

Détermination des conditions limites en pression pour le calcul de la ventilation naturelle

Édouard Walther, Antoine Hubert, Alexis Sauvageon, Mateusz Bogdan

AREP L'hypercube
16 avenue d'Ivry 75013 Paris

RESUME. La ventilation naturelle peut être un moyen efficace de rafraîchir les espaces, notamment les grands volumes très ouverts et vitrés comme certaines gares. Le calcul du renouvellement d'air est basé sur les différences de pression entre éléments de façade, qui sont issues d'abaques adaptées à des géométries régulières. On s'intéresse ici à la détermination fine des coefficients de pression en façade par la mécanique des fluides et à leur utilisation en simulation thermique dynamique pour le calcul de la ventilation naturelle.

MOTS-CLÉS. ventilation naturelle, optimisation

ABSTRACT. Natural ventilation may be an efficient means of cooling for the built environment, especially large or glazed volumes such as train stations. The determination of natural ventilation-driven air change rates is based on pressure differences between façade elements, generally taken from empirical tables, the latter being adapted for regular shapes buildings standing in free field. We hence examine here the influence of CFD-based pressure coefficient in building energy simulation for natural ventilation.

KEYWORDS. natural ventilation, optimisation

1 INTRODUCTION

La ventilation naturelle est une alternative intéressante à la climatisation, notamment en mi-saison ou utilisée en rafraîchissement nocturne. Cependant la détermination de la ventilation naturelle en simulation thermique dynamique (STD) est réalisée à partir de corrélations empiriques (Swami et Chandra, 1987), valides pour des géométries parallélépipédiques en champ libre et en environnement urbain régulier, souvent éloignées des conditions réelles. Dans certains cas particuliers, comme pour les bâtiments qu'on cherche à ventiler naturellement ou les espaces semi-ouverts, il est utile de connaître plus finement la répartition des pressions en façade.

En ce sens, l'évolution des méthodes numériques et des puissances disponibles permet désormais d'envisager un calcul détaillé adapté à ces configurations. On se propose donc dans cette étude d'ébaucher une réponse aux questions suivantes :

- Est-il toujours nécessaire de réaliser un couplage avec un calcul de mécanique des fluides pour le calcul de la ventilation naturelle en STD ?
- Lorsqu'un tel couplage est fait, pour combien de directions de vent faut-il réaliser le calcul des coefficients de pression ?

- Qualitativement, quelle est l'influence de la prise en compte de l'environnement urbain sur le calcul de la ventilation naturelle ?

2 MODÉLISATION DE LA VENTILATION NATURELLE

2.1 ÉQUATIONS GOUVERNANTES EN STD

En simulation thermique dynamique, la modélisation des phénomènes aérauliques repose sur l'approche de Bernoulli. Cette approche simplifiée constitue un compromis raisonnable entre temps de calcul et précision de l'évaluation des débits entre les différentes zones d'un bâtiment.

Un modèle communément utilisé, notamment dans le logiciel libre de STD *EnergyPlus* est celui de CONTAM (Walton, 1989; Dols et al., 2002; Walton et Dols, 2003). La représentation est nodale, c'est-à-dire que chaque zone possède un unique nœud de pression, qui est calculée en fonction de l'équilibre des pressions extérieures et/ou de celles des zones adjacentes comme illustré Figure 1.

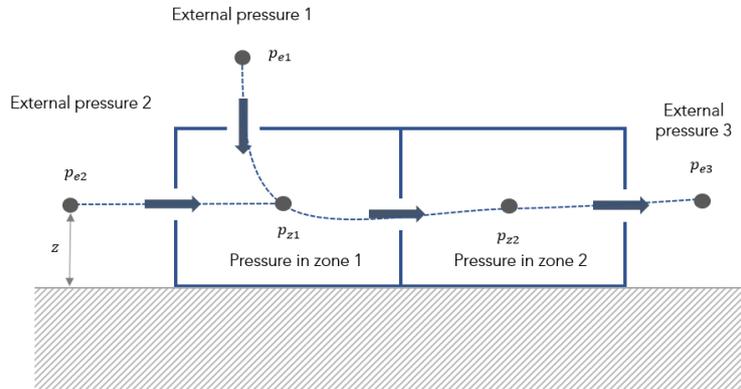


FIGURE 1. Représentation nodale des nœuds de pression pour le modèle aéraulique en STD.

L'enveloppe est considérée comme perméable aux infiltrations d'air, par les ouvrants ou les inétanchéités (fissures, joints, etc.). On écrit alors l'égalité suivante entre la zone intérieure z et l'extérieur e qui donne la différence de pression totale entre ces points :

$$\Delta p = p_e - p_z + \frac{\rho}{2}(v_e^2 - v_z^2) + \rho g(z_e - z_z) \quad (1)$$

où $\frac{\rho}{2}(v_e^2 - v_z^2) = p_w$ est la pression dynamique induite par le vent sur la surface, p_z la pression totale dans la zone intérieure, p_e la pression statique sur la façade extérieure, ρ la masse volumique de l'air et v_e/z les vitesses d'air, respectivement à l'extérieur et à l'intérieur. Il s'agit donc de déterminer finement p_w , la condition limite en pression liée au vent. Le système ainsi posé sera résolu numériquement avec un algorithme adapté aux systèmes non linéaires.

La détermination de la vitesse de vent à la hauteur z de l'ouvrant est faite à partir d'une loi de puissance qui représente la couche limite atmosphérique. En l'absence de simulations de mécanique des fluides, il est nécessaire de corriger le profil météorologique mesuré en station pour introduire les effets dus à la topographie réelle autour du bâtiment. Ainsi on modifie la vitesse en fonction des valeurs mesurées à la hauteur z_m :

$$v(z) = v_m \left(\frac{\delta_m}{z_m} \right)^{\alpha_m} \left(\frac{z}{\delta} \right)^{\alpha} \quad (2)$$

où v_m représente la vitesse mesurée la station météorologique, α un exposant lié au terrain, α_m un exposant lié au terrain autour de la station météorologique, δ l'épaisseur de couche limite au-dessus du bâtiment et enfin δ_m l'épaisseur de couche limite au-dessus de la station météorologique.

S'il est plus commode de travailler avec des pressions, il n'est pas envisageable de déterminer celles-ci pour toutes les vitesses de vent et tous les angles d'incidence d'un site. On introduit alors la notion de coefficient de pression, ou rapport entre la pression de stagnation sur l'enveloppe, p et la pression dynamique à l'infini, p_∞ tel que :

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho v_\infty^2}{2}} \quad (3)$$

où v_∞ est une vitesse de référence, qui peut être définie comme la vitesse maximum de couche limite ou la vitesse à la hauteur moyenne du bâtiment (Shirzadi et al., 2018).

À partir des équations (2) et (3) il est possible de déterminer simplement la pression liée au vent p_w de sorte que :

$$p_w = C_p \times \frac{\rho v(z)^2}{2} = \left(\frac{v(z)}{v_\infty} \right)^2 \times (p - p_\infty) \quad (4)$$

Le coefficient C_p fournit ainsi un moyen de calculer la pression sur l'enveloppe pour toutes les amplitudes de vent dans une direction donnée.

2.2 CALCUL DES PRESSIONS PAR LA MÉCANIQUE DES FLUIDES NUMÉRIQUE

Afin de réaliser des simulations à échelle urbaine tenant compte des spécificités de ces échelles, de nombreux auteurs et guides (Blocken et al., 2012; Franke, 2007; INERIS, 2015; Tominaga et al., 2008) proposent de bonnes pratiques que nous synthétisons très succinctement ici, la finalité de ce travail étant d'observer l'influence du calcul fin des C_p sur la STD.

Il conviendra dans un premier temps de définir un domaine d'étude suffisamment grand afin qu'un écoulement entièrement développé ait lieu en amont de la zone d'intérêt. Ainsi, si l'on s'intéresse à un bâtiment de hauteur H , il est recommandé de placer les faces latérales et la face supérieure à une distance minimum de $5H$ (voir Figure 2 dans le cas d'un bâtiment isolé). Idéalement sur la face aval, il convient de modéliser une distance $10H$. La distance accrue en aval de l'objet d'étude a pour but d'avoir suffisamment d'espace pour obtenir un écoulement stable. Les mêmes prescriptions valent dans le cas d'un environnement urbain, mais les cotations s'appliquent alors sur le périmètre de ce dernier et non plus sur celui de la zone d'intérêt.

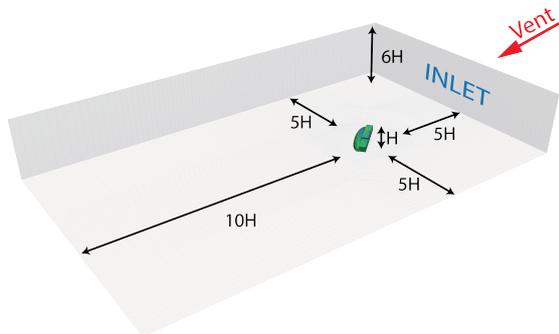


FIGURE 2. Recommandations pour les dimensions caractéristiques à respecter.

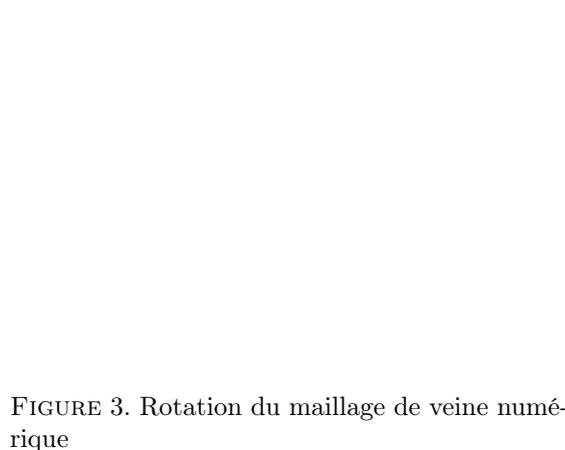


FIGURE 3. Rotation du maillage de veine numérique

D'une façon générale, le « blocage », c'est-à-dire le ratio de surfaces entre la projection de l'objet d'étude et la face amont du domaine doit être inférieur à 10%, et idéalement autour de 3 à 5%.

Ainsi, en se servant de la mécanique des fluides numérique, il devient possible de simuler différentes directions de vents afin d'en percevoir les effets sur les pressions en façades. Une approche conforme aux recommandations, et qui limite substantiellement le temps alloué au maillage des géométries est l'utilisation de ce que nous appelons « soufflerie numérique ». Il s'agit d'un maillage en deux parties, comme illustré sur la Figure 3. Le cylindre orange représente la frontière entre les deux sous-domaines d'étude :

- d'une part l'intérieur du cylindre, qui contient la zone d'intérêt avec ou sans environnement urbain,
- d'autre part le domaine de calcul, respectant les recommandations précédentes.

Cette méthode permet de ne mailler qu'une seule fois chacun des sous-domaines. Des rotations simples permettent ensuite d'envisager toutes les directions de vent incident.

Dans la présente étude, le code de calcul open-source OpenFOAM (Jasak et al., 2007) a été utilisé, avec les hypothèses suivantes :

- Approche RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) et résolution isotherme en régime permanent.
- Algorithme de résolution SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*)
- Maillage composé de 600 000 éléments
- Modèle de turbulence $k - \omega$ SST
- Conditions limites globales : Inlet : Profil de vitesse correspondant à la couche limite atmosphérique ; Outlet : Condition de « zero-gradient » sur la pression ; Sol et parois : fonctions de paroi avec des rugosités adaptées (dont rugosité correspondant aux prescriptions de l'Eurocode 1 au sol)

2.3 PRÉSENTATION DU CAS D'ÉTUDE

Le modèle de la gare de Strasbourg en Figure 4 comporte quatre zones thermiques. L'évaluation du renouvellement d'air est menée uniquement sur la zone de l'atrium, d'un volume de 35000 m³ non conditionné, pour une superficie de 2245 m² orientée sud-est. L'atrium étant très largement vitré, il est donc sujet aux infiltrations, mais ne comporte pas d'ouvrants. Par ailleurs ses portes d'accès sont supposées ouvertes durant la journée (trois entrées depuis le parvis de la gare, deux accès aux extrémités de la verrière, un accès souterrain et communication avec les trois autres zones thermiques). Afin de s'affranchir des effets d'inertie du local et des sources internes, ainsi que la température intérieure ne sont pas observés. Le fichier météorologique utilisé est celui représentatif du climat de Strasbourg, dont la rose des vents donnée sur la Figure 5 montre une direction de vent dominant en provenance du Sud-Ouest. Dans un premier temps, on ne prend pas en compte l'environnement urbain proche afin de faciliter l'interprétation des résultats.

3 APPLICATION DE LA MÉTHODE

L'approche classique adoptée en STD consiste à utiliser des coefficients de pression issus de tables empiriques souvent issues de (Swami et Chandra, 1987). Par défaut, ces coefficients sont calculés pour 8 directions uniformément réparties (soit $\Delta\theta = 45^\circ$). Les coefficients de pression sont ensuite déterminés par interpolation linéaire entre valeurs des deux directions de vent calculées les plus proches.

Si ces coefficients sont éprouvés, ils ont toutefois été obtenus pour des bâtiments parallélépipédiques en champ libre ou dans un environnement urbain régulier. Afin de mieux estimer la ventilation naturelle, la méthode utilisée ici consiste à calculer les coefficients de pression à l'aide de simulations de mécanique des fluides numérique (communément appelée CFD) et de les combiner à l'approche classique STD.

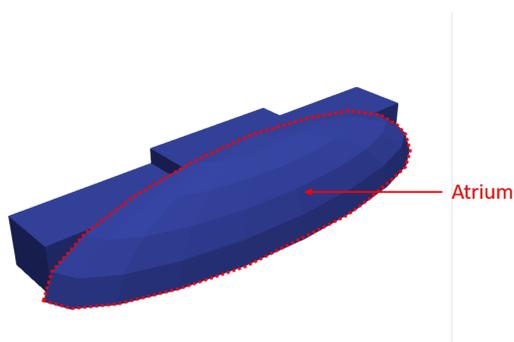


FIGURE 4. Gare de Strasbourg

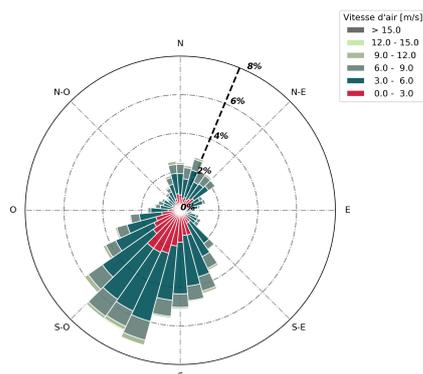


FIGURE 5. Rose des vents de Strasbourg

3.1 COMPARAISON AVEC L'APPROCHE CLASSIQUE

Afin d'évaluer la pertinence de la méthode exposée, on compare dans un premier temps les coefficients de pression calculés par CFD pour un bâtiment en champ libre avec ceux obtenus par l'approche classique.

Les résultats pour une facette donnée en fonction de la direction du vent sont présentés sur la Figure 6. Si les dynamiques sont sensiblement similaires, on remarque que les amplitudes sont sous-estimées est probablement lié à la forme simple du cas d'étude. De plus, calculer les coefficients de pression avec la CFD, a l'avantage, contrairement à la méthode classique, de prendre en compte la variation spatiale des pressions sur une même façade.

Le calcul de STD est ensuite lancé selon l'approche par défaut et l'approche combinée à la CFD, dite « couplée », pour une discrétisation angulaire avec huit directions de vent dans les deux cas ($\Delta\theta = 45^\circ$). Les résultats tracés sur la Figure 7 pour la deuxième semaine de l'année montrent que les taux de renouvellement d'air diffèrent sensiblement, l'approche classique sous-estimant le renouvellement d'air jusqu'à un facteur ~ 2 .

En considérant la différence à l'échelle annuelle, on constate que le taux de renouvellement d'air calculé avec les approches classique et couplée diffère de plus de 12% la moitié du temps et peut atteindre jusqu'à 60% d'écart. Ces résultats sur une géométrie pourtant assez simple justifient l'intérêt d'utiliser la méthode présentée ici, qui permet d'estimer de manière plus fiable les coefficients de pression.

Dans les sections suivantes on examine l'influence de la discrétisation angulaire, de la rose des vents du site et de la présence de l'environnement.

3.2 INFLUENCE DE LA DISCRÉTISATION ANGULAIRE

Afin d'optimiser le temps et l'effort calculatoire, l'influence du nombre de directions de vent est étudiée. Le calcul couplé CFD/STD est réalisé pour 36 directions uniformément réparties (soit un calcul CFD tous les $\Delta\theta = 10^\circ$). Ce nombre constitue le maximum de directions de vent exploitable dans *EnergyPlus*. Cette étude sert de référence. On compare ensuite la valeur de renouvellement d'air obtenue dans ce cas de référence avec des nombres de directions plus faibles, à savoir 8, 12, 18 et 24. Les résultats obtenus sont présentés par quartiles sur la Figure 8. On constate que l'écart médian est sous la barre des 5% dans pour toutes les directions simulées. L'écart maximum se réduit au fur et à mesure que le nombre de directions de vents simulées augmente. A partir de 12 directions de vent uniformément réparties, 75% des taux de renouvellement d'air de l'année ont un écart relatif inférieur à 5% au cas où 36 directions de vent

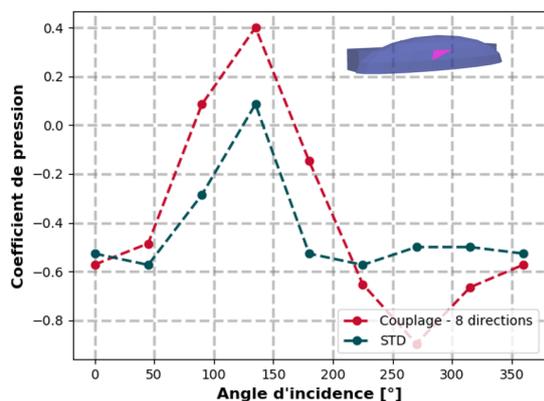


FIGURE 6. Comparaison des coefficients de pression pour une surface donnée de l'atrium.

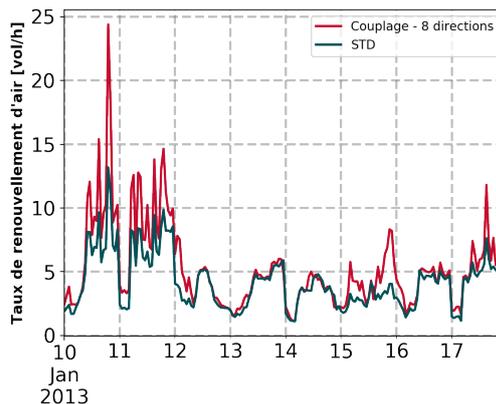


FIGURE 7. Comparaison des taux de renouvellement d'air : approche classique *versus* couplée.

sont simulées. Dans ce cas, simuler 12 directions uniformément réparties apparaît être un bon compromis entre temps de calcul et précision des résultats.

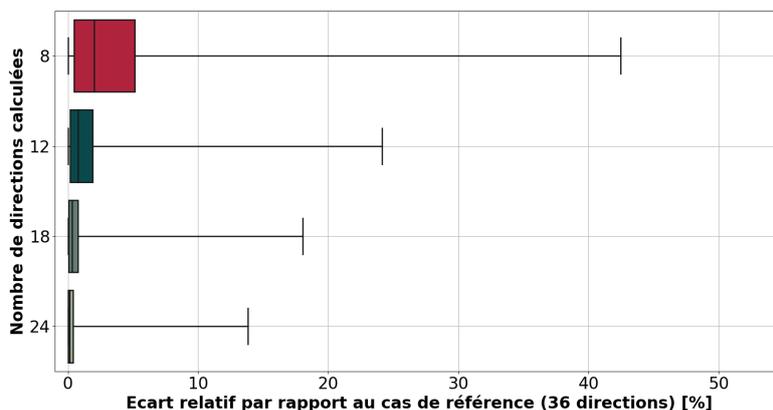


FIGURE 8. Répartition des écarts relatifs par rapport au cas de référence de 36 directions pour 8, 12, 18 et 24 directions

3.3 INFLUENCE DE LA ROSE DES VENTS DU SITE

Afin d'évaluer l'influence de la rose des vents sur les résultats, les simulations sont réalisées pour les conditions de vent des villes de Nice et de Strasbourg (cf. Figure 9). Les résultats de l'approche développée considérant 8 et 36 directions de vent réparties de manière homogène (soit respectivement tous les 45 ou tous les 10 degrés) sont comparés. Les écarts relatifs sont réduits pour les directions de vent communes aux deux discrétisations i.e 0, 90, 180 et 270° (cf. Figure 9). En revanche, les écarts relatifs sont plus importants pour les directions de vent situées entre deux directions de vent discrétisées consécutives et de surcroît celles dont les fréquences d'occurrence sont importantes. Ainsi, en champ libre, il semblerait astucieux de concentrer l'effort calculatoire selon les directions principales plutôt qu'en utilisant une discrétisation régulière.

3.4 INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN

L'effet de l'environnement urbain, présenté en Figure 10 avec la gare de Strasbourg, est discuté dans cette section. Les taux de renouvellement d'air horaire sont calculés en utilisant successivement les coefficients de pression obtenus en champ libre et avec environnement urbain

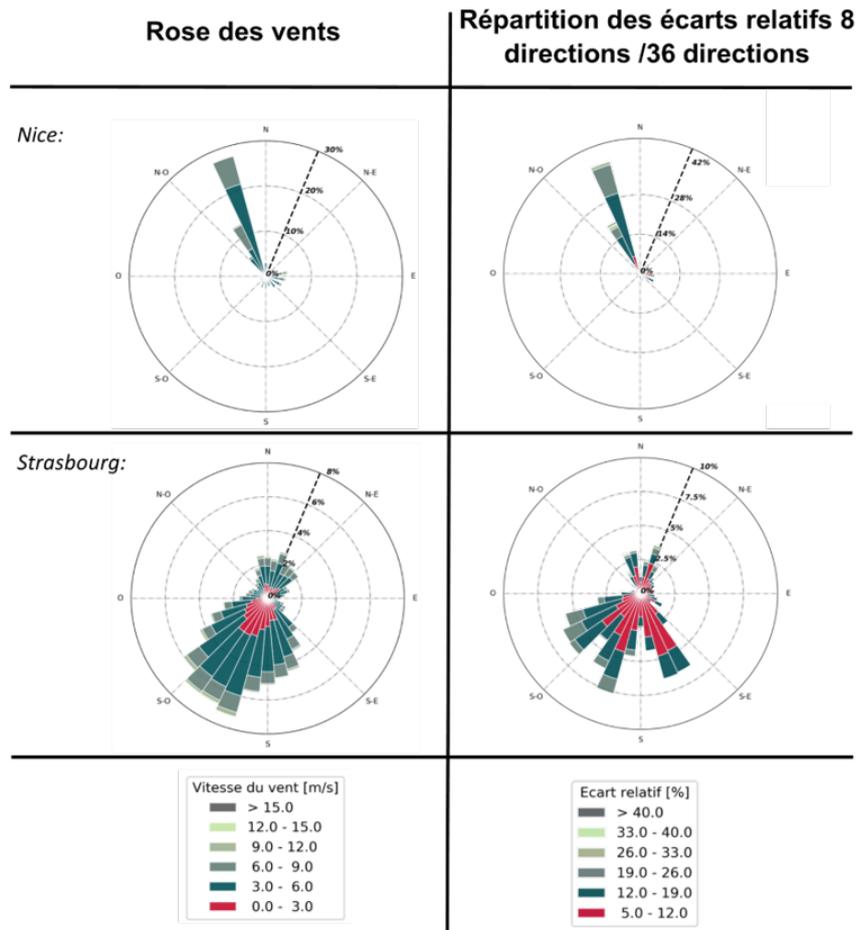


FIGURE 9. Rose des vents (gauche) et répartition des écarts relatifs (droite) par rapport au cas de référence pour les roses des vents de Nice et de Strasbourg

puis sont comparés en Figure 11. On observe que plus de 50% de l'année, les écarts relatifs entre les valeurs calculées avec et sans environnement excèdent 8% pouvant même atteindre 100%. Il est donc fondamental d'introduire l'environnement urbain proche dans les simulations CFD.

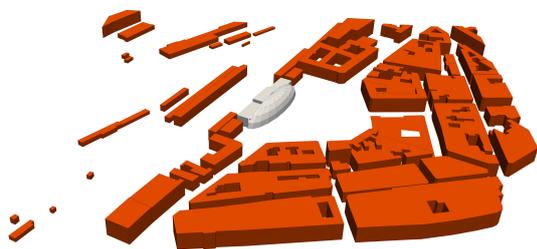


FIGURE 10. Environnement urbain proche de la gare de Strasbourg

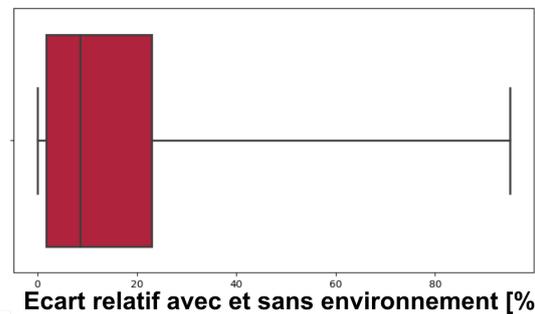


FIGURE 11. Ecart relatif des taux de renouvellement d'air avec et sans environnement

Sur la Figure 12, on compare la répartition des écarts relatifs entre les cas où 8 et 36 directions sont simulées, similairement à ce qui a été fait en Figure 9, en champ libre et en considérant l'environnement urbain. On constate notamment que les écarts relatifs sont réduits en présence de l'environnement urbain. Ceci est dû en partie à la nature chaotique de l'écoulement, générée par

la présence de l’environnement urbain qui tend à homogénéiser l’écoulement. De plus, les écarts se concentrent sur les directions principales et majoritairement dans l’axe des rues principales qui constituent des « canyons urbains ».

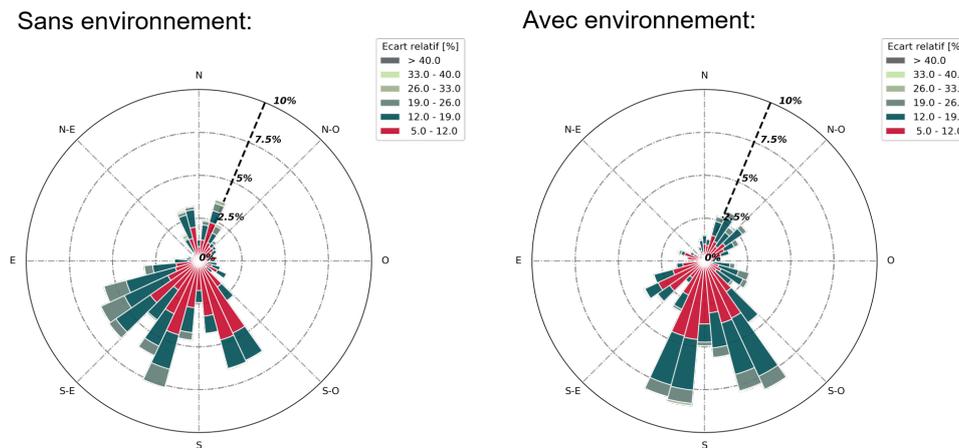


FIGURE 12. Répartition des écarts relatifs sans et avec environnement urbain.

4 CONCLUSION

Dans cet article, l’influence des coefficients de pression sur le renouvellement d’air lié au vent a été étudiée.

Il a été montré que pour des bâtiments sujets aux infiltrations ou possédant de larges ouvertures, il est nécessaire de réaliser un calcul de mécanique des fluides numérique pour déterminer de manière fine les pressions en façade, sans quoi l’écart en termes de renouvellement d’air peut être significative.

Les résultats peuvent être résumés comme suit :

- L’utilisation des C_p empiriques amène des écarts allant jusqu’à 60%. Il convient donc de les déterminer de manière fine lorsque la ventilation naturelle est un phénomène prépondérant de la thermique du volume étudié.
- La discrétisation angulaire de $\Delta\theta = 30^\circ$ est suffisante, car l’écart n’est pas significatif avec des discrétisations plus fines.
- Concernant la sensibilité des résultats à la discrétisation angulaire, les résultats en champ libre obtenus pour deux roses de vents distinctes mettent en avant que discrétiser plus finement suivant les directions principales de vent pourrait améliorer les résultats. En présence de l’environnement, la sensibilité à la discrétisation angulaire est réduite mais est également plus significative le long des artères principales de l’environnement alignées avec les directions principales de vent. Un choix astucieux des directions de vent simulées permettrait donc d’améliorer la qualité des résultats pour un temps de calcul identique.
- Les résultats avec et sans environnement ont également montré que la présence de l’environnement influence l’estimation de la ventilation de manière significative. Ainsi il est nécessaire de représenter la géométrie de l’environnement proche lors du calcul.

La méthode développée dans le cadre de cet article a été appliquée au cas d’une gare qui est un bâtiment dont le volume est considérable. Cependant, cette méthode peut aussi s’appliquer à des bâtiments sujets aux infiltrations mais de volumes plus réduits notamment grâce à sa capacité de déterminer les variations spatiales des coefficients de pression.

RÉFÉRENCES

- Blocken, B., Janssen, W., et van Hooff, T. (2012). Cfd simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas : General decision framework and case study for the eindhoven university campus. *Environmental Modelling & Software*, 30 :15–34.
- Dols, W. S., Walton, G. N., et Denton, K. R. (2002). *CONTAMW 2.0 user manual*, volume 6921. NISTIR.
- Franke, J. (2007). *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*. Meteorological Inst.
- INERIS (2015). Guide de bonnes pratiques pour la réalisation de modélisations 3d pour des scénarios de dispersion atmosphérique en situation accidentelle. *Available for download from http://www.ineris.fr/aida/liste_documents/1/86007/0*.
- Jasak, H., Jemcov, A., Tukovic, Z., et al. (2007). Openfoam : A c++ library for complex physics simulations. In *International workshop on coupled methods in numerical dynamics*, volume 1000, pages 1–20. IUC Dubrovnik Croatia.
- Shirzadi, M., Mirzaei, P. A., et Naghashzadegan, M. (2018). Development of an adaptive discharge coefficient to improve the accuracy of cross-ventilation airflow calculation in building energy simulation tools. *Building and Environment*, 127 :277–290.
- Swami, M. V. et Chandra, S. (1987). Procedures for calculating natural ventilation airflow rates in buildings. *ASHRAE Final Report FSEC-CR-163-86, ASHRAE Research Project*.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., et Shirasawa, T. (2008). Aij guidelines for practical applications of cfd to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(10-11) :1749–1761.
- Walton, G. N. (1989). *AIRNET : a computer program for building airflow network modeling*. National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD.
- Walton, G. N. et Dols, W. S. (2003). *CONTAM 2.1 Supplemental user guide and program documentation*. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg.