



**HAL**  
open science

# Réduction des incertitudes de modélisation de ventilation naturelle et prédiction du confort en espace semi-ouvert

Édouard Walther, Raphaël Barry

► **To cite this version:**

Édouard Walther, Raphaël Barry. Réduction des incertitudes de modélisation de ventilation naturelle et prédiction du confort en espace semi-ouvert. Conférence IBPSA France, May 2016, Champs-sur-Marne, France. hal-01321168

**HAL Id: hal-01321168**

**<https://inria.hal.science/hal-01321168>**

Submitted on 25 May 2016

**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.

## Réduction des incertitudes de modélisation de ventilation naturelle et prédiction du confort en espace semi-ouvert

Édouard Walther\*<sup>1,2</sup>, Raphaël Barry<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AREP

16, avenue d'Ivry, 75013 Paris,

<sup>2</sup>LMT - ENS de Cachan

61 avenue du Président Wilson, 94230 Cachan

\*[edouard.walther@arep.fr](mailto:edouard.walther@arep.fr)

---

*RÉSUMÉ. L'évaluation du confort dans les bâtiments semi-ouverts à usage transitoire est délicate et nécessite la simulation fine des mouvements d'air et rayonnements solaires incidents. Ce travail présente en premier lieu une méthode permettant de calculer avec moins d'incertitudes les débits de ventilation naturelle par un couplage aéraulique urbain puis une estimation horaire des vitesses d'air intérieur. Ces résultats alimentent un calcul annuel de confort à partir d'un indicateur adapté à l'usage transitoire et modifié pour intégrer les effets du vent sur la vêtue. Une ouverture traitant de l'influence de l'histoire métabolique sur le confort clôt l'étude.*

*MOTS-CLÉS : ventilation naturelle, Out\_SET\*, confort, aéraulique urbaine.*

---

*ABSTRACT. Semi-outdoor spaces with transient usage demand a particular refinement in the level of detail required for the estimation of comfort. The present work first exposes a method to reduce uncertainties in building natural ventilation using urban wind simulation. The hourly indoor air velocities are also estimated with this method and feed the yearly comfort calculation. The transient comfort index Out\_SET\* including modifications related to the effect of wind on clothing thermal and evaporative insulation is used as a reference for thermal perception. An opening treating of the influence of the metabolism's history on comfort perception is proposed as a conclusion.*

*KEYWORDS: natural ventilation, Out\_SET\*, comfort, urban wind*

---

### 1. INTRODUCTION

Si le renouvellement d'air impacte les consommations d'énergie, il influe également sur le confort du fait des vitesses d'air qu'il induit. En simulation thermique dynamique, la modélisation de la ventilation naturelle est très simplifiée par rapport à la réalité et peut être améliorée par le recours aux outils de simulation aéraulique. L'occupation transitoire des espaces change également la façon d'estimer le confort : l'inertie importante des mécanismes de thermorégulation du corps humain (Höppe, 2002) rend inadaptées les approches classiques (Fanger, 1970) de calcul du confort.

Dans un premier temps, la réduction des incertitudes sur la détermination des débits d'air par la simulation de l'aéraulique urbaine est présentée. On pose ensuite les bases de l'indicateur transitoire Out\_SET\* (Pickup & de Dear, 2007) qui permettra d'estimer le confort d'un cas d'application, espace semi-ouvert où vitesse d'air induite par ventilation naturelle et apports solaires directs sont importants.

## 2. MODELISATION DE LA VENTILATION NATURELLE

Dans cette section, on présente la modélisation classiquement utilisée pour le calcul des débits de ventilation naturelle en simulation thermique dynamique, puis une alternative avec un recours à la simulation aérodynamique urbaine pour éliminer une partie des paramètres incertains de modélisation. Le cas d'étude est un projet de hall de gare, largement ouvert et à l'enveloppe transparente.

### 2.1. VENTILATION NATURELLE EN SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE

Les logiciels courants de STD modélisent la ventilation naturelle à partir de plusieurs paramètres dont les valeurs sont calculées de manière très approchée. Le débit de tirage lié au vent entre deux ouvrants  $a$  et  $b$  à une hauteur  $z$  est ainsi calculé selon la formule suivante (le débit est positif s'il entre dans le volume, négatif sinon) :

$$Q_v = \pm S \times v(z) \times \sqrt{|C_{pa} - C_{pb}|} \quad (1)$$

La surface équivalente  $S$  est pondérée des coefficients de décharge de sorte que :

$$\frac{1}{S^2} = \frac{1}{(C_{da}S_a)^2} + \frac{1}{(C_{db}S_b)^2} \quad (2)$$

La vitesse au niveau de l'ouvrant vaut

$$v(z) = v_{ref} \times k_0 \times \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3)$$

- Le coefficient de pression  $C_{pa}$ ,  $C_{pb}$  sur la façade  $a$  ou  $b$  est généralement estimé en fonction de l'angle d'incidence du vent à partir de corrélations valables pour des géométries rudimentaires de grande ou de petite taille (Swami & Chandra, 1988).
- Les standards, notamment (ASHRAE, 1997) et plusieurs logiciels de calcul de ventilation naturelle (CONTAM, IES-VE MacroFlo, EnergyPlus) définissent  $C_d$  comme appartenant à la plage 0.60-0.65. Cependant, les travaux de recherche bibliographique en préambule de la thèse de (Regard, 2000) et ceux de (Salliou, 2011) ont montré que la plage de variation s'étend de  $C_d = 0.1$  à 2, influant donc de 10% à 200% sur la valeur du débit à travers l'ouvrant.
- La vitesse de référence  $v_{ref}$  est prise à la station météorologique la plus proche et n'inclut pas les effets de transition de rugosité, des topographies marquées, des obstacles proches.
- $k_0$  et  $z_0$  sont respectivement la rugosité du site, comprise entre 0,14 et 0,25 et la longueur de rugosité, comprise entre 0.0005 et 2.00m, selon que le site est très ouvert (mer, champ de neige, désert sablonneux) ou très rugueux (centre des mégapoles, forêt tropicale)

### 2.2. REDUCTION DES INCERTITUDES SUR LE CALCUL DES DEBITS D'AIR

La présente étude propose une réduction du nombre de paramètres incertains au moyen d'un logiciel commercial d'aérodynamique urbaine. Celui-ci résout les équations de Reynolds moyennées ainsi que la conservation de la masse (RANS) moyennée avec une modélisation de la turbulence en  $k - \epsilon$ . On notera que seul l'effet de pression du vent est considéré par cet outil (pour prendre en compte le tirage thermique on pourra mettre en place une condition sur le nombre de Froude dans le calcul thermique dynamique). Le logiciel permet de calculer explicitement le  $C_p$  sur la façade en fonction de la rose des vents annuelle et de l'environnement urbain environnant, réduisant ainsi l'incertitude sur la valeur des coefficients de pression, qui dépendent directement du champ des vitesses sur l'ouvrage.

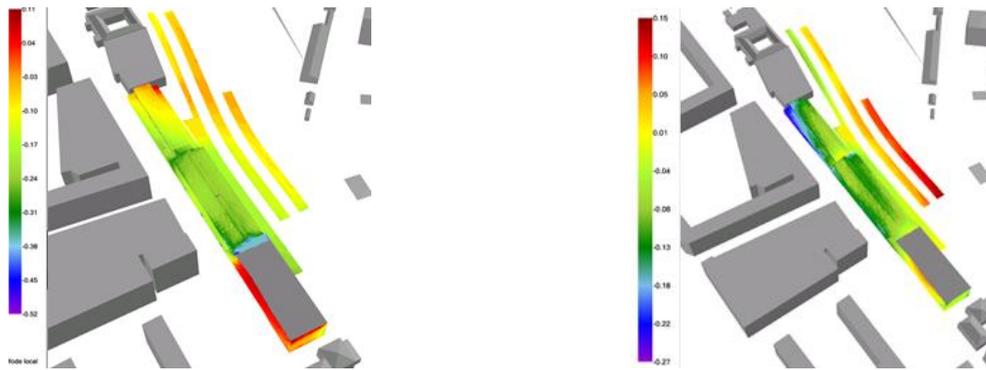


Figure 1 : Coefficients de pression sur l'enveloppe de la gare étudiée pour des directions de vent incident Sud (gauche) et Ouest (droite)

À partir de la distribution des coefficients de pression et d'un fichier météorologique, il est possible, en émettant des hypothèses sur la position des ouvrants, leur surface, leur coefficient de débit et leur scénario d'ouverture dans l'année, de déterminer le taux de renouvellement d'air au cours du temps. On s'affranchit ainsi des autres coefficients présentés en 2.1, excepté  $C_d$  dont la valeur reste incertaine et nécessiterait une étude numérique ou en soufflerie pour chaque position de l'ouvrant. Si le doute subsiste quant à ce paramètre (pris ici à une valeur forfaitaire de  $C_d = 0.5$ ) les débits obtenus comportent moins d'incertitudes qu'avec l'approche « STD » du paragraphe précédent.

### 2.3. ETUDE DE SENSIBILITE AU MAILLAGE

Afin de vérifier l'indépendance des résultats obtenus par rapport à la taille du maillage, une étude de sensibilité a été menée. L'outil étant peu ouvert, l'alternative la plus judicieuse choisie a été d'observer, sur une surface d'intérêt, la moyenne de la valeur absolue de la différence entre la vitesse rafale en un point pour le maillage le plus fin ( $N = 916820$  mailles) et la vitesse rafale au point pour un maillage grossier ( $N/22$ ), moyen ( $N/7$ ) et fin ( $N/2$ ).

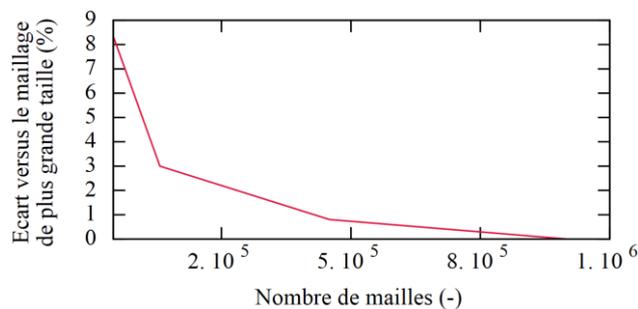


Figure 2 : Comportement de l'écart en fonction de la taille du maillage

On observe bien que cet écart moyen diminue au fur et à mesure que le maillage se raffine. L'erreur entre le maillage fin ( $N/2$ ) et le maillage très fin ( $N$ ) est de l'ordre du pourcent, ce qui a été jugé suffisant à ce stade du projet et permet de conserver un temps de calcul acceptable.

### 2.4. ESTIMATION DE LA VITESSE MOYENNE ANNUELLE HORAIRE

La vitesse d'air ayant une influence majeure sur le confort thermique, nous avons utilisé le même logiciel pour déterminer le champ des vitesses à l'intérieur de l'ouvrage. Plusieurs surfaces d'intérêts

ont été choisies pour visualiser les résultats. Chaque surface est discrétisée par des mailles de taille paramétrable (METEODYN), égales à  $25 \times 25$  cm dans notre cas. À titre d'exemple de résultat, la Figure 3 illustre le coefficient de vitesse rafale  $C_{v,rafale} = (v_{point} + \sqrt{k_{point}})/v_{ref}$  pour la direction incidente de vent de  $45^\circ$ . On observe que les vitesses d'air sont faibles (inférieures à 0,45m/s) et que des phénomènes marqués d'accélération se produisent au voisinage des ouvertures (encadrés).

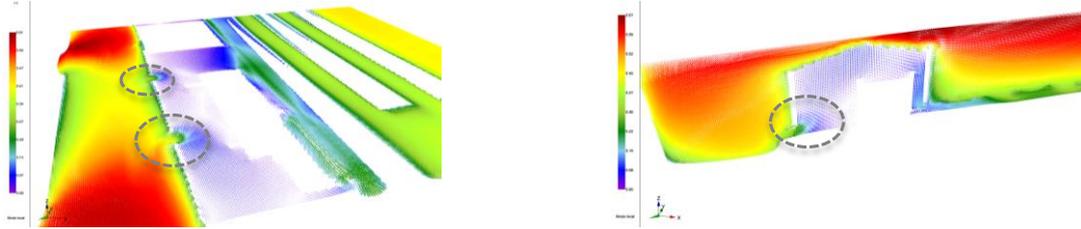


Figure 3 : Cas étudié – Vecteurs coefficients de vitesse rafale pour un vent incident de  $45^\circ$

À partir de ces résultats directionnels, l'outil procède à une agrégation des résultats en fonction d'un fichier météorologique donné et d'un scénario d'ouverture pour déterminer la vitesse moyenne annuelle en chaque point du domaine étudié, ce qui permettra d'alimenter le calcul du confort.

### 3. IMPACT DE L'ENVIRONNEMENT SUR L'INDICATEUR DE CONFORT EXTERIEUR

Cette partie traite en premier lieu de modélisation du confort dans les espaces semi-ouverts puis de l'influence de la vitesse d'air sur la résistance de vêture aux transferts de masse et de chaleur.

#### 3.1. LE CONFORT DANS LES ESPACES SEMI-EXTERIEURS

La littérature est fournie en ce qui concerne l'estimation du confort dans les ambiances intérieures, les modèles étant basés sur des équations-bilan (PMV de (Fanger, 1970), ou empiriques (modèle adaptatif de (G. S. Brager, 2000) pour la ventilation naturelle). Si ces indicateurs ont fait leurs preuves en intérieur, ils ne sont plus valables pour le cas extérieur ou semi-extérieur, notamment du fait des variations rapides de vitesse d'air, de température moyenne radiante et du caractère fortement transitoire de l'occupation de ces espaces, impliquant ainsi une simulation dynamique détaillée des transferts thermiques qui y ont lieu.

L'indicateur « *Standard Effective Temperature* » ou « SET\* » basé sur les travaux de (Nishi & Gagge, 1977) puis adapté pour l'extérieur par (Pickup & de Dear, 2007) est un indicateur de confort en régime transitoire construit à partir d'un modèle du métabolisme humain qui simule les réactions de thermorégulation (vasodilatation, sudation, tremblement) liées à l'environnement et l'activité du sujet. Le principe de l'indicateur SET\* est de convertir l'ambiance évaluée en une ambiance de référence (vitesse d'air faible, température moyenne radiante valant celle de l'air ambiant) qui provoquerait les mêmes réactions physiologiques que l'ambiance de départ : à savoir la même mouillure cutanée et la même température de peau, au terme d'un temps d'exposition donné (ainsi les notions de SET\* et Out\_SET\* sont inséparables de la durée). Cette approche est proposée comme une référence d'étude du confort par (ASHRAE, 2013), dont les valeurs tabulées ont permis la validation du code, de même que le calculateur en ligne de (de Dear) en ce qui concerne les grandeurs métaboliques.

L'incapacité des méthodes en régime permanent à prédire correctement le niveau de confort lors de variation des conditions climatiques peut être illustré par la Figure 4, qui représente l'évolution du métabolisme pour un sujet subitement exposé à un environnement estival, en partant des températures

corporelles de consigne. Dans ces conditions, on voit que les températures du noyau et de la peau mettent environ 30 min à atteindre une valeur proche de celles en régime permanent, tandis que la régulation de la mouillure cutanée procède d'une dynamique plus longue et requiert ~100 minutes pour se stabiliser. La détermination du confort en régime permanent conduit par conséquent à mésestimer l'inconfort lorsque les durées considérées sont infra-horaires, comme souligné en détail par l'étude de (Höppe, 2002).

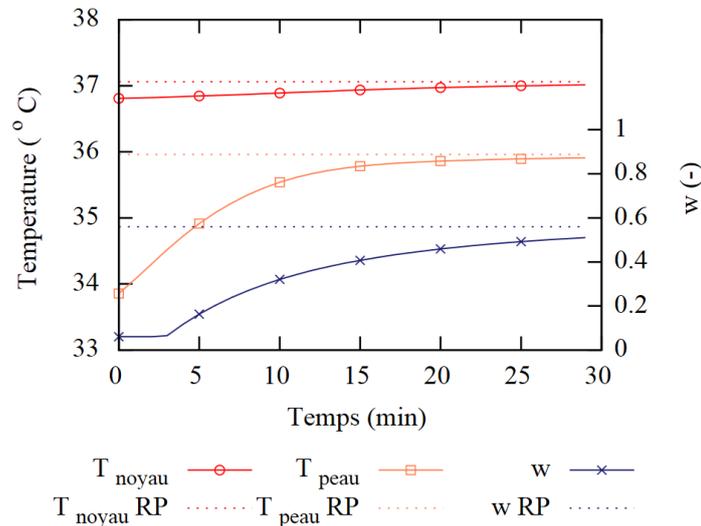


Figure 4 : Modèle Out\_SET\*, comparaison entre valeurs transitoires et permanentes des grandeurs métaboliques pour une exposition à des conditions estivales ( $T_{\text{air}}=25^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{mrt}}=50^{\circ}\text{C}$ ,  $v_{\text{air}}=0.15\text{ m/s}$ )

Ces considérations sont vraies pour le cas de la « réponse à un échelon » (tel que présenté Figure 4), mais le même raisonnement est valable pour des conditions ambiantes changeantes, notamment la vitesse d'air et le flux solaire, qui impactent de manière importante le bilan thermique du corps humain.

Si la SET\*/Out\_SET\* fournit un moyen d'évaluer les ambiances, elle ne fournit pas directement une échelle de confort. Les travaux de (Int Hout, 1990) ont cependant permis de concilier les approches PMV (Fanger, 1970) et SET\* (Gagge, Stolwijk, & Nishi, 1971) grâce au retour à un environnement de référence. On dispose ainsi d'un moyen d'évaluation du niveau de confort résultant de la SET\*/Out\_SET\* grâce à l'approche classique du vote thermique moyen « PMV », renommé en « PMV\* », que nous utilisons dans cette étude.

### 3.2. MODIFICATION DU MODELE OUT\_SET\*

Notre modèle a été affiné sur deux plans par rapport à l'original de (Pickup & de Dear, 2007) :

- La définition des apports solaires est plus précise au sens où l'on prend le flux incident direct reçu par un « mannequin » virtuel représentant un individu dans l'espace considéré et non une approximation de ce flux (le modèle original se base sur le flux global horizontal corrigé par un facteur de projection). La température moyenne radiante  $T_r$  est alors modifiée afin d'inclure le flux solaire.
- Un correctif des résistances aux transferts de masse et chaleur provenant des effets de la vitesse d'air a été inséré dans le modèle, d'après les travaux de (Holmér, Nilsson, Havenith,

& Parsons, 1999) et (Havenith, Holmér, Den Hartog, & Parsons, 1999) qui ont servi de base à la norme ISO 9920. L'importance de la vitesse d'air est détaillée dans le paragraphe qui suit.

### 3.3. INFLUENCE DE LA VITESSE D'AIR SUR LA ZONE DE CONFORT

L'influence du vent sur la position de la zone de confort est non-négligeable du fait de son impact sur les coefficients d'échange de chaleur et de masse ainsi que sur la diminution de l'isolation de la vêtue qu'elle entraîne. La Figure 5 montre la position sur le diagramme psychrométrique de la zone de confort (soit  $-0.5 < PMV^* < +0.5$ ) pour deux vitesses de vent. Lorsque la vitesse d'air augmente, la zone de confort se décale vers les températures élevées : la baisse de l'écart de température est compensée par une hausse des coefficients d'échange, maintenant stable le bilan thermique même à des températures plus élevées.

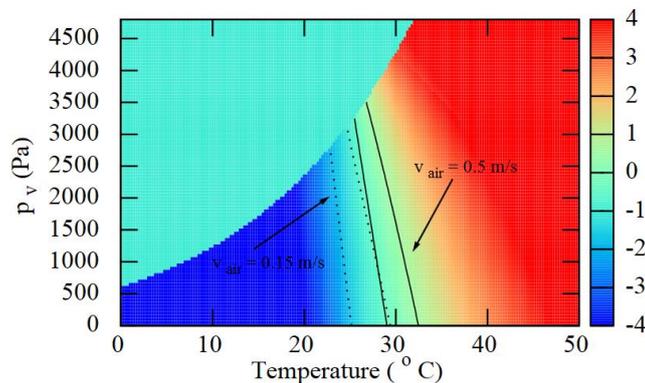


Figure 5 :  $PMV^*$  - Position de la zone de confort pour  $v_{air} = 0.15$  m/s (pointillés) et  $v_{air} = 0.5$  m/s (lignes continues). Exposition de 30 min, clo statique = 0.6, met = 1.

La Figure 6 représente, à vitesse d'air égale, la position de la zone de confort sur le diagramme psychrométrique avec et sans la modification des résistances de transfert évoquées au paragraphe précédent. La mise en œuvre de ce correctif entraîne un décalage de la zone de confort vers les températures plus élevées. En effet, la vêtue soumise à une vitesse d'air ou au mouvement est sujette aux infiltrations et éventuellement au « pompage », qui provoquent une réduction de ses caractéristiques isolantes par rapport au cas statique.

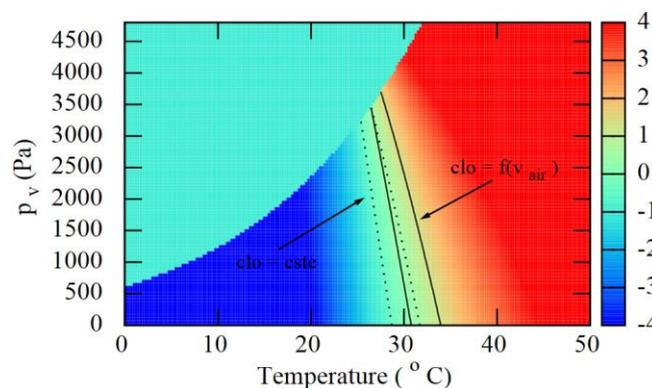


Figure 6 :  $PMV^*$  - Position de la zone de confort avec (ligne continue) et sans correction (pointillés) de l'isolation de vêtue. Exposition de 30 min, clo statique = 0.6, met = 1,  $v_{air} = 0.5$  m/s

La simulation étant annuelle, un modèle dynamique d'habillement est nécessaire pour moduler le niveau d'isolement de la vêtue de jour en jour. Nous nous sommes basés sur les travaux de

dépouillement statistique de (Schiavon & Lee, 2013) donnant un niveau d'habillement journalier en fonction de la température extérieure à 6h du matin.

#### 4. APPLICATION

On se propose d'étudier le confort d'été et d'hiver du bâtiment présenté section 2, non-conditionné et ayant une enveloppe entièrement transparente en polycarbonate ( $U=5.2 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ,  $g=0.81$ ). Les résultats de la section 2.4 alimentent la simulation thermique dynamique et le calcul du confort. En effet, le hall est soumis à des vitesses d'air supérieures à celles observées dans les bâtiments résidentiels et à un ensoleillement direct au travers de son enveloppe. On considère trois cas d'exposition pour le calcul du confort :

- Les propriétés de vêtue sont constantes par rapport au vent (« clo statique »)
- Les propriétés de vêtue sont fonction de la vitesse d'air (« clo dynamique » du paragraphe 3.2)
- Les sujets sont exposés aux conditions extérieures durant 20 minutes avant l'entrée dans le bâtiment, avec une activité de marche légère symbolisant leur trajet jusqu'à la gare.

Les résultats en termes de  $PMV^*$  d'été et d'hiver moyens ainsi que la moyenne des  $PMV^*$  d'inconfort (soit  $PMV^* < -0,5$  ou  $PMV^* > 0,5$ ) qui représente l'intensité de l'inconfort, sont présentés sur la Figure 7.

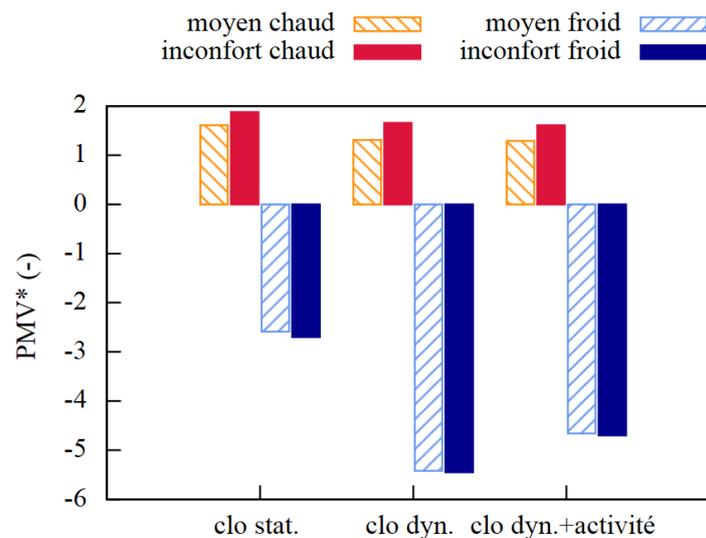


Figure 7 -  $PMV^*$  moyen et  $PMV^*$  moyen d'inconfort en fonction du modèle utilisé

On observe en premier lieu que l'espace est inconfortable, d'où le faible écart entre  $PMV^*$  moyen et  $PMV^*$  d'inconfort moyen. La prise en compte des effets du vent sur la vêtue influence très fortement le confort d'hiver et, dans une mesure moindre mais sensible, le confort d'été. L'inconfort diminue en été du fait de la réduction de la résistance de vêtue et augmente en hiver pour les mêmes raisons.

La comparaison du  $PMV^*$  des individus ayant une histoire métabolique différente, à savoir 20 minutes de marche en extérieur précédant l'arrivée en gare, montre des résultats meilleurs en confort d'hiver, du fait de l'augmentation du niveau d'activité générant plus de chaleur métabolique. En été la différence est minime mais le confort s'en trouve amélioré car la réponse métabolique de régulation de température est déclenchée avant l'arrivée en gare.

## 5. CONCLUSION

Cette étude expose en premier lieu une méthode connue permettant de réduire le nombre de paramètres incertains dans la détermination des débits résultants de la ventilation naturelle en utilisant les résultats d'une simulation aérodynamique urbaine. Les vitesses d'air obtenues par celle-ci participent ensuite à la prédiction fine du niveau de confort dans un bâtiment soumis à des mouvements d'air et à un ensoleillement direct importants, grâce à l'indicateur transitoire de confort extérieur et semi-extérieur Out\_SET\*. Le modèle a été modifié pour une meilleure prise en compte des effets du vent et des apports solaires. Les résultats montrent des différences importantes entre sensations de confort, selon que l'on corrige ou non les résistances de vapeur de vêture et thermique. L'histoire métabolique a également un effet non négligeable sur le ressenti du confort : des travaux ultérieurs sur le lien entre confort et niveau d'activité préalable du métabolisme suivront cette communication.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

- ASHRAE. (1997). Ventilation and Infiltration. Dans *HVAC Fundamentals Handbook* (pp. 492-519). Atlanta: ASHRAE Handbook Editor.
- ASHRAE. (2013). *Standard 55-Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
- de Dear, R. (s.d.). *Out\_SET\* online calculator*. Consulté le 02 2016, sur University of Sydney: <http://web.arch.usyd.edu.au/~rdeedear/>
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Mc Graw Hill.
- G. S. Brager, R. d. (2000). A Standard for Natural Ventilation. *ASHRAE Journal Volume 42* , n°10, 21-28.
- Gagge, A., Stolwijk, J., & Nishi, Y. (1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, (77)247-257.
- Havenith, G., Holmér, I., Den Hartog, E., & Parsons, K. (1999). Clothing Evaporative Heat Resistance - Proposal for Improved Representation in Standards and Models. *Ann. Occ. Hyg.*, (43-5):339-346.
- Holmér, I., Nilsson, H., Havenith, G., & Parsons, K. (1999). Clothing Convective Heat Exchange - Proposal for Improved Prediction in Standards and Models. *Annals of Occupational Hygiene*, (43)5-329-337.
- Höppe, J. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and Buildings*, 661-665.
- Int Hout, D. (1990). Thermal comfort calculations / A computer model. *ASHRAE Transactions*, (96)840-844.
- METEO DYN. (s.d.). *Fiche Technique UrbaWind*. Consulté le 02 15, 2016, sur <http://meteodyn.com/>: [http://meteodyn.com/wp-content/uploads/2012/02/Doc\\_technique\\_UrbaWind1.pdf](http://meteodyn.com/wp-content/uploads/2012/02/Doc_technique_UrbaWind1.pdf)
- Nishi, Y., & Gagge, A. (1977). Effective Temperature Scale Useful for Hypo- and Hyperbaric Environments. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 97-107.
- Pickup, J., & de Dear, R. (2007). An outdoor thermal comfort index (Out\_SET\*) - Part I - The model and its assumptions. Dans *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium*. (pp. 279-283). Geneva: WMO.
- Regard, M. (2000). *Contribution à l'étude des mouvements d'air dans le bâtiment à l'aide d'un code de champ*. Lyon: INSA.
- Salliou, J.-R. (2011). *Analyse de l'influence de paramètres géométriques et physiques sur le coefficient de décharge appliqué à la ventilation dans le bâtiment*. Nantes: Ecole Supérieure d'Architecture de Nantes.
- Schiavon, S., & Lee, K. (2013). Dynamic predictive clothing insulation models based on outdoor air and indoor operative temperatures. *Building and Environment*, (59):250-260.
- Swami, M., & Chandra, S. (1988). Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. *ASHRAE Transactions*, 243-266.