



HAL
open science

Ventilation naturelle par ouverture de fenêtre : analyse d'incertitude et de sensibilité dynamique du taux de renouvellement d'air dans le cas d'un bâtiment résidentiel

Cédric Schreck, Aurélie Fouquier, Simon Rouchier, Étienne Wurtz

► To cite this version:

Cédric Schreck, Aurélie Fouquier, Simon Rouchier, Étienne Wurtz. Ventilation naturelle par ouverture de fenêtre : analyse d'incertitude et de sensibilité dynamique du taux de renouvellement d'air dans le cas d'un bâtiment résidentiel. IBPSA France, May 2024, La Rochelle, France. hal-04577218

HAL Id: hal-04577218

<https://univ-smb.hal.science/hal-04577218v1>

Submitted on 16 May 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Ventilation naturelle par ouverture de fenêtre : analyse d'incertitude et de sensibilité dynamique du taux de renouvellement d'air dans le cas d'un bâtiment résidentiel.

Cédric Schreck*^{1,2}, Aurélie Fouquier², Simon Rouchier¹, Etienne Wurtz²

¹ Univ Savoie Mont-Blanc, campus Bourget, 73375 Le Bourget du Lac, France

² Univ. Grenoble Alpes, CEA, Liten, campus INES, 73375 Le Bourget du Lac, France

*cedric.schreck@univ-smb.fr

RESUME. La capacité d'un bâtiment ventilé naturellement à maintenir le confort thermique de l'occupant dépend du taux de renouvellement d'air atteignable à travers les ouvrants. Le modeleur peut alors se demander quel est l'impact de l'incertitude des paramètres tels que les coefficients de décharge (Cd) et coefficients de pression (Cp) sur le résultat en renouvellement d'air. Dans cet article, nous simulons la réponse thermo-aérodynamique d'une maison individuelle : deux configurations traversantes et une configuration mono façade sont testées. L'originalité de cet article réside en l'exploration du potentiel de la méthode d'analyse de sensibilité RBD-FAST sur l'étude de la sortie dynamique en renouvellement d'air. Dans notre cas d'étude, les incertitudes de +/-50% dans les coefficients de décharge et dans le choix des coefficients de pression engendrent des incertitudes du même ordre de grandeur sur le taux de renouvellement d'air (jusqu'à +/- 5,6 h⁻¹, soit +/- 46% de la valeur). L'analyse des indices de Sobol et variances partielles mettent en évidence le lien entre sensibilité aux paramètres, et vitesses et directions du vent.

MOTS-CLÉS : Ventilation Naturelle, Analyse de Sensibilité, Sobol

ABSTRACT. The ability of a naturally ventilated building to maintain occupant thermal comfort depends on the achievable air change rate through the openings. Designers may therefore question the impact of parameter uncertainty, such as discharge coefficients (Cd) or pressure coefficients (Cp) on air change rate results. In this article, we simulate the thermo-aerodynamic response of a single-family house: two cross-ventilation configurations and a single facade configuration are tested. The originality of this article lies in exploring the potential of the RBD-FAST sensitivity analysis method for studying dynamic air change rate output. In our case study, uncertainties of +/-50% in discharge coefficients and in the selection of pressure coefficients result in uncertainties of the same magnitude on the air exchange rate (up to +/- 5.6 h⁻¹, or +/- 46% of the value). The analysis of Sobol indices and partial variances highlights the link between parameter sensitivity, wind speeds, and directions.

KEYWORDS : Natural Ventilation, Sensitivity Analysis, Sobol

Ce travail fait partie du projet MODERNAT financé par la région Auvergne Rhône Alpes dans le cadre du Pack Ambition Recherche 2020.

1. INTRODUCTION

Le taux de renouvellement d'air est un paramètre influent sur la qualité de l'air intérieur (Nazaroff 2021) et le confort thermique de l'occupant (Kolokotroni et Heiselberg 2015). Dans le contexte de réduction de la consommation énergétique, la ventilation naturelle par ouverture de fenêtre est une solution passive, permettant par exemple de réduire le besoin de rafraîchissement en été. Or, l'efficacité d'un tel système sur un bâtiment donné dépend des valeurs de renouvellement d'air atteignables à travers les ouvrants. La littérature montre qu'il y a une forte variabilité des renouvellements d'air par ouverture

de fenêtre. Elle est fonction des conditions météo (écarts de températures entre intérieur et extérieur, vitesse et direction du vent), et des paramètres liés au bâtiment : la configuration (traversante ou mono façade), les coefficients de décharge (C_d) qui représentent la résistance à l'air des fenêtres et les coefficients de pression (C_p) qui représentent l'impact du vent sur les façades (Kolokotroni et Heiselberg 2015).

Le modéleur qui cherche à estimer les renouvellements d'air via la simulation thermique dynamique (STD) peut souhaiter quantifier l'incertitude sur le résultat (analyse d'incertitude) et la contribution de tel ou tel paramètre sur cette incertitude (analyse de sensibilité). La littérature présente des résultats variables en fonction du cas étudié, du choix des paramètres d'entrée, de leur plage de variation, et des sorties analysées. Dans le cas d'un bâtiment résidentiel, (Monari et Strachan 2017) ont observé que ce sont les variations des C_p qui permettent la meilleure adéquation entre les résultats du réseau aéraulique et les mesures expérimentales. Au contraire, l'analyse d'incertitude réalisée dans (Hyun, Park, et Augenbroe 2008) a montré un impact négligeable de l'incertitude des C_p par rapport aux autres paramètres tels que les C_d et profils de vent. (Belleri et al. 2013) précisent que les C_p deviennent prévalant sur les C_d pour des vitesses de vent élevées.

Dans cet article, nous proposons de contribuer à la littérature existante par la réalisation d'une analyse numérique d'incertitude et de sensibilité de la sortie dynamique de renouvellement d'air en STD en fonction des C_d et C_p . Comme nous souhaitons quantifier l'impact des paramètres, il convient d'utiliser une méthode globale et quantitative. La méthode de décomposition de la variance RBD-FAST (Goffart et Woloszyn 2021) a démontré sa capacité à estimer les indices de sensibilités de Sobol de premier ordre S_1 , pour un nombre de simulation et un temps de calcul raisonnable. Par exemple, en énergétique du bâtiment, elle a été principalement appliquée à l'analyse de la sensibilité des température dynamique (Gondian et al. 2018). A notre connaissance, aucune étude ne propose l'analyse des indices de Sobol pour la sortie en renouvellement d'air dynamique.

L'originalité de cet article réside en l'exploration du potentiel de la méthode d'analyse de sensibilité RBD-FAST sur l'étude de la sortie dynamique de renouvellement d'air. Des dépouillements spécifiques sont présentés afin de mettre en évidence l'impact du vent.

2. METHODOLOGIE

2.1. MODELE STD DE LA MAISON INCAS

La maison INCAS (Figure 1) est un bâtiment résidentiel en R+1 construit en 2010 selon des standards passifs. Elle est située sur la plateforme expérimentale de l'INES au Bourget du Lac, France. Elle a été modélisée sur le logiciel EnergyPlus (Crawley et al. 2001). Le réseau aéraulique comporte un nœud par pièce. Les nœuds étant connectés entre eux et avec l'extérieur via diverses interfaces (Figure 1). Le bilan de flux thermique et l'équilibre en débit/pression sont calculés à chaque pas de temps de simulation, fixé à 5 minutes. Aux interfaces fenêtres « grandes ouvertures », l'équilibre dépend du C_d : $Q_v = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$, avec Q_v le débit [m^3/h], ΔP [Pa] le différentiel de pression, A [m^2] la section de passage et ρ [kg/m^3] la densité de l'air. L'augmentation de pression liée au vent sur un nœud dépend du C_p : $P = \frac{1}{2} \rho C_p V^2$, avec V [m/s] la vitesse du vent (Kolokotroni et Heiselberg 2015). La valeur de C_p est déterminée par une loi empirique, en fonction de la direction d'incidence du vent.

Des valeurs nominales sont renseignées pour les paramètres du bâtiment (propriété thermiques des matériaux, des vitrages, des volets, ponts thermiques, étanchéité à l'air), et de son environnement (albédo et températures du sol, faible densité urbaine).

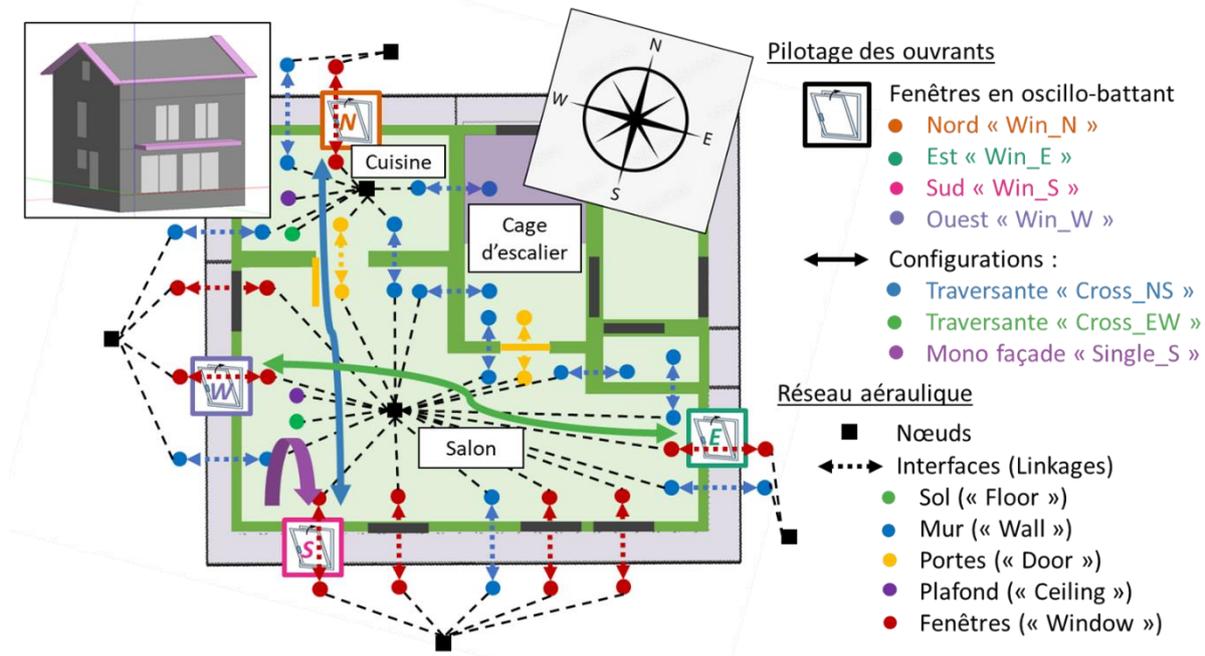


Figure 1 : STD : Configurations d'ouvrant et modèle aéraulique

2.2. CONDITIONS LIMITES DE LA STD

Les conditions limites de la STD reprennent les scénarios réalisés dans une campagne expérimentale avec résultats en accès libre (Schreck et al. 2024), sur la semaine estivale du 22/06/2023 au 29/06/2023. Les conditions limites météorologiques (températures, humidités, irradiances solaires, vitesses et directions) sont mesurées localement à environ 50 m de la maison et à 10 m de hauteur. L'étude se concentre sur les pièces du salon (25 m^2 , 68 m^3) et de la cuisine (7 m^2 , 20 m^3) situées au RDC. Quatre fenêtres, une sur chaque façade (Win_N [170 cm × h100 cm], Win_S [1100 cm × h210 cm], Win_E [170 cm × h100 cm], Win_W [1100 cm × h210 cm]) sont ouvrables en mode oscillo-battant (débattement 15 cm). Trois configurations d'ouvertures sont simulées : deux configurations traversantes dans les axes nord-sud (Cross_NS) et est-ouest (Cross_EW), la troisième configuration est mono façade avec uniquement ouverture de la fenêtre sud (Single_S). Le scénario d'ouverture des fenêtres est choisi de manière à être représentatif d'une stratégie de surventilation nocturne appliquée au confort estival. Les positions des portes sont constantes : seule la porte entre le salon et la cuisine est ouverte. La VMC double flux de la maison est simulée avec un débit constant. La valeur du débit est imposée et n'intervient pas dans le bilan de masse du réseau aéraulique.

2.3. PARAMETRES DE L'ANALYSE DE SENSIBILITE

Cinq paramètres continus ont été retenus (Tableau 1). Les distributions représentent l'incertitude qu'aurait le modelleur au moment de paramétrer le modèle. Elles suivent donc une loi normale centrée sur une valeur nominale μ et d'écart type σ de manière à ce que 95% des tirages soient compris dans la plage d'incertitude désirée. Les valeurs nominales des Cd aux ouvertures en oscillo-battant ont été

estimées à partir de lois empiriques de pertes de charge. Leurs incertitudes de +/- 50% sont conformes à celles relevées dans la littérature (Belleri et al. 2013). La valeur nominale du renouvellement d'air lié à la VMC (ACR_MV_in) est fixée à $0,25 \text{ h}^{-1}$ (Nazaroff 2021). L'incertitude de +/- 20% est en cohérence avec la littérature (Bouvier, Bontemps, et Mora 2019).

L'espace des paramètres d'entrées est échantillonné en 1000 éléments avec l'algorithme Latin Hypercube Sampling. Par rapport à l'algorithme Monte Carlo, il produit une meilleure couverture de l'espace des paramètres pour un nombre d'échantillons donnés. La convergence du calcul des indices de Sobol sur les 1000 tirages a été vérifiée.

Pour analyser l'incertitude sur les valeurs de C_p , considérer un paramètre continu par direction du vent et par ouvrant (Monari et Strachan 2017) est réducteur en nombre de paramètres pour une analyse globale. Nous comparons, via un paramètre catégoriel (C_p), deux corrélations parmi les plus répandues : celles de Swami Chandra (Swami et Chandra 1988) et Liddament (Liddament 1986). Cependant, les paramètres catégoriels n'étant pas supportés par la méthode RBD-FAST, leur impact sera quantifié via la réalisation de deux versions de calculs de sensibilité différentes, une pour chaque catégorie (« Cp_SC » ou « Cp_L ») (Tableau 1).

Type de paramètres	Nomenclature	Valeur nominale	Unité	Incertitude	Distribution $N(\mu, \sigma)$
Continu	Cd_Win_S	0,16	[/]	+/- 50%	$N(0,16 ; 0,04)$
	Cd_Win_N	0,23	[/]	+/- 50%	$N(0,23 ; 0,0575)$
	Cd_Win_E	0,23	[/]	+/- 50%	$N(0,23 ; 0,0575)$
	Cd_Win_W	0,16	[/]	+/- 50%	$N(0,16 ; 0,04)$
	ACR_MV_in	0,25	$[\text{h}^{-1}]$	+/- 20%	$N(0,25 ; 0,025)$
Catégoriel	C_p	« Cp_SC »	[/]	/	[« Cp_SC » ; « Cp_L »]

Tableau 1 : Paramètres de l'étude de sensibilité et lois de distribution associées

Enfin, la variable de sortie (ACR_Total [h^{-1}]) est le renouvellement d'air total entrant dans le volume délimité par le salon et la cuisine ($V [\text{m}^3]$). Il est recalculé à partir de la somme des débits entrants ($Qm_in [\text{kg/s}]$) à travers toutes les interfaces du réseau aéralique entre les nœuds [salon, cuisine] et les nœuds adjacents ou extérieurs (Figure 1). Les débits massiques sont adimensionnés en utilisant la densité de l'air $\rho [\text{kg/m}^3]$. A noter que le renouvellement d'air de la VMC (ACR_MV_in) est additionné. Le calcul est résumé dans la formule : $ACR_Total = \frac{3600}{\rho V} \sum_V Qm_in + ACR_MV_in$.

3. RESULTATS

3.1. ANALYSE D'INCERTITUDE ET DE SENSIBILITE

La Figure 2 illustre les séries temporelles des conditions en vent, de la sortie ACR_Total sur les 1000 simulations, ainsi que les indices de Sobol (S1) et variances partielles (V1) associées aux paramètres continus. L'incertitude sur le ACR_Total propagée à travers les 1000 simulations est non négligeable par rapport aux valeurs moyennes. L'incertitude maximale (+/- $5,6 \text{ h}^{-1}$, soit +/- 46% de la valeur moyenne) est atteinte en configuration traversante. On vérifie que l'incertitude en configuration fermée est quasi constante autour de +/- $0,05 \text{ h}^{-1}$, en cohérence avec la valeur d'incertitude attribuée au paramètre d'entrée ACR_MV_in.

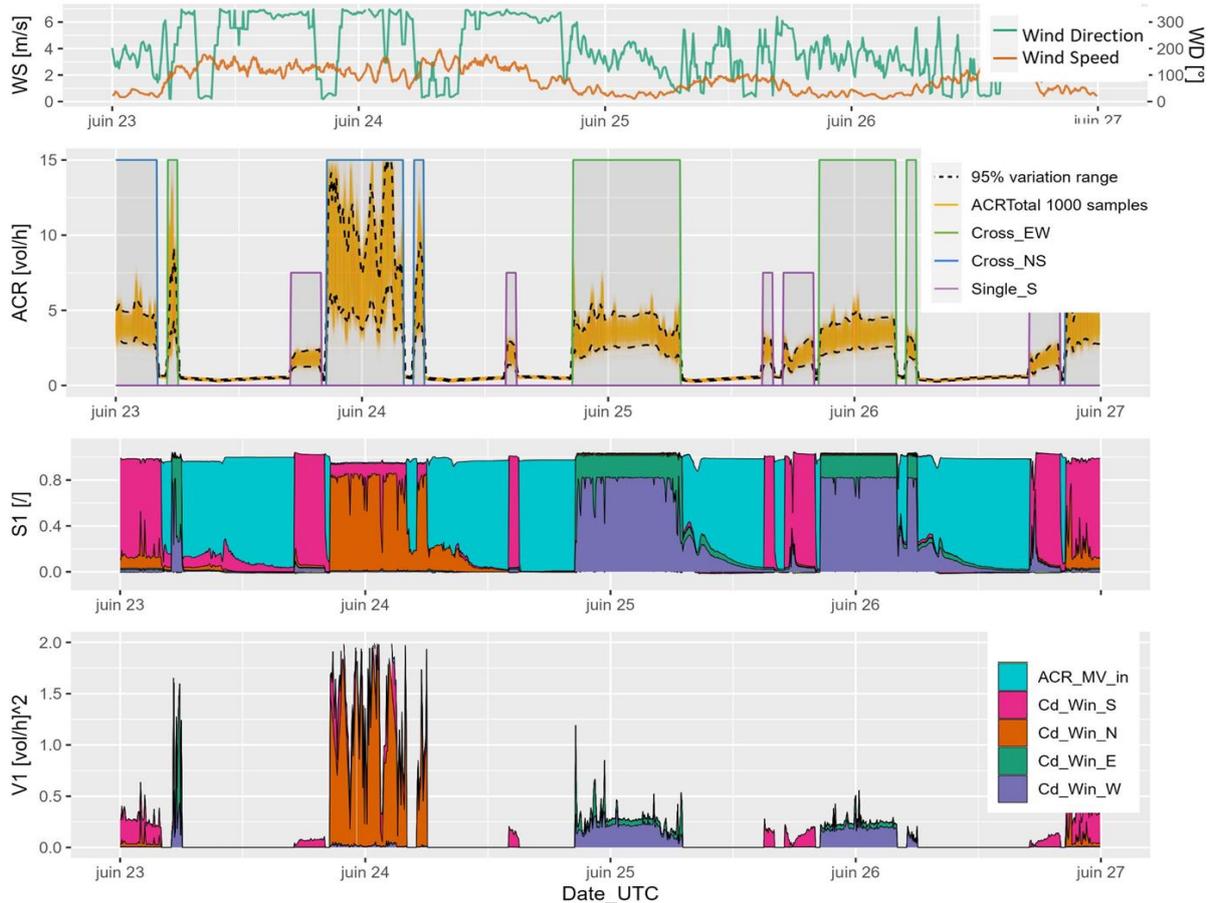


Figure 2 : Conditions de vent, distribution du renouvellement d'air ACR_{Total} sur les 1000 simulations, indices de Sobol ($S1$), et variances partielles ($V1$). Version de calcul avec « Cp_{SC} ». La période 23/06/2023 – 27/06/2023 comprend la réalisation des deux configurations traversantes et la configuration mono façade.

L'étude des indices de Sobol permet d'aller plus loin afin de pouvoir identifier et quantifier quels paramètres continus sont responsables de l'incertitude en sortie. La somme $S1$ est proche de 1, indiquant qu'il n'y a pas d'interaction entre les paramètres. En configurations ouvertes, ce sont principalement les incertitudes sur les Cd des fenêtres ouvertes qui sont responsables de la variabilité du renouvellement d'air. En configuration traversante, la répartition de la responsabilité entre les deux ouvrants est variable : pendant l'ouverture « $Cross_{NS}$ » du 24/06, le Cd de la fenêtre Win_N explique plus de 80% de la variabilité de sortie ($S1_{Cd_{Win_N}} > 0,8$), alors que pour la même configuration les 23/06 et 27/06, c'est le Cd de la fenêtre Win_S qui représente plus de 80% de la variabilité ($S1_{Cd_{Win_S}} > 0,8$). De plus, les valeurs et fluctuations des variances partielles varient au sein d'une même configuration. Toutes ces observations suggèrent l'impact de la vitesse et de la direction du vent.

Enfin, il est intéressant de remarquer qu'il peut y avoir une persistance des contributions des paramètres lors des changement d'état des fenêtres. Par exemple, après la fermeture du 25/06, jusqu'à 40% de la variabilité de l' ACR_{Total} peut être attribuée au Cd_{Win_W} . Nous faisons l'hypothèse que ceci est lié à l'inertie thermique de l'air et des murs (Gondian et al. 2018) (Goffart and Woloszyn, 2021). En configuration fermée, les infiltrations dépendent de la température intérieure, qui elle-même dépend de l' ACR_{Total} réalisé à un instant précédent, lorsque la fenêtre était ouverte, et donc de la valeur du Cd associée.

3.2. IMPACT DE LA VITESSE ET DIRECTION DU VENT

La Figure 3 propose une illustration originale de la distribution des indices de Sobol en fonction de la direction du vent. La représentation s'inspire d'une rose des vents, la différence étant que les vitesses de vent sont remplacées par les indices de Sobol du paramètre choisi. Cela permet par exemple d'observer que, dans la configuration « Cross_NS », l'indice de Sobol du paramètre Cd_Win_N est supérieur à 0,8 uniquement lorsque le vent est du nord. Néanmoins, dans la configuration, « Cross_EW », cette polarisation s'observe de manière moins nette : l'indice de Sobol du paramètre Cd_Win_E ne dépasse que rarement 0.6. Nous faisons l'hypothèse que cela s'explique par le fait que la section de passage de la fenêtre Win_E est plus petite que la fenêtre Win_W. L'impact de l'incertitude sur son Cd a donc un impact plus faible sur la résistance aéroulque totale de la fenêtre.

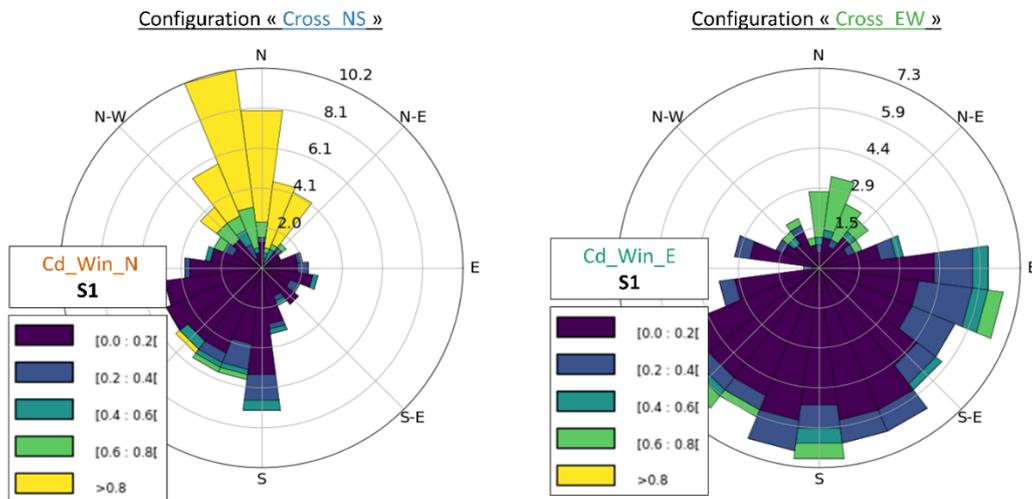


Figure 3 : Indices de Sobol en fonction de la direction du vent

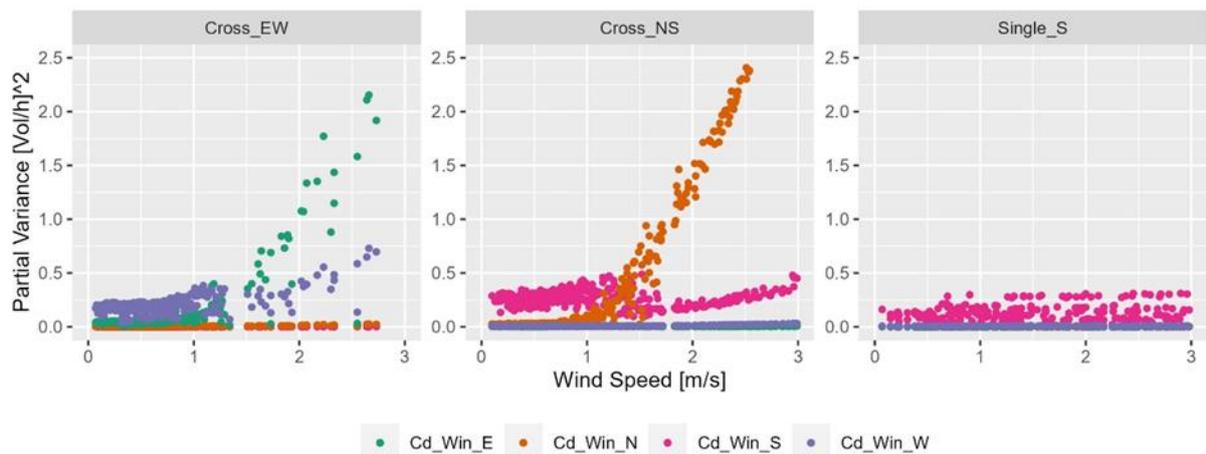


Figure 4 : Variances partielles associées aux Cd aux quatre fenêtres, pour chaque configuration, en fonction du vent

Si l'on souhaite maintenant étudier l'effet de la vitesse du vent, plutôt que d'observer les indices de Sobol, il est plus pertinent d'observer la variabilité du ACR_Total à travers ses variances partielles. La Figure 4 présente les valeurs de variances partielles associées aux Cd des quatre fenêtres, en fonction de

la configuration d'ouvrant et de la vitesse du vent. Dans les deux configurations traversantes, on observe une relation en loi puissance : plus la vitesse du vent est importante, plus la variabilité de l'ACR_Total lié à l'incertitude de paramétrisation d'un Cd sera forte. Au contraire, dans la configuration mono façade, la variance partielle du ACR_Total ne semble pas dépendre de la vitesse du vent, suggérant une prévalence des effets de températures par rapport aux effets de vent. Ces observations sont cohérentes avec les relations analytiques en ventilation traversante et mono façade résumées dans (Kolokotroni et Heiselberg 2015).

3.3. IMPACT DU CHOIX DE LA CORRELATION DE Cp

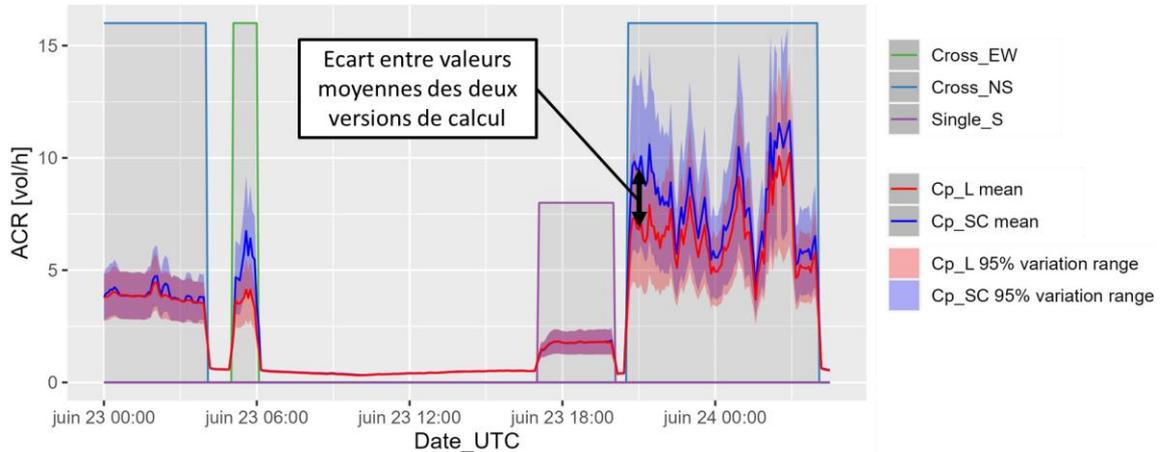


Figure 5 : Distributions du renouvellement d'air ACR_Total sur les 1000 simulations, pour les deux versions de calcul « Cp_SC » et « Cp_L »

La Figure 5 compare les résultats en ACR_Total entre les deux versions de calcul utilisant respectivement les corrélations de Swami Chandra et de Liddament. L'impact du choix de la corrélation peut être non négligeable pour les configurations dominées par les effets de vent : l'écart maximal entre les valeurs moyennes des 1000 échantillons sur les deux versions de calcul est de $4,2 h^{-1}$.

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'originalité de ce travail a été d'explorer le potentiel de la méthode d'analyse de sensibilité RBD-FAST appliqué à l'étude dynamique du taux de renouvellement d'air en ventilation naturelle. Les résultats de 1000 simulations STD ont montré que, dans notre cas d'étude, les incertitudes sur les coefficients de décharge aux ouvrants (Cd) engendrent jusqu'à $\pm 5,6 h^{-1}$ ($\pm 46\%$) d'incertitudes sur le renouvellement d'air. L'incertitude liée au choix d'une corrélation de coefficients de pressions (Cp) (écart maximal de $4,2 h^{-1}$ en configuration traversante) s'est avérée être du même ordre de grandeur.

Les indicateurs quantitatifs (Sobol et variances partielles) fournissent de riches informations à condition d'être judicieusement exploités. En complément de l'analyse des séries temporelles, nous avons proposé des dépouillements spécifiques mettant en évidence le rôle des directions et vitesses du vent sur la variance du renouvellement d'air, en fonction de type de configuration. Les tendances observées dans les résultats sont cohérentes avec les relations analytiques en ventilation traversante et mono façade résumées dans (Kolokotroni et Heiselberg 2015).

Il faut préciser que les résultats chiffrés sont propres à notre cas d'étude (géométrie et environnement du bâtiment, conditions météo, configurations d'ouvrants, degrés d'ouverture des fenêtres). Néanmoins, pour le dimensionnement d'ouvrants en ventilation naturelle avec effets du vent, nous suggérons au modéleur utilisant l'approche déterministe d'appliquer une incertitude de +/- 50% sur le résultat. S'il a besoin de résultats d'incertitudes consolidés, la méthode présentée (analyse de sensibilité sur les Cd et test de différentes corrélations de Cp) pourra être adaptée au cas d'étude en question.

Enfin, de futurs travaux pourraient explorer l'analyse de nouvelles sorties dynamiques. Par exemple, dans le domaine de la qualité de l'air intérieur, à travers l'analyse de la sortie dynamique en concentration de CO₂ (Breesch et Janssens 2005).

5. BIBLIOGRAPHIE

- Belleri, Annamaria, Spencer Dutton, Ulrich Filippi Oberegger, et Roberto Lollini. 2013. « A Sensitivity Analysis Of Natural Ventilation Design Parameters For Non Residential Buildings ». In *Proceedings of BS 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*. <https://doi.org/10.26868/25222708.2013.1418>.
- Bouvier, Jean-Louis, Stéphanie Bontemps, et Laurent Mora. 2019. « Uncertainty and sensitivity analyses applied to a dynamic simulation of the carbon dioxide concentration in a detached house ». *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 10 (mars): 47-65. <https://doi.org/10.1007/s40095-018-0291-7>.
- Breesch, Hilde, et Arnold Janssens. 2005. « Building simulation to predict the performances of natural night ventilation: Uncertainty and sensitivity analysis ». In *IBPSA 2005 - International Building Performance Simulation Association 2005*.
- Crawley, Drury B., Linda K. Lawrie, Frederick C. Winkelmann, W. F. Buhl, Y. Joe Huang, Curtis O. Pedersen, Richard K. Strand, et al. 2001. « EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program ». *Energy and Buildings*, Special Issue: BUILDING SIMULATION'99, 33 (4): 319-31. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6).
- Goffart, Jeanne, et Monika Woloszyn. 2021. « EASI RBD-FAST: An Efficient Method of Global Sensitivity Analysis for Present and Future Challenges in Building Performance Simulation ». *Journal of Building Engineering* 43 (novembre): 103129. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103129>.
- Gondian, Léa, Jeanne Goffart, Monika Woloszyn, Etienne Wurtz, Catherine Buhé, et Philippe Maréchal. 2018. « Évaluation de l'influence des occupants sur le confort estival: utilisation des analyses d'incertitude et de sensibilité ». In , 9.
- Hyun, SH, CS Park, et GLM Augenbroe. 2008. « Analysis of Uncertainty in Natural Ventilation Predictions of High-Rise Apartment Buildings ». *Building Services Engineering Research and Technology* 29 (4): 311-26. <https://doi.org/10.1177/0143624408092424>.
- Kolokotroni, Maria, et Per Heiselberg. 2015. « Ventilative Cooling - State Of The Art Review ». Energy in Buildings and Communities Programme.
- Liddament, Martin W. 1986. *Air Infiltration and Ventilation Centre Air Infiltration Calculation Techniques: An Applications Guide / Martin W. Liddament*. Document AIC-AG 86-1. Bracknell, Berkshire: Air Infiltration and Ventilation Centre.
- Monari, F., et P. Strachan. 2017. « Characterization of an Airflow Network Model by Sensitivity Analysis: Parameter Screening, Fixing, Prioritizing and Mapping ». *Journal of Building Performance Simulation* 10 (1): 17-36. <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1110621>.
- Nazaroff, William W. 2021. « Residential air-change rates: A critical review ». *Indoor Air*. <https://doi.org/10.1111/ina.12785>.
- Schreck, Cédric, Simon Rouchier, Aurélie Fouquier, François Machefert, et Etienne Wurtz. 2024. « IOB_TestHouse_Ventilation_WindowOpenings_MetabolicCO2 ». Mendeley Data. 8 février 2024. <https://data.mendeley.com/datasets/7bv6wyvzjg/1>.
- Swami, M V, et S Chandra. 1988. « Correlations for Pressure Distribution on Buildings and Calculation of Natural-Ventilation Airflow ».