota : le vent qui induit sur la construction un champ de pression va, indépendamment de l'environnement proche, jouer aussi son rôle. Ainsi, on a pu constater que le passage d'un vent de « campagne » à un vent de banlieue conduit toujours à une augmentation, plus ou moins forte, des coefficients de pression (\bar{C}_p , C'_p , \hat{c} , δ).

Au demeurant, ces coefficients sont référencés à la pression dynamique amont (à la hauteur h), moins forte, compte tenu du modelage de la rugosité de banlieue. Par conséquent, en termes de pression effective, rien ne prouve que les niveaux obtenus soient plus élevés qu'au même point avec un vent de campagne. Dans une première approche sur les problèmes d'étanchéité, un vent d'un seul type, soit celui de type campagne, nous paraît suffisant si les effets d'environnement immédiat sont pris en compte.

4 pression interne

La pression effective à laquelle l'élément de toiture est instamment soumis et qui peut conditionner une grande partie du mécanisme de pénétration de l'eau est la somme algébrique de la pression externe locale (décrite précédemment) et de la pression régnant sur sa partie arrière : cette dernière dépend de l'ensemble des circuits pneumatiques la mettant en communication (ou non) avec le volume interne des combles (lui-même dépendant du champ de pression externe et de l'importance et de la répartition des orifices) ou directement du champ externe et des perméabilités de la couverture elle-même, si cette dernière est isolée de manière relativement étanche de la pression régnant sans les combles (film, matériaux isolants).

◀ Influence de l'incidence sur les coefficients de pression mesurés sur le toit (pente 22° 30') de la maison, en l'absence d'environnement proche

- Valeurs moyennes sur le versant
- Valeurs mesurées sur le versant

La pression moyenne régnant dans les combles peut être estimée théoriquement. Si la perméabilité de la toiture est uniformément répartie, une moyenne pondération par les éléments de surface en fonction du champ de pression externe moyen permettra d'obtenir la pression interne.

Si la perméabilité n'est pas uniformément répartie, mais présente des orifices préférentiels en termes de perte de charge, une estimation théorique pourra encore être faite. Le débit d'air qui traverse un orifice est à peu près proportionnel à la racine carrée de l'écart de pression moyenne entre les deux extrémités de l'orifice et à l'aire de celui-ci. En considérant que la quantité d'air entrant et sortant dans les combles doit être égale, on aura une estimation de la pression moyenne interne.

Par contre, l'estimation de pression interne extrême n'est pas envisageable, car cette pression résulte d'un champ de pression externe qui n'atteint pas ces valeurs maximales simultanément (faible corrélation des fluctuations de pression entre la face au vent et sous le vent par exemple). De plus, la manière « dynamique » dont les écoulements vont transiter à travers les fuites (cas des toitures relativement peu perméables), c'est-à-dire la manière dont les fluctuations de pression externe vont être filtrées dans le volume intérieur, n'est pas connue.

Le problème devient encore plus complexe lorsque des couches plus ou moins étanches à l'air viennent séparer l'arrière du revêtement de couverture et le comble.

Pour essayer de mieux appréhender ces types de phénomènes et notamment pour connaître les pressions internes effectives (valeur moyenne, pointe, spectre, homogénéité, etc.) et les écoulements secondaires associés, le CSTB entreprend en 1984 des mesures en vraie grandeur sur plusieurs maisons.

5 influence de la nature instationnaire des champs de pression et de vitesse sur les débits de fuite

L'importance relative de la dynamique fluctuante des écoulements de contournement (avec développement de couche limite au niveau des tuiles, interaction avec le ruissellement, impact des gouttes de pluie, etc.) et des champs de pression internes et externes variables dans le temps, n'est pas connue dans les mécanismes de pénétration de l'eau. Néanmoins, la différence de pression instantanée résultante qui se développe sur l'élément fluide sera déterminante dans sa probabilité de pénétrer à travers une fente ou un orifice de la couverture.

Cette pression « motrice » est contrariée par les effets physiques, tels que la gravité, le frottement dans l'orifice (perte de charge), etc. liés à l'eau dans son propre système de mécanique des fluides.

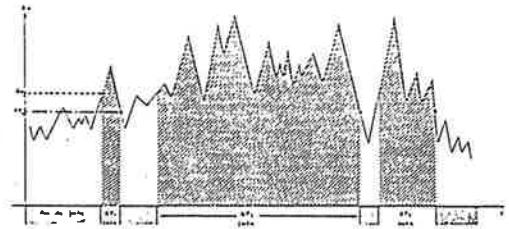
Par suite, il faudra un certain niveau seuil (ΔP_{seuil}) pour déclencher le phénomène de transit de l'eau dans un ajutage et cette pression motrice s'exerce de l'extérieur vers l'intérieur :

$$(P_{\text{ext}} - P_{\text{int}} > 0)$$

On peut penser que cet écoulement se maintiendra une fois « amorcé », tant que la différence de pression motrice restera supérieure à une valeur minimale (ΔP_{min}) avec $\Delta P_{\text{min}} \leq \Delta P_{\text{seuil}}$.

Pendant l'intervalle de temps ΔT , où la différence de pression motrice est telle que la fuite reste amorcée, la pression motrice n'en demeure pas moins variable. Le débit de fuite local (proportionnel à l'aide de la fuite et à $(\Delta P)^n$ avec $1 \leq n \leq 2$) sera pendant cette période ΔT lui aussi constamment

évolutif. De plus, la nature même de ces écoulements, non établis, en régime transitoire, ne vient que compliquer l'approche quantitative des phénomènes.



apparition et durée de la fuite au cours du temps pour une fente « i », d'aire S_i , la différence de pression extérieure et intérieure étant strictement positive

Sur la période T , localement (fente « i », la durée de fuite est : $\Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 \leq T$ et le débit de fuite s'écrit :

$$Q_i = k \cdot S_i \cdot \int_{\Delta T} (\Delta P)^n dt \text{ et sur tout le toit } Q = \sum q_i.$$

Note : k = coefficient de proportionnalité.

Si l'on se remémore qu'à chaque valeur de la vitesse du vent amont, il est induit sur la construction un niveau de champ de pression externe, que l'interaction de ce champ et de la toiture conduit à une certaine pression interne, que cette pression interne viendra se conjuguer avec le champ externe pour conditionner en association avec l'élément fluide le débit de fuite et qu'enfin toute cette démarche repose sur les phénomènes transitoires et fluctuants, il est clair que les fuites sont *par essence des mécanismes totalement non linéaires par rapport à la vitesse du vent*. Cet état de fait devra toujours être présent en mémoire lors de la définition ou de la recherche de procédure de qualification des produits.

6 conclusion

Dans cette note, nous avons présenté l'importance et l'interdépendance des paramètres aérodynamiques intervenant dans les problèmes d'étanchéité des couvertures.

La complexité du système et la volonté d'aider les concepteurs du bâtiment par une meilleure compréhension des phénomènes ont conduit nos travaux vers la mise en place d'expérimentations en vraie grandeur, toute approche sur modèle réduit étant vouée à l'échec (incompatibilité des conditions de similitude eau-air, etc.).

Enfin, pour répondre efficacement à la modélisation de ces phénomènes ou à la définition de bancs de qualification significatifs (indispensables sous l'angle de la normalisation), le CSTB a un projet de soufflerie climatique qui produira à l'échelle 1/1 la réalité des phénomènes, tout en autorisant le décodage et le contrôle des différents paramètres.

Un tel outil paraît totalement indispensable si l'on veut résoudre réellement les problèmes d'étanchéité dans le bâtiment.

références

1. L. Kairouani, « Champ de vitesse, champ de pression autour d'un bâtiment : application aux effets du vent sur les capteurs solaires », EN-ADYM 82-21 L.
2. REEF, Tome 2 – Sciences du Bâtiment « Aérodynamique », CSTB.