

Evaluation des solutions de rafraîchissement passif d'un bâtiment commercial et de son environnement proche : « Cool roof » et ventilation naturelle

M. Kaboré^{2,1}, P. Salagnac^{1*}, E. Bozonnet¹, M. Abadie¹, R. Perrin²

¹ LaSIE (UMR CNRS 7356), Université de La Rochelle, Av. M. Crépeau, 17042 La Rochelle, France

² SOPREMA, 14 Rue de S^t Nazaire, 67025 Strasbourg Cedex, France

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

Résumé - Cet article propose une première approche pour l'aide à la décision dans la conception de solutions de rafraîchissement passif de bâtiments qui se trouvent en contexte urbain dense. La problématique de l'inconfort d'été dans ces bâtiments doit alors prendre en compte les effets liés aux îlots de chaleur urbains. L'absence de critères objectifs constitue un frein au développement de solutions telles que le traitement radiatif des toitures et la ventilation naturelle envisagés ici. Une méthodologie de représentation simple, basée sur le diagramme de Sankey et des indicateurs de rafraîchissement, sont proposés sur un bâtiment commercial type. Le potentiel de rafraîchissement du bâtiment et de l'environnement urbain ainsi obtenu pour différents climats tempérés montre les perspectives pour la conception de solutions performantes avec des impacts sur l'environnement contrôlés.

Nomenclature

C_{EP} consommation en énergie primaire
 DH degrés-heures, °C.h
 h coef. d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$
 Q énergie, kWh/m^2
 T température, °C
 t temps, s
 S surface d'échange, m^2
 U coef. de transmission therm., $W.m^{-2}.K^{-1}$
Symboles grecs
 η_{FRext} indicateur extérieur
 η_{FRint} indicateur intérieur
Indices
air relatif à l'air
clo relatif aux courtes longueurs d'onde
CD relatif à la conduction
ciel relatif au ciel
CV relatif à la convection

glo relatif aux grandes longueurs d'onde
I relatif à l'infiltration
P relatif à l'enveloppe, plancher, partitions
sol relatif au sol
V relatif à la ventilation
(+) relatif à une valeur positive
(-) relatif à une valeur négative

Exposants

autres relatif aux charges internes
Ch relatif au chauffage
ext relatif à l'extérieur du bâtiment
f relatif aux ouvrants
inc relatif au rayonnement incident
int relatif à l'intérieur du bâtiment
refl relatif au rayonnement réfléchi
ref relatif au cas de référence
s relatif au rayonnement solaire

1. Introduction

Selon le GIEC, le réchauffement global pourrait croître suivant les scénarios de 1,1 à 6,4°C d'ici à la fin du 21^{ème} siècle [1]. Les conséquences seront particulièrement importantes dans les zones urbaines où le bâtiment et son environnement immédiat sont à l'origine de perturbations microclimatiques multiples. La manifestation perceptible de ce microclimat urbain est le phénomène bien connu d'îlot de Chaleur Urbain (ICU) qui se caractérise par une augmentation des températures des sites urbains plus élevées que celles des campagnes environnantes. Ces situations critiques sont constatées en période estivale avec des conséquences sur le confort thermique (dans les ambiances internes comme à l'extérieur), la consommation énergétique, la pollution et plus dramatique les problèmes sanitaires liés à la chaleur qui entraînent un taux de mortalité élevé (cas de l'épisode caniculaire de 2003).

La réduction de cette vulnérabilité passe par la mise en place autant que possible d'un urbanisme et d'un cadre bâti adaptés à l'élévation des températures. Les solutions d'atténuation et d'adaptation sont relativement bien connues. Elles reposent sur l'utilisation de technologies de rafraîchissement passives à l'échelle du bâti et la restauration des phénomènes de rafraîchissement naturels à l'échelle du quartier et de la ville. Les outils de simulation thermique sont devenus incontournables dans la conception des bâtiments. Cependant, un des principaux obstacles à l'utilisation des outils disponibles est l'exploitation des données de sorties et leur représentation de façon simple. En effet, les décideurs ont besoin d'outils simples et d'indicateurs auxquels ils pourraient se référer pour évaluer et choisir les solutions les plus efficaces. Ces outils et indicateurs sont indispensables si, on veut répondre aux questions que nous posent les différents acteurs du bâtiment et la société. Les diagrammes de Sankey, qui sont typiquement utilisés pour représenter des flux de matières ou d'énergies, existent depuis plus de 100 ans [2] et permettent d'avoir une représentation plus aisée des phénomènes. Cependant, il existe très peu de cas d'application à la conception du bâtiment [2], [3].

Dans ce papier, à travers la simulation thermique dynamique d'un bâtiment commercial de grande emprise au sol, nous étudions l'interaction entre l'enveloppe de ce bâtiment et son environnement proche ainsi que la qualité de cet environnement en période chaude en proposant un indicateur de rafraîchissement urbain. Parmi les bâtiments tertiaires, le secteur commercial est l'un des plus importants avec 22,96 % de la consommation totale du secteur tertiaire [4]. Cet indicateur permet d'évaluer les performances des solutions de rafraîchissement vis-à-vis de l'environnement intérieur et extérieur et de les comparer entre elles. Les solutions de rafraîchissement passifs comme la toiture réfléchissante, et la ventilation naturelle sont alors qualifiées et comparées vis-à-vis du rafraîchissement urbain pour différents contextes climatiques.

2. Méthodologie

2.1. Description du bâtiment étudié

Le bâtiment (*Figure 1*), de hauteur 6 m, est constitué d'une structure en acier d'une surface au sol de $36 \times 36 \text{ m}^2$. Ce bâtiment est situé dans une zone urbaine soumise à des climats tempérés (Strasbourg, Paris et Marseille). Les parois verticales sont composées de 1,3 cm de plâtre, 14 cm de laine minérale, et un bardage en acier de 2 mm. Une surface vitrée de 30 m^2 est localisée sur les façades est, ouest et sud. La toiture terrasse d'une épaisseur de 13,5 cm (1,3 cm de plâtre, 12 cm de laine de verre, 2 mm de bardage en acier) présente 20 m^2 de lanternes (soit 1,5 % de la surface totale de la toiture). Le plancher est composé de 16 cm de béton ($0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$) et le sol considéré est sableux. L'inertie des rayonnages est prise en compte sous forme de masse interne. Pour ce bâtiment de référence, la toiture a une réflectivité solaire (albédo) de 0,3 et une émissivité aux grandes longueurs d'ondes de 0,9.

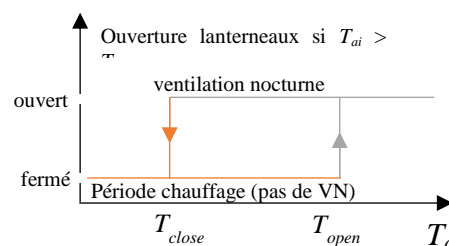


Figure 1 : Vue 3D du bâtiment étudié Figure 2 : Pilotage du chauffage et de la ventilation nocturne

Le bâtiment est chauffé (19°C en occupation, 5°C en inoccupation) mais non climatisé. Un débit de ventilation mécanique de 30 kg/h/pers est assuré pendant la période d'occupation

(chaque jour de 7 h à 22 h sauf le dimanche). Un taux d'occupation équivalent à 11,6 m²/personne est considéré, typique dans ce cas [5]. Aux gains internes dus aux occupants s'ajoutent les apports thermiques liés à l'éclairage représentant 5 W/m² dont 40 % de part convective. Le niveau de perméabilité à l'air est équivalent à une ouverture de 2 cm²/m² [6].

2.2. Modèle thermique du bâtiment

Les simulations thermiques du bâtiment ont été effectuées en couplant TRNSYS© (modèle thermique) à CONTAM© (modèle aéraulique). Les débits d'infiltration et de ventilation naturelle sont induits par l'effet du vent et du tirage thermique. Le coefficient de pression du vent sur l'enveloppe est déterminé par le modèle proposé par [7]. Le transfert thermique par le sol est modélisé selon une approche tridimensionnelle [8]. Une année complète supplémentaire de mise en régime est utilisée pour l'initialisation de chaque calcul.

2.3. Modélisation des techniques de rafraîchissement

Différentes techniques passives « en toiture » ont été utilisées pour rafraîchir le bâtiment en été : le « cool roof » (CR), la ventilation naturelle (VN) et la combinaison des deux (CR+VN).

Une toiture dite « cool roof » possède un revêtement de toiture permettant de limiter l'absorption de l'éclairement solaire par une forte réflectivité solaire ; tout en émettant la chaleur accumulée vers la voûte céleste de par son émissivité thermique élevée. Ici, une réflectivité solaire de 0,7 a été considérée tout en conservant l'émissivité (0,9) du cas de référence.

La ventilation naturelle est assurée par l'ouverture des lanterneaux durant l'été pendant la période nocturne de 23 h à 6 h (en dehors des périodes d'occupation et sans ventilation mécanique supplémentaire) et lorsque la température intérieure est supérieure à la température extérieure (écart de 2°C). La VMC fonctionne pendant l'été et peut être réglée en fonction des besoins de ventilation. Les entrées d'air sont disposées en partie basse en façade du bâtiment. Le pilotage de l'ouverture pour la ventilation naturelle doit se faire en dehors des périodes de chauffage et donc déterminé par le diagramme de contrôle (*Figure 2*). Durant les périodes de non-chauffage (principalement l'été), les lanterneaux sont pilotés en fonction des températures d'air extérieur et intérieur (T_{ae} et T_{ai}). Le choix des limites des périodes de chauffage et de ventilation naturelle T_{close} et T_{open} sont déterminants à la fois pour le potentiel annuel de rafraîchissement passif et pour le besoin de chauffage.

3. Résultats

3.1. Diagramme de Sankey du bâtiment de référence

Dans cette première partie, les flux énergétiques (*Figure 3*) entre le bâtiment et son environnement sont représentés par un diagramme de Sankey (*Figure 4*). Cette représentation synthétique permet d'identifier rapidement les forces et les faiblesses des composants des systèmes énergétiques et de leur intégration. Deux bilans thermiques ont été réalisés. Le premier bilan concerne l'enveloppe du bâtiment, le plancher et les partitions internes.

$$\underbrace{Q_{clo}^s}_1 + \underbrace{h_{glo}^{ext} S (T_{ciel} - T_p^{ext}) \Delta t}_2 + \underbrace{h_{cv}^{ext} S (T_{air}^{ext} - T_p^{ext}) \Delta t}_3 + \underbrace{US (T_p^{int} - T_{sol}) \Delta t}_4 + \underbrace{Q_{clo}^f + Q_{glo}^{Autres}}_5 + \underbrace{Q_{glo+}^{int} - Q_{glo-}^{int}}_6 + \underbrace{h_{cv}^{int} S (T_p^{int} - T_{air}^{int}) \Delta t}_7 + \underbrace{\Delta Q_p}_8 = 0 \quad (1)$$

Où (1) représente les apports solaires sur l'enveloppe ($Q_{clo}^{s,inc} - Q_{clo}^{s,refl}$) ; (2) correspond aux échanges par rayonnement GLO avec la voûte céleste (Q_{glo}^{ext}) ; (3) sont les échanges convectifs avec l'extérieur ($Q_{CV+}^{ext} - Q_{CV-}^{ext}$) ; (4) représente les échanges par conduction avec le

sol (Q_{CD}^{sol}); (5) sont les apports solaires par les ouvrants (Q_{clo}^f) et les apports par l'éclairage (Q_{glo}^{Autres}); (6) correspond aux échanges par rayonnement GLO avec les faces internes au bâtiment ($Q_{glo+}^{int} - Q_{glo-}^{int}$); (7) sont les échanges convectifs avec l'air intérieur ($Q_{CV+}^{int} - Q_{CV-}^{int}$) et (8), les variations d'énergie interne ΔQ_{p+} et ΔQ_{p-} (inertie) de l'ensemble du bâtiment (enveloppe, plancher et rayonnement).

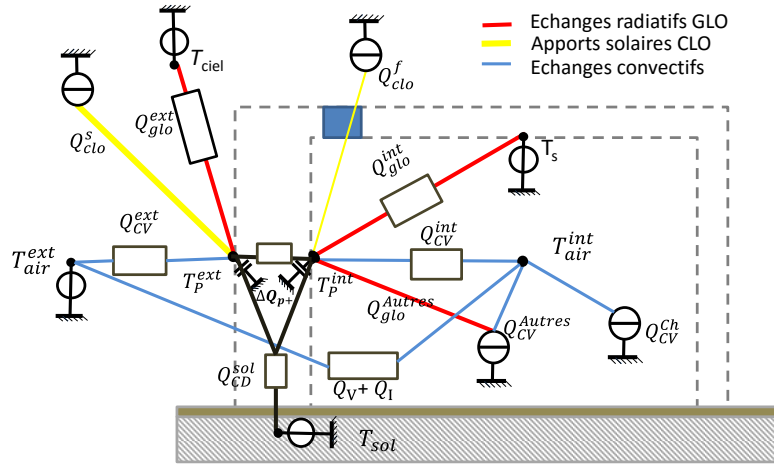


Figure 3 : Echanges thermiques au sein du bâtiment et entre le bâtiment et son environnement

L'équation (1) peut se mettre sous la forme suivante (en dissociant les apports (+) et les apports (-)) et en faisant apparaître les différents termes nécessaire au diagramme de Sankey :

$$Q_{clo}^{s,inc} - Q_{clo}^{s,refl} - Q_{glo}^{ext} + Q_{CV+}^{ext} + Q_{CD}^{sol} - Q_{CV-}^{ext} + \Delta Q_{p+} = Q_{clo}^f + Q_{glo}^{Autres} + Q_{glo+}^{int} - Q_{glo-}^{int} + Q_{CV+}^{int} - Q_{CV-}^{int} + \Delta Q_{p-} \quad (2)$$

Le second bilan s'intéresse à l'air intérieur :

$$\underbrace{(\dot{m}_V + \dot{m}_I)C_p(T_{air}^{int} - T_{air}^{ext})\Delta t}_1 + \underbrace{h_{CV}^{int}S(T_{air}^{int} - T_p^{int})\Delta t}_2 + \underbrace{Q_{CV}^{Ch} + Q_{CV}^{Autres}}_3 = 0 \quad (3)$$

Où (1) représente les échanges par ventilation et infiltration ($Q_{V+} + Q_{I+} - Q_{I-} - Q_{V-}$); (2) correspond aux échanges convectifs avec les parois internes ($Q_{CV+}^{int} - Q_{CV-}^{int}$); (3) représente les apports convectifs liés au chauffage (Q_{CV}^{Ch}), aux occupants et à l'éclairage (Q_{CV}^{Autres}). Ce bilan peut se mettre sous la forme :

$$Q_{V+} + Q_{I+} + Q_{CV+}^{int} + Q_{CV}^{Ch} + Q_{CV}^{Autres} - Q_{I-} - Q_{V-} - Q_{CV-}^{int} = 0 \quad (4)$$

La Figure 4 présente le diagramme de Sankey issu de la simulation annuelle de l'ensemble bâti en interaction avec l'environnement extérieur (climat de Marseille).

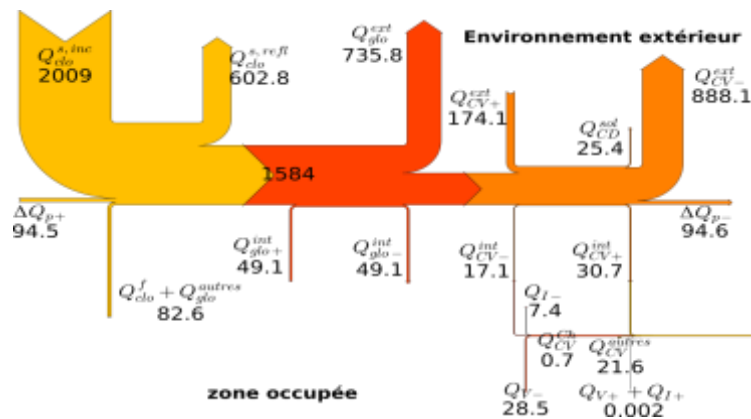


Figure 4 : Diagramme de Sankey (kWh/m²) de l'ensemble du bâtiment

Ce diagramme permet d'analyser les spécificités des transferts thermiques de cette typologie de bâtiment [9]. Pour les bâtiments de grand volume et de faible hauteur, le sol est un facteur important qu'il ne faut pas négliger car il se comporte comme un puit de chaleur ($Q_{CD}^{sol}=25,4 \text{ kWh/m}^2$) et contribue au rafraîchissement du bâtiment en été et à des pertes thermiques pendant la période de chauffage. D'autre part, l'inertie globale du bâtiment qui contribue à réguler la température dans le bâtiment est mise en évidence ($\Delta Q_{p-}=\Delta Q_{p+}=94,6 \text{ kWh/m}^2$). Le potentiel de réchauffement Q^{ext} de l'environnement proche peut être estimé par l'équation (5). Il représente les échanges convectifs avec l'air extérieur et la chaleur évacuée par ventilation ($Q^{ext}=745 \text{ kWh/m}^2$ pour toute l'année à Marseille).

$$Q^{ext} = Q_{CV+}^{ext} - Q_{CV-}^{ext} - Q_{I-} - Q_{V-} \quad (5)$$

Cet apport de chaleur à l'environnement extérieur est préjudiciable en été et contribue à l'apparition des phénomènes d'ICU. Dans la suite, nous allons donc restreindre l'étude à la période des besoins en rafraîchissement du bâtiment.

3.2. Définition du potentiel de rafraîchissement sur la période estivale

Afin de caractériser les performances du bâtiment vis-à-vis de la zone occupée et de l'environnement proche, deux grandeurs sont utilisées :

- Le confort thermique d'été peut être évalué par le calcul des degrés-heures d'inconfort (DH) en prenant comme référence la température maximale de confort adaptatif (EN-ISO-15251).
- Pendant la période où le bâtiment nécessite d'être refroidi, les échanges thermiques entre le bâti et l'environnement proche modifient le microclimat urbain et sont représentés par la quantité d'énergie (Q^{ext}) échangée avec l'air extérieur.

Dans le cas de Marseille, la période de rafraîchissement correspond à 5176 heures (soit 59 % d'une année). L'énergie (Q^{ext}) apporté au milieu environnant représente 570 kWh/m^2 (Figure 5) pendant la période de rafraîchissement contre 745 kWh/m^2 pour toute l'année. Le nombre de degré-heures est de $1275,6 \text{ }^\circ\text{Ch}$. Dans le cas présent, le sol ($18,7 \text{ kWh/m}^2$) contribue fortement à dissiper la chaleur présente dans la zone habitable.

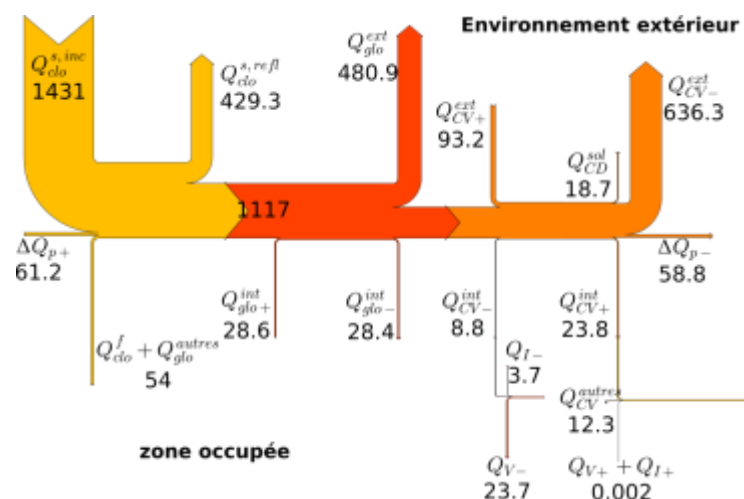


Figure 5 : Diagramme de Sankey (kWh/m^2) pendant la période estivale à Marseille

3.3. Évaluation des techniques de rafraîchissement

3.3.1. Définitions des indicateurs et comparaison des techniques de rafraîchissement

Dans l'optique de comparer les performances des différentes techniques de rafraîchissement, les indicateurs de réchauffement de l'environnement extérieur η_{FRext} et de confort thermique η_{FRint} sont calculés par les équations (6). Les scénarios de rafraîchissement passif sont comparés au cas de référence sans solution de rafraîchissement. Ces indicateurs sont respectivement les taux de variation de la chaleur échangée avec l'air extérieur Q^{ext} , contribution anthropique du bâtiment au microclimat local, et des degrés-heures d'inconfort chaud DH .

$$\eta_{FRext} = 100 \frac{Q^{extref} - Q^{ext}}{Q^{extref}} \quad \text{et} \quad \eta_{FRint} = 100 \frac{DH_{ref} - DH}{DH_{ref}} \quad (6)$$

Le taux de variation de la consommation en énergie primaire (ΔC_{EP}) est aussi calculé dans le but d'évaluer l'impact de la technologie de rafraîchissement sur les besoins énergétiques du bâtiment sur toute l'année. La Figure 6 présente les échanges thermiques pour le cas du « cool roof » pendant la période estivale à Marseille.

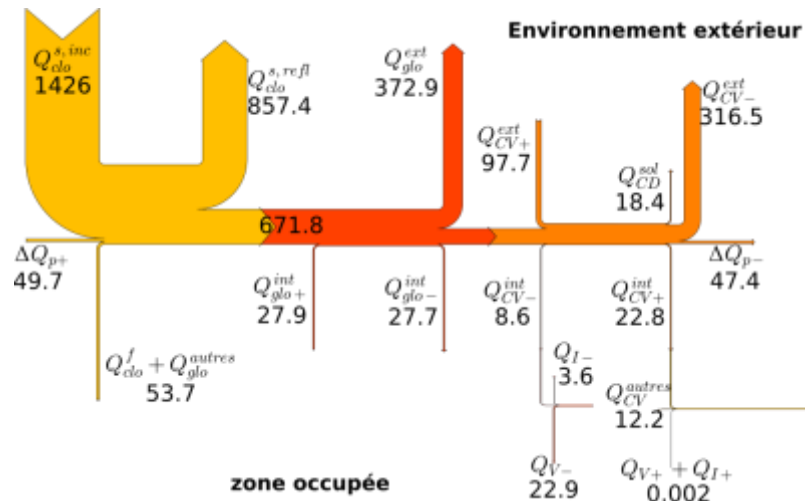


Figure 6 : Diagramme de Sankey (en kWh/m²) - Cas du CR à Marseille

La présence de ce revêtement réfléchissant limite les apports de chaleur en toiture. Cela a pour conséquence une baisse des températures des surfaces et de l'air de l'environnement proche. La période de surchauffe est réduite et cela se manifeste sur les différents flux intégrés sur cette période. On obtient ainsi une baisse de la période d'inconfort et des degrés-heures, soit un potentiel de rafraîchissement intérieur η_{FRint} de 18,9 %. La chaleur transmise à l'environnement proche diminue également passant à 245 kWh/m² contre 570 kWh/m² pour le cas de référence, soit une valeur η_{FRext} de 57,05 %.

La Figure 7 présente pour le même climat les résultats obtenus dans le cas de la ventilation naturelle. La ventilation nocturne (Q_{I-}) permet de refroidir les surfaces du internes du bâtiment (Q_{CV+}^{int}) mettant ainsi l'inertie du bâtiment ($\Delta Q_{p+} = 64.4$) à contribution. On peut observer que la dissipation par le sol est moins sollicitée en comparaison au cas de référence. Les degrés-heures d'inconfort passent à 300°Ch, ce qui représente un potentiel de rafraîchissement η_{FRint} de 76,5 %. Les transferts thermiques vers l'extérieur subissent une légère baisse avec η_{FRext} égale à 0.78 %. Les résultats obtenus lorsque l'on combine les deux solutions précédentes (VN+CR) sont présentés sur la Figure 8. Cette combinaison offre les meilleures performances tant pour l'environnement interne que l'environnement extérieur proche. Les potentiels de rafraîchissement sont respectivement $\eta_{FRint} = 83,9$ % et $\eta_{FRext} = 57$ % pour l'intérieur et l'extérieur.

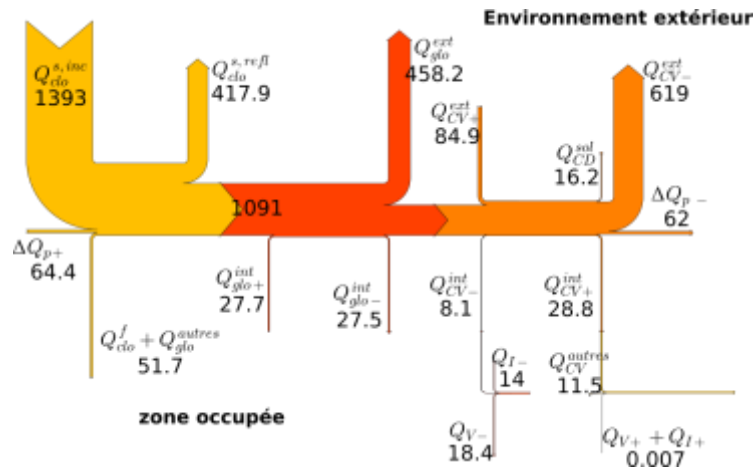


Figure 7 : Diagramme de Sankey (en kWh/m²) - Cas de la VN à Marseille

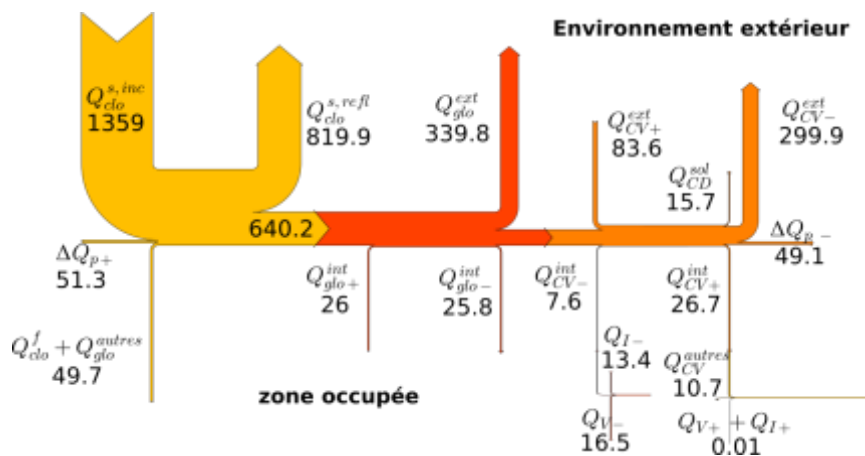


Figure 8 : Diagramme de Sankey (en kWh/m²) - Cas VN + CR à Marseille

3.3.2. Impact du climat

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus sous d'autres contraintes climatiques (Paris, Strasbourg). Le Tableau 1 présente les indicateurs de rafraîchissement intérieur (η_{FRint}), extérieur (η_{FRext}) et la variation du C_{EP} . Concernant le rafraîchissement extérieur, pour tous les climats étudiés les tendances sont les mêmes. L'impact de la ventilation naturelle sur l'énergie échangée avec l'environnement proche est négligeable en comparaison de la solution « cool roof ». Quel que soit le climat tempéré pris en compte, en augmentant l'albédo du toit de 0,4, on arrive à une réduction de la surchauffe de l'environnement proche de l'ordre de 55 %. Pour le rafraîchissement du bâtiment, les solutions incluant la ventilation naturelle permettent d'avoir une meilleure réduction de l'inconfort par rapport au « cool roof » pour le climat de Marseille. Pour les climats de Paris et de Strasbourg, on observe de très faibles périodes d'inconfort dues au modèle du bâtiment et aux fichiers météo de référence utilisés pour les simulations. Cependant, l'emploi des « cool roofs » entraîne une légère augmentation du C_{EP} , essentiellement due à la baisse des apports solaires. En ce qui concerne la ventilation naturelle, on peut observer une légère baisse du C_{EP} pour Paris et Strasbourg.

Tableau 1 : η_{FRint} , ΔC_{EP} et η_{FRext} pour différents climats

	Marseille			Paris			Strasbourg		
	$\eta_{FRint}(\%)$	ΔC_{EP}	η_{FRext}	η_{FRint}	$\Delta C_{EP}(\%)$	η_{FRext}	η_{FRint}	ΔC_{EP}	$\eta_{FRext}(\%)$
CR	18,9	0,6	57,05	-	1,14	52,02	-	0,46	53,29
VN	76,5	0,0	0,78	-	-0,17	6,70	-	-0,56	5,24
VN+CR	83,9	0,4	56,85	-	0,74	54,63	-	0,05	55,45

4. Conclusions

Dans cette étude issue de simulations thermiques du bâtiment, le potentiel de rafraîchissement passif a été abordé à la fois dans sa dimension classique du point de vue du bâtiment mais aussi du point de vue de sa contribution de chaleur anthropique à son environnement urbain. L'analyse intégrée sur une année complète a été représentée d'une manière simple à l'aide du diagramme de Sankey permettant de visualiser les flux d'énergies, en particulier sur la période de besoin en rafraîchissement. Nous nous sommes focalisés sur les échanges thermiques en période estivale entre le bâtiment et son environnement proche et le confort d'été par la mise en œuvre d'indicateurs. À travers l'étude d'un bâtiment commercial, situé dans des contextes climatiques tempérés par cette méthodologie, nous avons montré l'intérêt du « cool roof » et de la ventilation naturelle nocturne, comme stratégies de rafraîchissement passif, aussi bien pour l'environnement intérieur qu'extérieur. L'augmentation de l'albédo de la toiture est complémentaire de la ventilation nocturne par les lanterneaux. La ventilation naturelle contribue à une forte réduction de l'inconfort thermique d'été en comparaison au « cool roof » (76,5 % au lieu de 18,9 %). Les revêtements réfléchissants permettent quant à eux de réduire la surchauffe de l'environnement extérieur (55 %). Pour une meilleure efficacité, la combinaison de ces techniques est souhaitable. D'autre part, l'inertie en général et celle du sol en particulier constitue une source de rafraîchissement passif importante en climat tempéré pour cette typologie de bâtiment. Des travaux concernant l'application de cette méthodologie à d'autres typologies de bâtiment sont en cours.

Remerciements

Les auteurs remercient la Région Grand Est pour son soutien financier.

Références

- [1] C. Guivarch et C. Cassen, « L'atténuation du changement climatique : retour sur le 5e rapport du Giec », *La Météorologie*, vol. 8, n° 88, p. 97, 2015.
- [2] M. Schmidt, « The Sankey Diagram in Energy and Material Flow Management », *J. Ind. Ecol.*, vol. 12, n° 1, p. 82-94, février 2008.
- [3] W. (Liam) O'Brien, « Preliminary Investigation of the Use of Sankey Diagrams to Enhance Building Performance Simulation-supported Design », in *Proceedings of the 2012 Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*, San Diego, CA, USA, 2012, p. 15:1–15:8.
- [4] CEREN, « Données Statistiques du CEREN. » 2014.
- [5] M. Deru *et al.*, « U.S. Department of Energy commercial reference building models of the national building stock », *Publ. E*, p. 1-118, févr. 2011.
- [6] A. K. Persily, *Airtightness of commercial and institutional buildings: blowing holes in the myth of tight buildings*. Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 1998.
- [7] M. . V. Swami et S. Chandra, « Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural - ventilation airflow », *ASHRAE Trans.*, vol. 94, p. 243-246, 1988.
- [8] R. Lapisa, E. Bozonnet, M. Abadie, et P. Salagnac, « Effect of ground thermal inertia on the energy balance of commercial low-rise buildings », in *Building simulation for a sustainable world*, Chambéry, France, 2013, p. 2068-3825.
- [9] R. Lapisa, E. Bozonnet, M. O. Abadie, et P. Salagnac, « Cool roof and ventilation efficiency as passive cooling strategies for commercial low-rise buildings – ground thermal inertia impact », *Adv. Build. Energy Res.*, vol. 7, n° 2, p. 192-208, 2013.