

Caractérisation expérimentale et numérique des performances énergétique d'un bâtiment tertiaire et industriel.

Remon LAPISA¹, Marc O. ABADIE¹, Emmanuel BOZONNET¹, Patrick SALAGNAC¹, Rémi PERRIN²

¹LaSIE (FRE-CNRS 3474)

Université de La Rochelle, La Rochelle, France

²SOPREMA

14 Rue de Saint-Nazaire-67025, Strasbourg Cedex 01, France

*(auteur correspondant : patrick.salagnac@univ-lr.fr)

Résumé - Afin de réduire la consommation énergétique des bâtiments en France, la réglementation thermique actuelle (RT2012) impose un renforcement de l'isolation thermique et une diminution de la perméabilité de l'enveloppe. Ainsi, la part de la ventilation dans la consommation énergétique des nouveaux bâtiments s'est considérablement accrue ces dernières années. Une meilleure stratégie de ventilation est donc maintenant nécessaire afin d'augmenter les performances énergétiques des bâtiments. En particulier, les bâtiments tertiaires et industriels présentent un fort potentiel d'amélioration de par leur consommation énergétique élevée et leurs modes de fonctionnement souvent propices à une utilisation couplée de systèmes de ventilation mécanique et naturelle. Cette étude a pour objectif d'évaluer la performance thermique d'un bâtiment tertiaire et industriel existant et de tester différentes stratégies de ventilation afin d'améliorer sa performance énergétique. En première partie de cet article, la géométrie et le fonctionnement du bâtiment étudié ainsi que le modèle numérique thermo-aéraulique élaboré sous l'environnement TRNSYS-CONTAM sont présentés. Dans une deuxième partie, les résultats de la simulation sont confrontés aux mesures effectuées dans le bâtiment réel. Enfin, plusieurs stratégies de ventilation sont évaluées. Les résultats montrent en particulier que le recours à la ventilation naturelle permet d'améliorer le confort thermique dans l'ensemble du bâtiment.

1. Introduction

Le secteur commercial est le principal consommateur d'énergie finale dans le secteur tertiaire en France et représente environ 20,9 % de la consommation totale [1]. Environ 50 % de cette dépense d'énergie est destinée à maintenir le confort thermique des occupants tout au long de l'année à travers les systèmes de chauffage et de climatisation [2]. La part de ces dernières étant strictement dépendante des conditions climatiques et des caractéristiques du bâtiment, il est évident que les problématiques de chauffage seront plus fréquentes dans le nord du pays et celles de surchauffe dans le sud. En France, l'enveloppe d'un bâtiment commercial ou industriel est souvent composée d'une structure métallique alliée à des matériaux de construction à faible coût. Afin de réduire la consommation énergétique, l'utilisation d'isolation thermique ainsi de matériaux imperméables sont les méthodes fréquemment utilisées pour compléter la structure de l'enveloppe. D'autre part, l'utilisation de techniques de rafraîchissement passif permet de réduire la consommation énergétique pendant la période d'été, éliminant parfois la nécessité du recours à un système de climatisation énergivore. L'exploitation de l'éclairage naturel est une solution additionnelle pour limiter les consommations énergétiques.

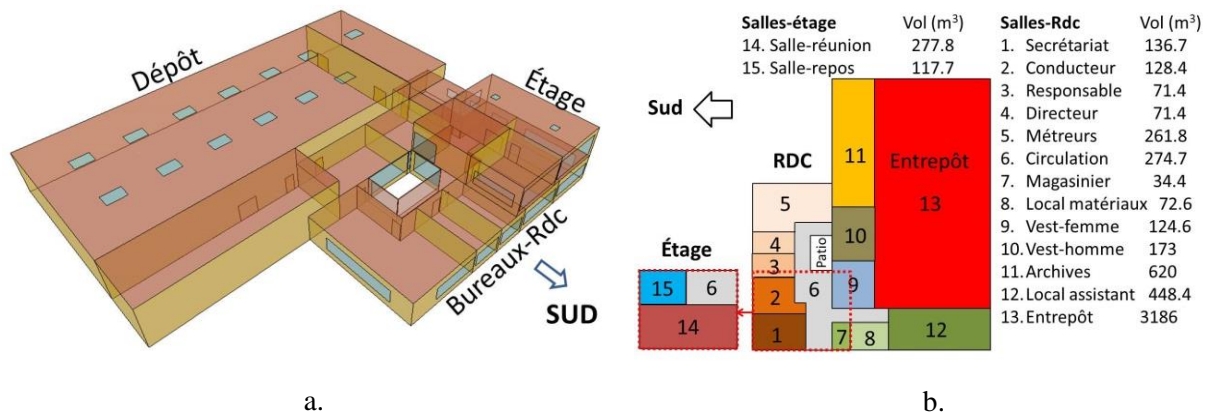
Pour des raisons de sécurité incendie, il est souvent constaté que la toiture de ce type de bâtiment est équipée de plusieurs lanterneaux. Ces ouvertures transparentes présentent des avantages également du point de vue énergétique. Il a été montré d'une part que la présence de lanterneaux pouvait potentiellement réduire de 40 % la consommation électrique induite par l'éclairage artificiel [3] et réduire la température intérieure en été d'environ 1°C [4]. L'utilisation des lanterneaux en tant qu'élément de contrôle d'une ventilation naturelle nocturne est maintenant une solution envisagée pour réduire la température des locaux ([5], [6]) et certaines études ([7], [8]) ont montré que la ventilation nocturne pouvait diminuer les températures de 2 à 4°C.

Cette étude vise à évaluer l'efficacité de la ventilation nocturne (mécanique et naturelle) afin de réduire l'inconfort thermique d'été d'un bâtiment commercial existant dans la région de climat tempéré. En première partie, les caractéristiques du bâtiment, le protocole expérimental de mesures et le modèle de simulation numérique sont présentées. Ensuite, les résultats de simulation et des mesures sont comparés pour s'assurer de la cohérence du modèle numérique. En dernière partie, nous évaluons certaines stratégies de ventilation nocturne pour réduire l'inconfort thermique d'été.

2. Présentation et modélisation du bâtiment

Un bâtiment commercial et industriel réel présentant un grand volume et une faible hauteur situé à Poitiers (France) a été considéré (Figure 1) pour la présente étude. La structure principale de ce bâtiment est en charpente métallique bien isolée avec 15 zones thermiques qui peuvent être regroupées selon deux sous-ensembles : la zone de bureaux (776,4 m²) d'une hauteur de 3 m et la zone de l'entrepôt (637,2 m²) d'une hauteur de 5 m. Les murs extérieurs se composent de 2 mm de paroi en acier, 250 mm de laine de roche et 13 mm de plâtre. Les toitures sont constituées de 230 mm rock acier et de 2 mm de paroi en acier. Les parois entre les bureaux et l'entrepôt sont composées de deux couches de 2 mm d'acier isolées par 140 mm de laine de roche. Les portes intérieures sont en bois lourd d'épaisseur 40 mm. Les cloisons des bureaux sont composées de deux plaques de 13 mm de plâtre séparées par une lame d'air de 7 mm. Le plancher courant entre le rez-de-chaussée et l'étage se compose de 13 mm de plâtre, 120 mm de plancher collaborant et de 12 mm de carrelage. Le plancher bas est en béton d'épaisseur 160 mm posé sur un sol argileux. Le mobilier et fournitures qui sont

constitués de matériaux en bois, métal, plastique et papier représente environ 1 à 5 % du total volume des bureaux. Dans l'entrepôt, les marchandises occupent environ 30 % du volume.



La toiture terrasse de l'entrepôt comprend 12 lanternes d'une surface totale de 33,6 m² (soit 5,3 % de la surface de toiture). On remarquera que les zones de bureaux sur les deux niveaux (plus forte présence des occupants) sont orientées au sud pour bénéficier des apports solaires gratuits. Les locaux secondaires (vestiaires femme et homme, archives, magasinier et local de l'assistant) sont quant à eux positionnés au milieu de bâtiment. Le RDC et l'étage sont connectés par un espace de circulation et un escalier (zone n°6). La salle de réunion et la salle de repos sont situées à l'étage et comporte un taux important de surface vitrée. Deux lanternes d'une surface totale de 1 m² sont présents en toiture de la salle de réunion. Les caractéristiques de chaque zone thermique sont présentées dans le Tableau 1.

Zone	Ecl	Occ	Comp	Débit	Taux	Zone	Ecl	Occ	Comp	Débit	Taux
1	10	1	1	60	28,4	9	5	-	-	-	1,7
2	10	1	1	60	13,8	10	5	-	-	-	10,4
3	10	1	1	30	14,8	11	5	-	-	-	0
4	10	1	1	30	14,8	12	10	3	3	30	3,1
5	10	2	2	120	17,3	13	4	5	2	-	5,3
6	10	1	-	-	31,7	14	10	-	-	120	22,1
7	5	1	1	30	11,7	15	10	-	-	120	51
8	10	-	-	-	5,6						

Ecl : puissance d'éclairage (W.m⁻¹.K⁻¹), Occ : nombre d'occupants, Comp : nombre d'ordinateur, Débit : débit de soufflage de la VMC (m³.h⁻¹), Taux : taux de surface vitrée (%)

Tableau 1 : Caractéristiques des zones thermiques

L'ensemble « bureaux » est équipé d'un système de chauffage électrique. Aucun système de climatisation n'est installé. La ventilation mécanique contrôlée (VMC) est de type double flux avec récupération de chaleur (rendement d'échangeur égal à 0,8) (Tableau 1 Erreur ! Source du renvoi introuvable.). Pour la zone « entrepôt », le renouvellement d'air est assuré par une VMC à simple flux (0,5 Vol.h⁻¹). La ventilation est déclenchée une heure avant l'arrivée des occupants afin d'améliorer la qualité d'air en début de journée. La période d'occupation de ce bâtiment est de 8 h à 18 h tous les jours sauf les samedis et dimanches. L'éclairage artificiel est contrôlé en fonction de l'éclairage naturel afin de respecter les consignes d'éclairage pour chaque local (100 lux et 500 lux sur le plan de travail [9], [10]). La perméabilité de l'enveloppe du bâtiment a été évaluée à 0,18 m³.m⁻².h⁻¹ au moyen d'un essai avec une porte soufflante.

2.1 Expérimentation

Le suivi du fonctionnement du bâtiment est assuré par un ensemble de capteurs de température, d'éclairement, et des relevés de compteurs d'énergie par poste. L'ensemble des données est collecté par une GTC. En particulier, le bâtiment a donc été instrumentalisé de manière à effectuer des relevés de températures en continu. Une sonde de température d'air intérieur a été ainsi installée dans chaque zone de l'ensemble « bureaux ». Pour la zone « entrepôt », 8 capteurs de température ont été positionnés sur deux niveaux (à des hauteurs de 0,85 m et 3,2 m).

2.2 Modélisation numérique

Les simulations numériques du bâtiment ont été effectuées en utilisant le couplage entre les types 56 (modèle de thermique du bâtiment) et 97 (modèle aéraulique) de TRNSYS 17. Le Type 56 calcule la température de l'air intérieur à partir de la connaissance des caractéristiques thermiques du bâtiment, des charges et des débits de ventilation et d'infiltration, le type 97 évalue quant à lui les débits d'air entre les zones intérieures et l'extérieur à partir des sollicitations extérieures et de la connaissance des températures intérieures. Les débits d'infiltration et de la ventilation naturelle sont induits par l'effet du vent et du tirage thermique. Les coefficients de pression du vent sur l'enveloppe sont déterminés pour chaque paroi en fonction de l'angle d'incidence du vent sur celle-ci selon le modèle proposé par [11] ainsi que la vitesse du vent de météorologie qui est corrigée en fonction de la hauteur des parois. La modélisation numérique du transfert thermique à travers le sol est effectué par un modèle de différences finies tridimensionnel (voir étude précédente pour les détails de ce modèle [12]). L'ensemble des zones thermiques est traité par approche monozone (1 zone = 1 température) à l'exception de l'entrepôt pour lequel deux approches sont adoptée : l'approche monozone et l'approche zonale pour laquelle le volume d'air intérieur a été subdivisé verticalement en une dizaine de sous-volumes afin de pouvoir représenter la stratification thermique (voir l'étude [13] pour les détails du modèle). L'éclairement intérieur est évalué en fonction de l'éclairement extérieur par le calcul du Facteur de Lumière du Jour (FLJ).

Deux stratégies de ventilation nocturne sont considérées : la ventilation mécanique nocturne (VMC-N) qui consiste à faire fonctionner la VMC aux débits nominaux et la ventilation naturelle (VN-N) par ouverture des lanterneaux de la salle de réunion pour l'ensemble « bureaux » et de ceux de l'entrepôt pour la zone « entrepôt ». La mise en fonctionnement de la ventilation nocturne s'effectue lorsque la température de la salle de réunion (pour l'ensemble « bureaux ») ou de l'entrepôt (pour l'ensemble « entrepôt ») dépasse 26°C. Afin d'éviter un inconfort thermique dans ces deux ambiances en début de journée, la ventilation nocturne est stoppée lorsque la température du local devient inférieure à 19°C. La plage horaire de fonctionnement de la ventilation nocturne est fixée de 22 h à 6 h. Dans le cas de la ventilation naturelle, la fermeture des lanterneaux est également programmée lorsque l'humidité relative de l'air extérieur est supérieure à 95 % (hypothèse simplificatrice pour prendre en compte les risques de pluie).

3. Résultats et discussion

3.1 Conditions météorologiques

Les mesures sur site utilisées dans le cadre de cette étude concernent l'année 2012. La température moyenne annuelle de l'air extérieur est égale à 11,8°C, la température maximale est de 36,7°C (18/08 à 16h00) et la température minimale est de -12,9°C (09/02 à 8h00), voir Figure 2. Le rayonnement solaire journalier moyen s'élève à 272 W.m⁻² avec une valeur

maximale proche de 940 W.m^{-2} . La vitesse maximale du vent enregistrée est de 12 m.s^{-1} (valeur moyenne annuelle : $3,6 \text{ m.s}^{-1}$). L'humidité relative moyenne de l'année est 80 %.

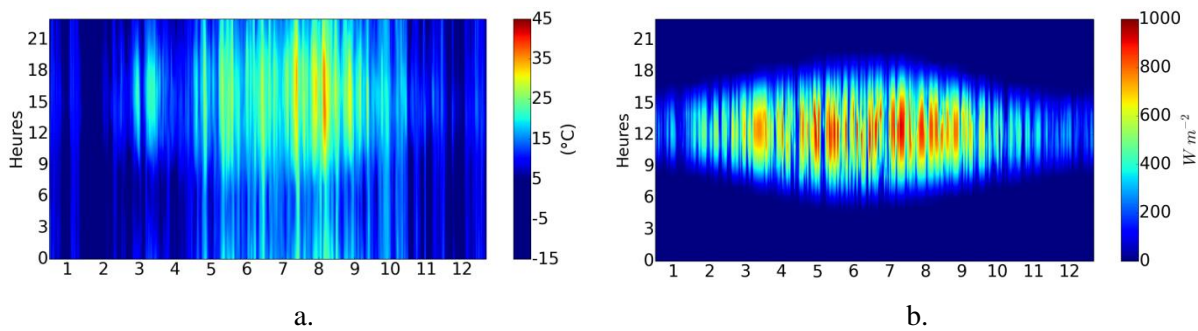


Figure 2 : Température d'air extérieur (a) et rayonnement solaire global horizontal (b)

3.2 Validation du modèle numérique

Une analyse comparative est réalisée afin d'évaluer la cohérence des résultats numériques par rapport aux mesures sur site. A titre d'exemple, la Figure 3a présente l'évolution de la température de l'air du secrétariat. On constate une bonne concordance générale entre la mesure et la simulation tant sur la variation moyenne que sur les fluctuations journalières. Cette similarité des résultats est également observée pour les autres zones dans l'ensemble « bureaux ». En ce qui concerne le grand volume qu'est l'entrepôt, il existe bien une stratification thermique de près de 1°C entre les deux points de mesures (Figure 3b). Contrairement au modèle monozone, on remarque que le modèle zonal permet de modéliser cette stratification et d'obtenir des valeurs proches des températures mesurées.

Au cours de la période hivernale (01/01 – 04/04) de 2012, le chauffage et l'éclairage constituent la plus grande partie de la consommation énergétique pour ce type de bâtiment et représentent environ 73,1 % et 10,5 % de la consommation totale (respectivement égaux à 15 233 et 2 177 kWh). Les besoins de chauffage (14 575 kWh) et la dépense électrique d'éclairage (2 260 kWh) sont bien représentés par la simulation numérique avec une déviation sur le chauffage de 4,3 % et 3,8 % pour l'éclairage artificiel.

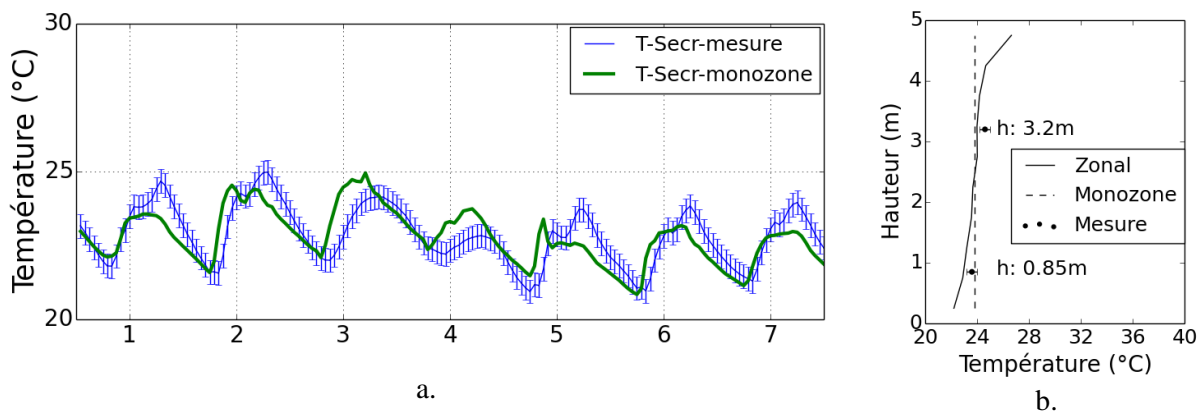


Figure 3: a. Température d'air du secrétariat (1^{ère} semaine de Juin), b. Profil vertical de la température maximale d'air dans l'entrepôt (mois d'Août).

3.3 Fonctionnement de la ventilation nocturne

A titre d'exemple, le scénario d'ouverture des lanternes pour le rafraîchissement nocturne est illustré en Figure 4. On remarque que les lanternes de l'entrepôt ne sont ouverts que pendant une courte période (du 10/08 au 21/08) alors que ceux de la salle de réunion fonctionnent du 01/06 au 10/09. Ceci traduit que la température dans l'entrepôt reste

peu élevée en comparaison de celle de la salle de réunion qui est une zone exposée au sud et qui comporte une surface vitrée importante de 22,1 %.

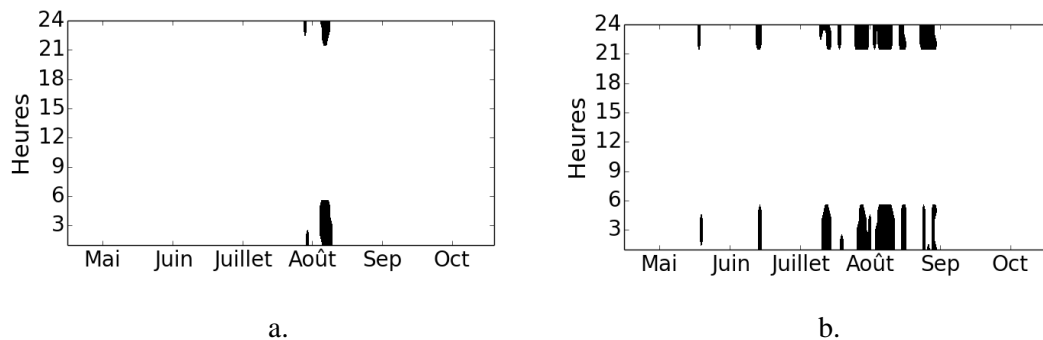


Figure 4: Période d'ouverture des lanterneaux : a. Entrepôt, b. Salle de réunion

3.4 Efficacité de la ventilation nocturne

La Figure 5 présente l'évolution de la température d'air intérieur de l'entrepôt et la salle de réunion pour le bâtiment initial sans ventilation nocturne (« Réf »), avec ventilation nocturne par ouverture des lanterneaux (« VN-N ») et par ventilation mécanique (« VMC-N »). Pour ces deux locaux, on remarque que dans l'ensemble la VN-N est plus efficace que la VMC-N pour rafraîchir l'ambiance. Ainsi, la VN-N est capable de réduire la température moyenne de salle réunion de 23,6 à 23,1°C (diminution de 0,5°C) et de l'entrepôt de 23,5°C à 23,1°C (diminution de 0,4°C) au cours de chaque période d'ouverture correspondante. La VMC-N permet une réduction de la température de 0,4°C pour la salle de réunion et de seulement 0,03°C pour l'entrepôt.

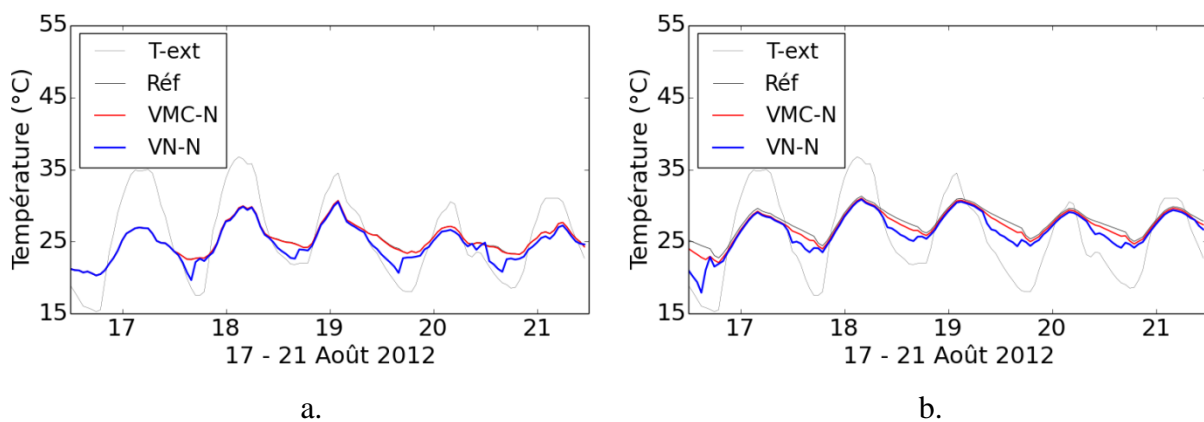


Figure 5: Evolution de la température d'air : a. Salle de l'entrepôt, b. Salle de réunion

Comme toutes les zones du bâtiment sont aérauliquement couplées, les stratégies de ventilation nocturne ont également un impact sur l'ensemble du bâtiment. La Figure 6 présente la diminution de la température d'air des zones de contrôles (salle de réunion et entrepôt), du secrétariat (zone aérauliquement proche de la salle de réunion) et du bureau des mètres (zone isolée). On remarque une très forte corrélation du rafraîchissement du secrétariat avec celui de la salle de réunion dans le cas de la VN-N (Figure 6a). Ceci s'explique par l'effet cheminée qui tend à ventiler l'ensemble des bureaux localisés au premier étage sous la salle de réunion. De plus, il n'y a pas d'effet de l'ouverture des lanterneaux sur le rafraîchissement de la salle de réunion. Le rafraîchissement du bureau des mètres est quasiment nul en VN-N. En ce qui concerne la VMC-N (Figure 6b), l'insufflation d'air frais se faisant dans chaque zone du bâtiment, on observe un rafraîchissement spatialement homogène. Les températures d'air du secrétariat et du bureau des mètres présentent donc une variation similaire. La comparaison de ces deux graphes

illustre bien la plus forte diminution de température pour la salle de réunion et l'entrepôt obtenue grâce à la VN-N.

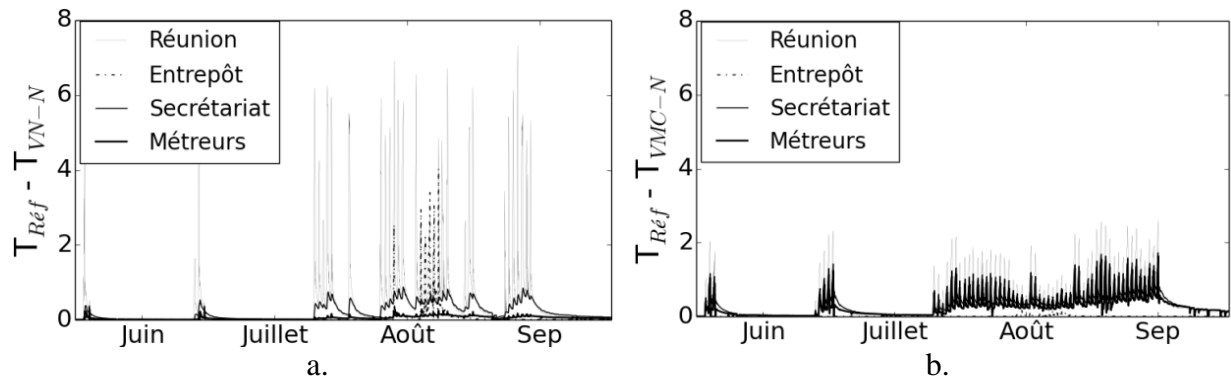


Figure 6: Réduction de la température d'air intérieur par rapport au bâtiment sans ventilation nocturne : a. VN-N, b. VMC-N

3.5 Impact de la ventilation nocturne sur le confort thermique

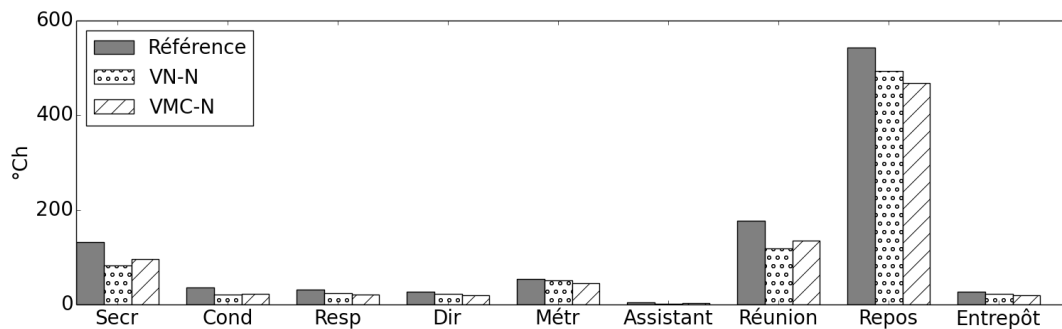


Figure 7 : Degré heures d'inconfort

Le confort thermique d'été est évalué dans la présente étude par le calcul des degrés-heures (DH) d'inconfort en prenant comme référence la température maximale de confort adaptatif. L'objet de ce chapitre est de comparer les effets des deux modes de ventilation nocturne sur le confort des occupants (donc durant la période d'occupation). La Figure 7 présente les DH pour les différentes zones du bâtiment et pour le bâtiment sans et avec ventilation nocturne. Quatre zones souffrent particulièrement d'inconfort de température trop élevée : la salle de repos, la salle de réunion, le secrétariat et le bureau des métreurs. On constate que la VN-N est plus efficace pour améliorer le confort thermique dans le secrétariat et la salle de réunion alors que la VMC-N est meilleure pour les deux autres salles. Si on considère l'ensemble du bâtiment, l'impact de la VN-N sur la réduction des DH est identique à la VMC-N. Le total de DH diminue ainsi de 19 % avec la VN-N et de 20 % pour la VMC-N. A résultat identique, le choix de la VMC-N est peut-être plus évident car plus simple à gérer cependant, une consommation d'énergie supplémentaire pour les ventilateurs d'environ $1,78 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$, soit 7,6 % de consommation annuelle de ventilation mécanique, sera à considérer également.

4. Conclusion

À travers l'étude d'un bâtiment commercial bien isolé, situé dans un climat tempéré, nous avons montré l'intérêt de la ventilation naturelle nocturne assurée par l'ouverture des lanterneaux comme une stratégie du rafraîchissement passif qui contribue à une réduction importante de l'inconfort d'été de l'ensemble du bâtiment (environ 19 %). La ventilation mécanique nocturne paraît aussi efficace que la ventilation naturelle, mais n'est probablement pas une option intéressante du point de vue de la consommation énergétique.

Références

- [1] Y. Rabai et S. Moreau, « Dix ans de consommation d'énergie dans le secteur tertiaire : Publications, Chiffres & statistiques, 2012 ». www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr, nov-2012.
- [2] N. Enteria et K. Mizutani, « The role of the thermally activated desiccant cooling technologies in the issue of energy and environment », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n° 4, p. 2095-2122, mai 2011.
- [3] M. Dubois et Å. Blomsterberg, « Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review », *Energy and Buildings*, vol. 43, p. 2572-2582, Oct 2011.
- [4] X. Wang, C. Kendrick, R. Ogden, N. Walliman, et B. Baiche, « A case study on energy consumption and overheating for a UK industrial building with rooflights », *Applied Energy*, vol. 104, p. 337-344, avr. 2013.
- [5] E. Gratia, I. Bruyère, et A. De Herde, « How to use natural ventilation to cool narrow office buildings », *Building and Environment*, vol. 39, n° 10, p. 1157-1170, oct. 2004.
- [6] M. Kolokotroni, B. Webb, et S. Hayes, « Summer cooling with night ventilation for office buildings in moderate climates », *Energy and Buildings*, vol. 27, n° 3, p. 231-237, juin 1998.
- [7] P. Blondeau, M. Spérandio, et F. Allard, « Night ventilation for building cooling in summer », *Solar Energy*, vol. 61, n° 5, p. 327-335, 1997.
- [8] V. Geros, M. Santamouris, A. Tsangrasoulis, et G. Guarracino, « Experimental evaluation of night ventilation phenomena », *Energy and Buildings*, vol. 29, n° 2, p. 141-154, 1999.
- [9] NF EN 12464-1, « Lighting of work places », juill. 2011.
- [10] CIBSE, « CIBSE Concise Handbook : The Chartered Institution of Building Services Engineers ». 2011.
- [11] M. V. Swami et S. Chandra, « Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow », *ASHRAE transactions*, vol. 94, n° 3112, p. 243-266, 1988.
- [12] R. Lapisa, E. Bozonnet, M. Abadie, P. Salagnac, et R. Perrin, « Effect of ground thermal inertia on the energy balance of commercial low-rise buildings », in *Building Simulation 2013*, Chambéry, France, 2013.
- [13] R. Lapisa, M. Abadie, E. Bozonnet, et P. Salagnac, « Numerical analysis of thermal stratification modelling effect on comfort for the case of a commercial low-rise building », in *The 13th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Hongkong, 2014.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le gouvernement Indonésien pour son soutien financier.