HAL
open science

Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense

Maxime Doya

To cite this version:

Maxime Doya. Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense. Autre. Université de La Rochelle, 2010. Français. NNT : 2010LAROS296 . tel-00537691v2

HAL Id: tel-00537691

https://theses.hal.science/tel-00537691v2

Submitted on 29 Nov 2010

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.

UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

École Doctorale Sciences pour l'Environnement Gay Lussac (GL)

THÈSE

Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense

Maxime DOYA

soutenance prévue : le 08 juillet 2010

pour l'obtention du grade de Docteur de l'Université de La Rochelle

Discipline : Génie Civil

Thèse dirigée par Francis ALLARD et Emmanuel BOZONNET

JURY :

Rapporteurs :

D. ROBINSON	Professeur, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
G. GUARRACINO	Professeur, ENTPE de Lyon

Examinateurs :

M. SANTAMOURIS	Professeur, National and Kapodistrian University of Athens
F. ALLARD	Professeur, Université de La Rochelle
E. BOZONNET	Maître de conférences, Université de La Rochelle
C. INARD	Professeur, Université de La Rochelle
M. MUSY	HDR, École d'Architecture de Nantes
S. KHERROUF	Docteur, Ingénieur ADEME

Remerciements

Résumé

L'interaction des phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans un tissu urbain avec les apports anthropiques participent à l'îlot de chaleur urbain et à la dégradation de la performance énergétique des bâtiments. L'objectif de cette étude est de définir l'impact de la modification des propriétés radiatives aux façades des bâtiments qui peut être réalisée par l'utilisation de revêtements sélectifs colorés récemment développés pour les toitures. Les flux sensibles et l'impact sur les bâtiments sont étudiés pour une morphologie caractéristique des milieux urbains denses, la rue canyon.

Un suivi expérimental mené sur des surfaces élémentaires de propriétés radiatives différentes nous a permis de développer par une méthode d'optimisation un procédé de détermination simultané du coefficient de convection et des absorptivités solaires effectives sur la période de mesure. L'utilisation de peintures sélectives dans la configuration canyon retenue est ensuite analysée expérimentalement. Pour cela une maquette (1/10ème) de scène urbaine a été conçue sur la base de 5 rangées de cuves de béton creux qui ont fait l'objet de mesures de températures et de flux radiatifs. Dans un premier temps, le traitement de deux mois de mesures a permis de caractériser les évolutions de champs de températures liés à cette forme urbaine. Par la suite, trois configurations de propriétés radiatives aux façades ont été étudiées simultanément et ont permis d'analyser les modifications spécifiques sur les champs de température, de surfaces et d'air. Afin d'estimer les économies d'énergie réalisables sur un bâtiment réel ainsi que l'impact sur son environnement proche, une étude paramétrique des revêtements de façade et de la chaussée a été effectuée par des simulations de l'interaction du bâti et du microclimat. Les méthodes et expériences établies dans cette étude nous permettent d'envisager le développement du traitement des façades et de la caractérisation de leurs performances globales.

Mots clés : Caractérisation des propriétés radiatives, expériences, microclimat urbain, peintures sélectives, rue canyon, maquettes

Abstract

Analysis of façade radiative properties
for building energy efficiency in a dense urban environment

Modified heat and mass transfer in the urban built and anthropogenic loads contribute to the urban heat island phenomenon as to the deterioration of building energy efficiency. The scope of this study is to define the impact implied by the modification of facade radiative properties that can be achieved by using selective cool-colored coatings initially developed for roofing. Sensible heat transfers and consequences on building comfort are studied through a characteristic morphology from dense urban environment, the street canyon. Monitoring of surface energy budget on elementary discs of different radiative properties allowed us to develop, through optimisation method, a process to determine simultaneously the effective solar absorptivities and a convective heat transfer coefficient on the measurement period. The following step consists in an experimental analysis of cool selective paints in the chosen canyon configuration. A reduced-scale model (1/10th) of an urban scene has been designed with 5 rows of hollow concrete tanks that had temperatures and radiative fluxes monitored. Measured data for uniform coatings allowed highlighting the temperature evolution linked to the particular urban form. Afterwards, three facades radiative properties configurations have been studied simultaneously and allowed the analysis of those specific modifications on air and surface temperature fields. Lastly, in order to estimate energy consumption savings on real scale buildings as well as the impact on the near urban environment, a parametric study on coating of facades and roads has been performed through simulation taking into account interactive heat transfers between the built environment and the microclimate. The experiments and methods designed along the study permit to consider façade coating development and global efficiency characterization.

Keywords: Radiative properties, reduce scale model, urban microclimate, selective cool paints, street canyon

Table des matières

Nomenclature 12
Caractères latins 12
Indices 13
Introduction et problématique 15
1. État de l'art sur le traitement de l'îlot de chaleur urbain (ICU) 25
1.1. Processus physiques de formation de l'ICU 25
1.1.1. Notions de climats et microclimats 25
1.1.2. Formalisation du bilan énergétique à l'échelle d'une ville 27
1.1.3. Mécanismes affectant les espaces urbains et ruraux 30
1.2. Modélisation de l'ICU 33
1.2.1. Modélisation à l'échelle locale de la canopée urbaine 33
1.2.2. Modélisation des échelles microclimatiques : des quartiers aux blocs urbains 35
1.2.3. Applications aux formes urbaines spécifiques 37
1.2.4. Validation physique des modèles 40
1.3. Applications expérimentales de stratégies d'atténuations de l'ICU 41
1.3.1. Plans d'urbanismes adaptés à la formation du microclimat 41
1.3.2. Stratégies applicables aux centres urbains denses comme mesures de réhabilitation énergétique et microclimatique 43
1.4. Impact du traitement radiatif des surfaces urbaines 49
1.4.1. Qualification des produits « cool » 49
1.4.2. Développement de produits colorés cool 51
1.4.3. Impact du vieillissement et de l'encrassement sur la réflectivité solaire 53
1.4.4. Performances des revêtements cool pour toitures 55
1.4.5. Façades cool pour l'environnement urbain 60
2. Performances thermiques des peintures sur un élément « paroi » 65

2.1. État de l'art et objectifs : Caractérisations et performances des échantillons 66
2.1.1. Effet de la pureté et de la concentration 66
2.1.2. Effets de la rugosité 67
2.1.3. Objectifs 69
2.2. Caractérisation des échantillons par spectrophotoscopie 70
2.2.1. Présentation brute de la réflectivité des échantillons à une source de 1000 W/m² en fonction de la longueur spectrale. 71
2.2.2. Variations des mesures de réflectivité spectrale 72
2.2.3. Méthode de détermination des réflectivités solaires 72
2.2.4. Comparaison de la réflectivité entre les produits standards et les produits COOL de même teinte..... 74
2.3. Caractérisation des échantillons par émissiométrie 83
2.3.1. Incertitudes sur la mesure..... 85
2.3.2. Résultats des mesures..... 85
2.4. Banc expérimental extérieur..... 86
2.4.1. Protocole expérimental du banc extérieur 86
2.4.2. Traitement des données : élimination des problèmes..... 89
2.4.3. Évaluation des performances thermiques des peintures..... 93
2.5. Estimation des coefficients du bilan énergétique de surface..... 99
2.5.1. Observations et analyse du terme convectif 100
2.5.2. Détermination expérimentale des absorptivités solaires en connaissant le coefficient de convection *h* global. 108
2.5.3. Ajustement simultané des coefficients radiatifs et convectifs 111
2.6. Conclusions et Perspectives 114
3. Performances thermiques des peintures sur une maquette de scène urbaine 117
3.1. Développement de la maquette in-situ CLIMABAT 118
3.1.1. État de l'art : simulation in situ et maquettes 118
3.1.2. Aspect et Géométrie 120

3.1.3. Analogie des échanges radiatifs 121
3.1.4. Similitudes thermoaérauliques 122
3.1.5. Analogie d'inertie des structures et de conduction de la chaleur 123
3.2. Interaction du modèle réduit avec son environnement 127
3.2.1. Effets des vents dominants 127
3.2.2. Effets des masques lointains 130
3.3. Protocole expérimental 133
3.3.1. Mesures des réflectivités solaires et émissivités infrarouges des peintures marrons standard et cool 133
3.3.2. Caractéristiques thermiques des matériaux du banc 134
3.3.3. Aspects techniques de la mise en œuvre 136
3.3.4. Capteurs de température 140
3.3.5. Mesures des échanges radiatifs 142
3.3.6. Mesure des caractéristiques du vent 143
3.3.7. Perspectives de développement du banc 144
3.4. Identification de l'effet canyon 145
3.4.1. Températures diurnes et flux solaires simulés 145
3.4.2. Différence de températures selon la position des surfaces dans la maquette 149
3.4.3. Influence sur les températures d'air de l'environnement bâti 154
3.4.4. Températures d'air dans les bâtiments 158
3.4.5. Analyse des transferts convectifs en toiture 159
3.5. Effet de la configuration des propriétés radiatives aux surfaces du canyon 163
3.5.1. Évolution des flux solaires journaliers absorbés 163
3.5.2. Modification des températures de surface 166
3.5.3. Maintien des températures d'air de l'environnement bâti 170
3.5.4. Températures de l'air intérieur 173
3.5.5. Bilan d'énergie nocturne dans les canyons 177
3.6. Conclusions sur les résultats expérimentaux 180

4. Simulation du piégeage radiatif et de la demande énergétique des bâtiments en milieu urbain dense 183
4.1. Modélisation des économies d'énergie directes liée à l'application d'un cool roof 184
4.1.1. Modèle simplifié du local et des transferts thermiques 184
4.1.2. Modélisation de la conduction thermique dans une paroi 187
4.1.3. Intégration des facteurs réponses dans le bilan thermique de surface 190
4.1.4. Application à l'influence de la réflectivité solaire sur le flux gagné par une paroi horizontale 191
4.2. Modélisation couplée de l'impact de la réflectivité des parois verticales d'une rue canyon sur les températures de l'environnement extérieur et les consommations énergétiques 198
4.2.1. Description du modèle 199
4.2.2. Description du cas d'étude : paramètres de simulation 201
4.2.3. Répartition des éclairements solaires absorbés selon la configuration des propriétés radiatives dans la rue Dervenion 204
4.2.4. Évolution de la température de surface 210
4.2.5. Comparaison des économies d'énergies réalisées sur l'année 212
4.2.6. Température de l'air circulant dans le canyon et atténuation de l'ICU 215
4.3. Sensibilité de l'énergie solaire absorbée à la distribution des propriétés radiatives des rues canyons, au ratio d'aspect et à l'orientation 218
4.3.1. Effet de la combinaison orientation et stratégie de peinture appliquée à une rue canyon spécifique 219
4.3.2. Effet de la combinaison entre le ratio d'aspect *H*/*W* et la stratégie de peinture appliquée dans la rue 222
4.3.3. Ratios géométrique et localisation géographique 225
4.4. Conclusions sur les simulations et futurs développements du modèle 228
Conclusion et perspectives 231
Références 239

ANNEXES 1: Correction de la température du ciel 247
ANNEXE 2 : Modèles de ciels clairs..... 251
ANNEXE 3 : Moyenne des vitesses et directions du vent..... 252

Nomenclature

Caractères latins

Désignation	Description	Unité
c_p	Chaleur massique à pression constante	J/kg.K
T_{dp}	Température de rosée de l'air ambiant	K
$Re_{x,c}$	Nombre de Reynolds local	ad.
g	Accélération de la pesanteur	m/s²
h_c	Coefficient superficiel d'échanges convectifs	W/m²K
h_f	Coefficient superficiel d'échange par convection forcée	W/m²K
h_n	Coefficient superficiel d'échange par convection naturelle	W/m²K
p_{vs}	Pression de vapeur saturante de l'air humide	Pa
$M°$	Émittance d'un corps noir	W/m²
E	Éclairement	W/m²
Nu	Nombre de Nusselt	-
Pr	Nombre de Prandtl	-
M	Émittance d'un corps gris	W/m²
U_{emf}	Voltage mesuré à la centrale d'acquisition	V
T_{ciel}	Température équivalente du ciel	K
p_v	Pression vapeur de l'air humide	Pa
H	Hauteur de la rue canyon	m
W	Largeur de la rue canyon	m
Nu	Nombre de Nusselt	-
P	Pression	Pa
Ra	Nombre de Rayleigh	-
Gr	Nombre de Grashof	-
t	Temps	s
E_{sol}	Éclairement solaire	W/m²
E_{atm}	Flux radiatif grande longueur d'onde horizontal	W/m²

φ_{cond}	Flux de chaleur par conduction	W/m²
T_S	Température de surface	K
T_{air}	Température d'air de référence	K

Caractères grecs

Désignation	Description	Unité
ε_{ciel}	Émissivité équivalente de grande longueur d'onde d'un ciel clair	-
ρ_a	Masse volumique de l'air humide	kg/m^3
λ	Conductivité thermique d'un matériau ou d'un fluide	W/(m.K)
α_λ	Absorptivité pour la longueur d'onde λ	-
Γ	Angle d'incidence entre la perpendiculaire au mur et la direction du vent	°
μ	Viscosité cinématique	kg/(m.s)
δ	Épaisseur de la couche limite	m
Δ_i	Précision de la grandeur mesurée i	-
φ	Flux de chaleur	W/m²
ν	Viscosité dynamique	m^2/s
Θ	Température adimensionnée	-
ρ	Densité ou masse volumique	kg/m^3
T	Temps adimensionné	-
a	Diffusivité thermique	m^2/s
β	Coefficient de dilatation du fluide	K^{-1}

Indices

λ	longueur d'onde	µm

Introduction et problématique

L'îlot de chaleur urbain est la manifestation d'un ensemble de phénomènes qui font augmenter la température globale des villes avec des conséquences sur la consommation énergétique des bâtiments. Les observations relatives à ce phénomène sont décrites dans les paragraphes suivants avant d'expliquer les fondements qui nous ont conduits à traiter ses conséquences énergétiques dans les espaces urbains denses par la régulation du piégeage radiatif aux surfaces verticales.

D'après Lun et al. (2009), les premières documentations expérimentales faisant référence à des différences de températures entre l'espace urbain et sa périphérie datent de près de 200 ans. Howards en 1833 aurait apporté la première évidence scientifique de ce phénomène à Londres grâce à des mesures d'écart de température de l'air entre l'espace urbain et le domaine rural. Il a découvert qu'en moyenne la ville était 0.18 °C plus fraîche durant la journée et 2.05 °C plus chaude durant la nuit, et que l'arrière pays avait une amplitude de variation plus élevée de 2 °C. Manley en 1958, fut le premier à nommer ce phénomène l'îlot de chaleur urbain (ICU) (révisions faites par Kolokotroni et al. 2006). Le terme fut repris et par la suite conservé par tous les climatologues spécialisés dans les espaces urbains et pour toutes les publications (ex :Landsberg 1981). L'intensité d'îlot de chaleur urbain est la différence de température entre l'air circulant localement dans un endroit choisi de l'environnement densément bâti et celle spécifiée par les stations météorologiques situées dans les aéroports, plaines ou collines alentours, sensées pour leur part refléter le climat de l'agglomération. Des études ont été menées dans différentes régions du globe afin de documenter et comparer l'intensité du phénomène, dans les grandes mégalopoles de plus d'un million d'habitants : l'intensité maximale se situe entre 8 et 12 °C pour les villes Nord-Américaines et Européennes respectivement (Santamouris et al. 2003). L'intensité d'ICU présente une variation spatiale à l'intérieur des villes, puisque la formation de ces microclimats est imputable aux aménagements urbains effectués par l'homme. La variation spatiale de la température de l'air dans une ville peut être schématisée selon la figure 1 :

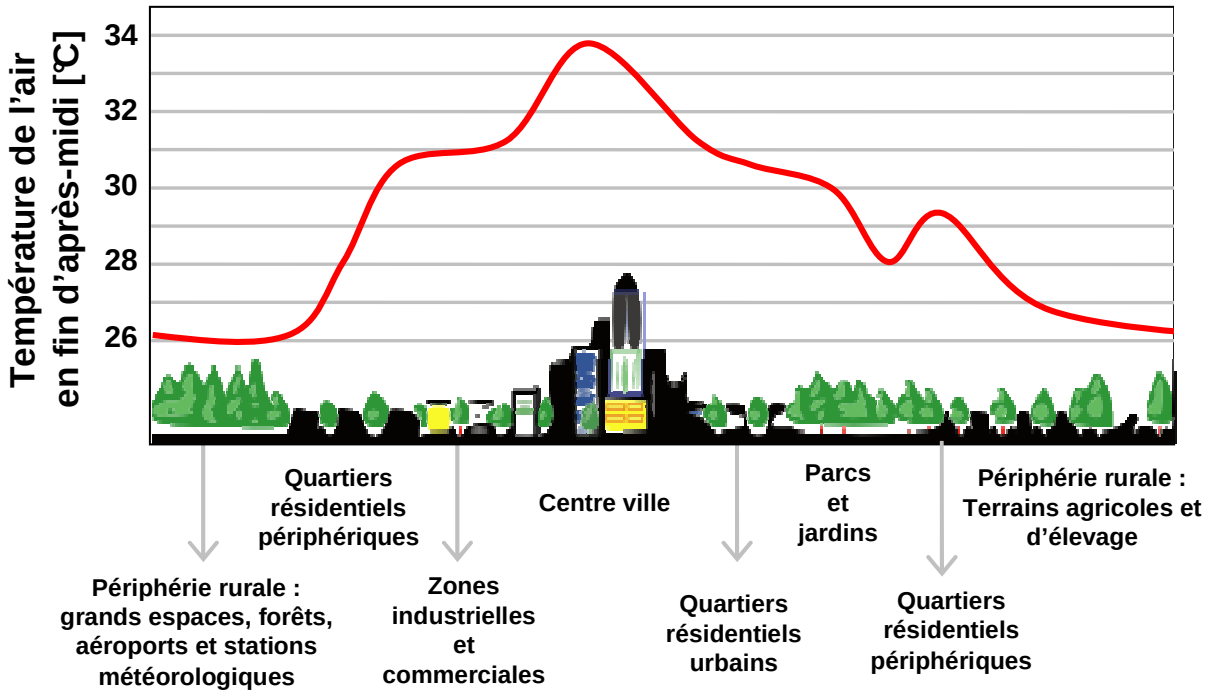


Figure 1 : Profil de la température de l'air en fin d'après midi en fonction du plan d'occupation des sols. (Modifié d'après le document original d'Akbari et de l'Urban Heat Island Group [LBNL website : http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/]

Comme le montre le schéma, la ville a des caractéristiques morphologiques variables regroupées en entités plutôt homogènes, les quartiers. Parmi ces ensembles, il ressort quatre aménagements distincts :

- Le centre ville est dense, caractérisé par une forte concentration de bâtiments à plusieurs étages (par exemple : 15 à 20 m de haut, les rues y sont étroites et la superficie de sols naturels dédiés à la végétation est plutôt rare).
- La zone résidentielle périphérique est constituée de constructions variées selon le type de villes et les origines sociales : des pavillons individuels avec jardin avec des densités de constructions variables ou des hautes tours et des immeubles
- des zones vertes, aménagées en espace d'activités de loisirs où la densité en bâtiments et voiries est faible.
- Les zones industrielles et commerciales regroupent des bâtiments ou des grands ensembles généralement peu élevés mais disposant d'une grande superficie au sol et surtout d'immenses parkings au détriment de la végétation.

L'analyse de l'ensemble urbain montre que les quartiers les plus denses et possédant peu de végétaux sont soumis à la plus forte intensité d'ICU. Nous avons nommé le quartier le plus dense « centre-ville » mais il est convenu que l'aménagement urbain n'est pas toujours dicté par un consensus entre le « centre » et la densité maximale et la distribution peut se révéler plus complexe. Les mesures d'intensité d'ICU sont parfois effectuées de manière ponctuelle dans l'immensité de l'espace urbain (Santamouris 2001), avec au mieux quelques dizaines de stations de mesures. Afin de mieux apprécier la variabilité spatiale des températures et de définir les zones les plus touchées, l'imagerie par télédétection satellite s'est révélée très utile.

Si l'intensité d'ICU est définie comme la différence de température d'air, la mise en parallèle des mesures effectuées pour le caractériser avec des mesures de télédétection montre que celle-ci est liée à des températures élevées des surfaces alentours. La température de surface d'un élément urbain varie selon le bilan énergétique équilibré par les flux provenant des éléments l'entourant. Elle résulte des effets combinés liés aux propriétés radiatives et thermiques des structures, aux flux radiatifs ainsi qu'aux transferts convectifs.

La température de surface terrestre fluctue approximativement entre -40 et 100°C, ce qui correspond à des flux radiatifs émis avec un pic d'émission centré sur les longueurs d'ondes 7 et 11µm respectivement. D'après la loi de Wienn, leurs spectres d'émission se situent dans la bande 5-50µm, qui sera référencée dans le texte comme les grandes longueurs d'ondes (GLO). Le flux radiatif GLO émis est aussi modulé par l'émissivité spectrale et hémisphérique propre liée à la nature et l'état des surfaces observées. Ce flux peut être mesuré par télédétection satellite infrarouge, et après croisement avec une base de données des émissivités monochromatiques directionnelles des surfaces terrestres, une cartographie telle que celle de la figure 2 est obtenue. Elle représente la variation spatiale de la température de « brillance », soit une température équivalente à celle d'un corps noir ayant la même luminance que celle observée au capteur d'infrarouge. Les deux images ont été prises en période diurne à 18 ans d'intervalle et permettent d'apprécier l'augmentation de la superficie et des valeurs de la température de surface de l'environnement urbain de Las Vegas (USA, Californie) après une période d'urbanisation intensive. Seules les surfaces de l'agglomération identifiées comme recouvertes à plus de 60% par des matériaux manufacturés ont été représentées, ces territoires ont également été classés selon leur densité.

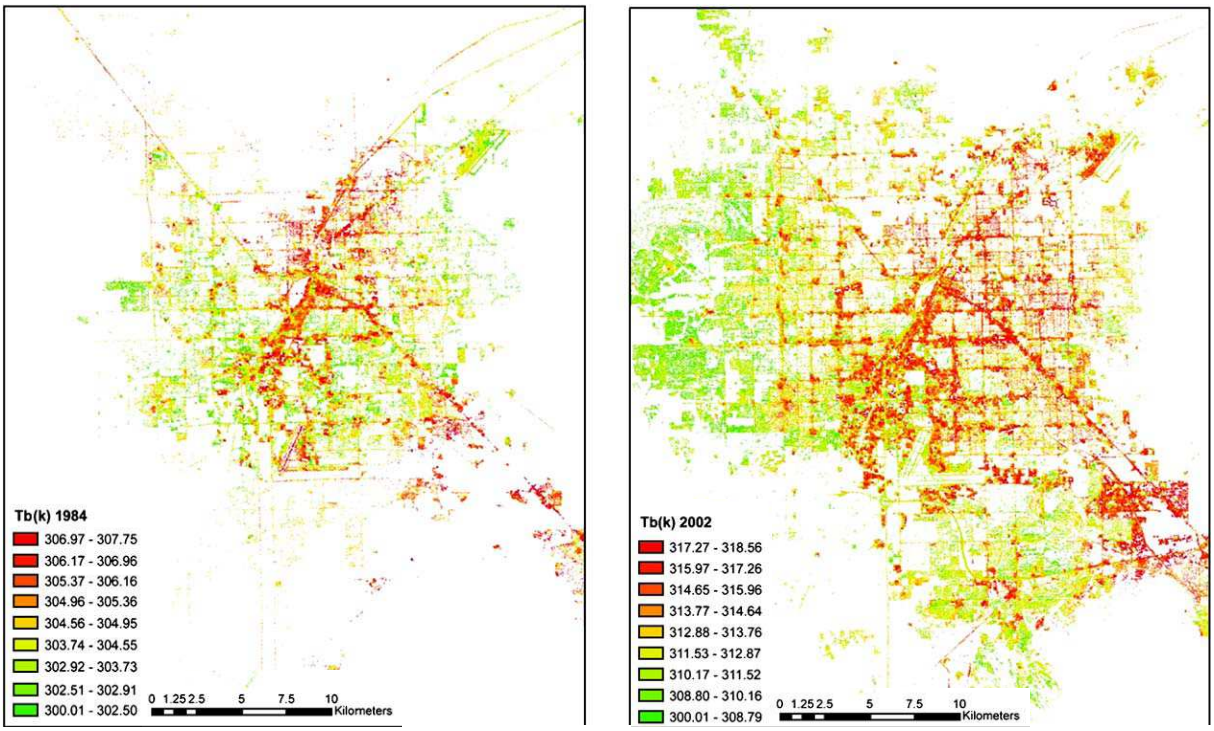


Figure 2 : Température équivalente de corps noir des surfaces urbaines présentant plus de 60% d'imperméabilisation à Las Vegas en 1984 (gauche) puis en 2002 (droite) (Li et al. 2005)

Pour l'aménagement urbain de Las Vegas, la moyenne des températures de surface, ayant une urbanisation supérieure à 10%, est moins élevée que la température rurale de surface des environs désertiques. Néanmoins cette différence diminue de 1984 à 2002 (respectivement -0,85 et -0,35°C) probablement à cause de l'extension urbaine. Les températures de surface maximales occupent le centre et les grandes artères en 1984, ce qui est toujours vrai en 2002 mais on remarque aussi que les températures maximales se sont délocalisées en sous-îlots de chaleur surfaciques à l'est et au sud-est de la carte. La ségrégation cartographique de la température a pu être expliquée par une analyse de l'index normalisé du potentiel de rafraîchissement par la végétation, des hauteurs de bâtiments et des matériaux de construction utilisés. Les températures plus fraîches pour les développements urbains denses de l'ouest de la ville pour 2002, sont liées à une végétation mieux dispatchée et surtout aux matériaux de construction utilisés après les années 1990 tels que les tuiles (remplaçant les toitures en bardage bitumineux) ou les enduits clairs de façade qui ont fait leur apparition.

L'étendue urbaine progresse, les quartiers se densifient pour optimiser l'espace, son prix et sa disponibilité (Santamouris 2001) et on assiste à une dénaturalisation des surfaces couvrant le sol, la part des surfaces construites, et souvent imperméables, prend le dessus sur celle des surfaces naturelles (végétales ou minérales).Toutes les études s'accordent pour dire qu'en journée, les températures les plus chaudes sont localisées sur les grandes étendues de matériaux imperméables sans végétation et ombres portées comme les aéroports, zones industrielles commerciales, aménagements sports et loisirs bitumés, parkings ou toiture-terrasses de bâtiments type hôtels (Streutker 2003; Stathopoulou et al. 2007). Par contre, de jour comme de nuit, les grandes avenues bordées de bâtiments hauts ou de gratte-ciels avec de faibles facteurs de forme sur le ciel présentent également des températures élevées (quadrillage dans la Figure 2). Des campagnes de mesures par caméras infrarouges montées sur des véhicules (2 caméras IR montées sur une traverse horizontale), des mâts surélevés ou par transport embarqué aéroporté (Voogt et al. 1998; Nichol et al. 2009) ont restitué l'impact de la nature des surfaces verticales sur les températures élevées dans les rues profondes et de coupler plus facilement les observations à des mesures de températures de l'air ambiant in situ.

Ces tendances ont été vérifiées par Dousset et al. (2003) pour les villes de Paris et Los Angeles pour des images diurnes et nocturnes. L'intensité d'ICU surfacique trouvée entre toutes ces villes varie fortement les périodes nocturnes, plus développée pour les villes avec des quartiers très denses (Paris, 7°C), par rapport aux villes ayant une superficie au sol importante mais des structures espacées (Los Angeles, 2 à 4,5°C). L'hypothèse la plus souvent validée par l'analyse étant que l'intensité décroit avec la distance du point observé aux limites « naturelles » de la ville, avec donc des effets de puits de chaleur liés à la présence d'étendues de végétation ou d'eau (Oke 1987 ;Nichol et al. 2009).

Toutes ces études montrent la corrélation entre l'aménagement, la géométrie et des propriétés radiatives de la surface urbaine dans le développement de d'îlot de chaleur de surface cependant la relation à l'effet d'ICU atmosphérique n'est pas évidente. Même si, théoriquement, l'équilibre des flux de chaleur aux surfaces urbaines définit leurs températures et celles des volumes d'air adjacents. Les conséquences de cette hausse sur la population ont été répertoriées dans de nombreuses études.

La notion de confort thermique au cœur de la ville constitue le premier ressenti de la population sur la hausse des températures. Cette problématique a été étudiée pour améliorer la définition des espaces urbains et des activités qui y sont liées (Gagge et al. 1986 ; Matzarakis et

al. 2008 ; Pearlmutter et al. 2007). À l'intérieur des bâtiments, le confort thermique est largement étudié et quantifiable par exemple par les indices de confort conçus par le Pr Fanger (1972).

La dégradation du confort thermique des habitants implique le recours à l'utilisation de système de rafraîchissement mécanique à l'intérieur des bâtiments. Il en résulte donc une augmentation des consommations énergétiques et du pic de puissance électrique liées au fonctionnement des bâtiments. En partant des relevés de 26 stations météorologiques d'Athènes en Grèce pendant l'été 1996, Santamouris et al. (2001) ont réalisé des simulations thermiques pour un bâtiment type. Ils ont démontré que les températures élevées entrainaient une multiplication par 2 de la puissance installée dans les quartiers les plus denses et que sans respect de la consigne de température fixée, le pic de demande électrique journalier pouvait tripler. De plus les températures élevées réduisant le coefficient de performances des climatiseurs d'environ 25%, cela appelle la prescription d'une puissance plus importante lors de l'étude de dimensionnement thermique, intensifiant ainsi les problèmes de consommation électrique à l'échelle de la ville. Une étude quasiment similaire a été menée à Londres (Watkins et al. 2002), les résultats des simulations énergétiques indiquent que pour un bâtiment de bureaux standard, la consommation énergétique liée au rafraîchissement est 25% plus élevée en centre ville que dans la périphérie rurale alors que les gains relatifs à la consommation en chauffage atteignent les 22% sous l'effet de l'ICU. Akbari (2005) rapporte que suite à de nombreuses observations sur les villes Nord-Américaines, par ciel clair lors d'un après-midi d'été, la température de l'air d'une ville typique est au moins 2,5 °C plus haute que les espaces ruraux alentours. Ses observations de la production énergétique aux centrales locales ont montré que le pic de demande électrique sur la zone urbaine s'élève de 2 à 4 % pour chaque 1 °C pris lorsque la température dépasse 20°C. Il considère que l'effet d'ICU est responsable à hauteur de 5 à 10 % du pic de demande électrique. Les relevés de consommation fournis par le principal distributeur d'électricité de Tokyo, la Tokyo Electric power Co, indiquent que pour une augmentation de 1°C de la température de l'air, la demande électrique augmente de 1,8 GW, ce qui représente 3% de la puissance initialement fournie (Murakami 2006). Devenu quasiment indispensables, on assiste à une explosion du marché des climatiseurs. Une étude statistique de l'IEA rapporte que le marché des systèmes de climatisation, uniquement dans les pays de l'OCDE, a augmenté de 13% entre 1990 et 2000. En 2007, les États-Unis ont cédé leur place de consommateurs numéro un sur le marché de la climatisation à la Chine, où le

marché des appareils à faible capacité a fait un bond de 14% entre 2006 et 2007. De plus, la demande électrique à traiter sollicite l'augmentation de la capacité des centrales de productions d'énergie primaire, ce qui fait revoir à la hausse le prix du kilowattheure électrique.

L'augmentation des températures a des répercutions directes sur les besoins en énergie de fonctionnement des bâtiments. Si le maintien de températures extérieures hautes entraîne une augmentation des consommations en rafraîchissement d'été, logiquement cela implique une diminution des besoins en chauffage durant l'hiver (Santamouris et al. 2001). Á ce propos, la campagne expérimentale CAPITOUL sur l'îlot de chaleur urbain de la ville de Toulouse, a montré une comparaison originale en s'appuyant sur l'observation des échanges entre les surfaces du centre ville et de la première couche atmosphérique (Pigeon et al. 2008). Le bilan d'énergie en période hivernale a démontré que le chauffage, et donc les pertes de chaleur au niveau des façades des bâtiments, constituait un poids important dans la formation de l'ICU. La généralisation des traitements de l'ICU ne peut être appliqué à toutes les villes, il se peut aussi que l'ICU ait un rôle positif, Davies et al. (2008) relèvent que l'intérêt actuel est focalisé sur la tentative d'améliorer le potentiel des villes face à la surchauffe pendant l'été, s'appuyant principalement sur l'effet des canicules récentes. Cependant, une vue d'ensemble de chaque ville doit être considérée, par exemple les caractéristiques intrinsèques de la ville de Londres montrent que l'ICU tend à augmenter la charge en climatisation pendant la période estivale et le nombre de morts dû aux vagues de chaleur. Inversement, en hiver, les effets d'ICU tendent à réduire les besoins en chauffage et à diminuer la mortalité relative au froid. Ils formulent l'hypothèse plausible que l'ICU de Londres puisse avoir un bilan d'énergie nette, de confort et de santé positif intégré sur l'année. Néanmoins, beaucoup de villes soumises à l'ICU, situées dans des climats chauds ou à tendance tropicale ont peu ou pas de demande en chauffage (Kikegawa et al. 2006).

Outre l'aspect économique, la production d'énergie primaire participe aux rejets de polluants qui détériorent la qualité de l'air aux alentours des sites urbains et la production de gaz participants à l'effet de serre (CO_2) (Landsberg 1981). De plus la ville est un environnement exposé à une pollution atmosphérique dont l'essentiel de la contribution provient des gaz d'échappement. L'ICU participe à la pollution atmosphérique de par la dépendance de la concentration de certains polluants à la température de l'air, en particulier les oxydes d'azote (NO_x), et les composés organiques volatils (COV) (Akbari et al. 2001). La combinaison chimique de ces deux polluants associée à une réaction photochimique donne lieu à des épisodes

de Smog urbain, qui entraînent la formation de deux autres polluants fortement nocifs (Taha 2008), l'ozone troposphérique (0_3) et les particules fines ($PM_{2,5}$).

La multiplication des canicules et des vagues de chaleur en combinaison avec le phénomène d'ICU a des répercussions sur la mortalité et les admissions en hôpital pour épuisement dû à la chaleur ou pour maladies d'ordre cardio-vasculaires ou respiratoires (Corburn 2009). Parfois, le manque de solutions pour pallier à ces épisodes exceptionnels s'est avéré dramatique (15000 morts en France, 20000 en Italie pour la canicule d'août 2003). L'espérance de vie des populations urbaines diminue (Conti et al. 2005) et marque les inégalités sociales, de part l'accès limité au confort et à l'énergie des populations pauvres (Harlan et al. 2006, Santamouris et al. 2003).

Bien que les surfaces urbaines comptent pour 3% de la couverture terrestre disponible à l'échelle du globe (Mills 2008), d'après l'agence internationale de l'énergie (IEA), en 2006, les deux-tiers de l'énergie consommée à l'échelle mondiale servaient uniquement à couvrir les besoins des villes et de fait, celles-ci comptaient pour plus de 70% des rejets de CO_2 dans l'atmosphère (IEA). En considérant les tendances d'urbanisation, l'IEA prévoit, selon un scénario de référence, des consommations urbaines comptant pour 73% de la consommation mondiale d'ici 2030. Les chiffres de 2008 relatent que plus de la moitié de la population mondiale, aujourd'hui supérieure à 6 milliards d'hommes, est concentrée dans des espaces urbains (3,3 milliards selon l'UNFPA, http://www.unfpa.org).

En 1950, les citadins étaient estimés à 200 millions à travers le monde mais d'ici 2030, si la tendance actuelle est respectée, les statistiques estiment qu'ils dépasseront les 5 milliards d'individus. En réponse à une croissance démographique soutenue et à la migration urbaine des populations rurales remarquables aux cours des cents dernières années, les agglomérations ont connu une expansion rapide de leur superficie (phénomène d'urbanisation) aux dépends des espaces ruraux. Devant la rapidité du phénomène et la conservation des plans d'urbanisme traditionnels, le développement de problèmes environnementaux liés à la gestion des espaces urbains est devenu inévitable. Les propriétés thermiques et radiatives des surfaces urbaines, la hauteur des bâtiments, l'expansion de la surface urbaine exposée aux variations météorologiques, les apports anthropiques dont les rejets de chaleur liés aux consommations énergétiques entrainent l'augmentation des échanges thermiques avec l'air environnant. Il en résulte une hausse des températures de l'ensemble de l'agglomération comparée aux températures de ses

alentours naturels qui n'ont pas subi de modification. Dès lors, on assiste à une hausse de la demande de puissance relative à la climatisation des bâtiments constituant cet environnement dense et peuplé. Ce phénomène associé à la revalorisation des standards de consommation actuels et aux manifestations du réchauffement climatique (canicules) contribue à la croissance de la demande en énergie pour le rafraîchissement à l'échelle mondiale, même dans les pays réputés pour leur faible demande comme les pays Européens (Adnot et al. 2004). Pour rester cohérent avec la démarche de développement durable et les objectifs quantitatifs sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre fixés par les accords de Kyoto, les villes doivent entreprendre les démarches nécessaires pour réduire leurs températures. L'objectif de cette thèse va être d'estimer les performances d'une solution proposée pour encourager les habitants à réduire leur dépendance à la climatisation dans les bâtiments existants.

L'état de l'art de cette thèse, sera consacré à l'inventaire des mécanismes physiques qui régissent l'ICU, pour ensuite identifier les traitements existants pour réduire les températures urbaines et les consommations qui y sont associées. Comme démontré par les images satellites et les campagnes in-situ, l'ICU est un phénomène qui est réparti sur l'ensemble de la superficie des agglomérations, néanmoins son intensité est beaucoup plus élevée au cœur des constructions denses. Ces zones nécessitent donc une attention prioritaire mais sont aussi les plus restreintes au niveau du champ d'action qu'elles proposent.

L'utilisation de surfaces réflectives dans le spectre solaire et émissives dans les infrarouges thermiques est l'une des propositions pour réduire la demande énergétique des bâtiments, cette solution peut être achevée à l'aide d'une simple couche de peinture. De nombreux travaux rapportés dans le chapitre bibliographique ont été menés sur les toitures, cette technique n'est pas optimisée pour traiter la demande énergétique des bâtiments de plusieurs étages que l'on retrouve dans les centres urbains denses. Ma contribution consistera à étudier les performances de façades réfléchissantes dans le spectre solaire appliquée dans des espaces confinés où le piégeage radiatif est important.

La thèse est écrite en quatre chapitres :

- Le premier chapitre bibliographique présente les outils existants pour étudier le phénomène d'ICU et son couplage à la demande énergétique des bâtiments. Les résultats des travaux sur diverses techniques de traitement de l'îlot de chaleur et sur les toitures réfléchissantes sont également présentés.

- Le second chapitre est consacré à l'étude expérimentale de la modification du bilan thermique à la surface des revêtements. Le traitement des mesures d'un banc expérimental a permis l'estimation simultanée des propriétés radiatives, et des coefficients de convection d' éléments peints.
- Le troisième chapitre explique la mise en œuvre de modèles réduits à l'échelle 1/10ème de bâtiments, disposés en forme de rue, instrumentés pour mesurer un phénomène de confinement thermique. Les rues construites, ont permis de mesurer l'effet de confinement thermique lié à une géométrie particulière de l'environnement urbain, le canyon. Après quoi, trois configurations des propriétés radiatives aux façades des canyons ont été étudiées vis-à-vis de la réduction potentielle des températures de surface et d'air sur la scène urbaine ainsi qu'à l'intérieur des bâtiments pour une scène urbaine aux caractéristiques uniques.
- Dans le dernier chapitre, des simulations solaires visent à caractériser le piégeage radiatif lié à la distribution des propriétés optiques aux surfaces d'un canyon. Puis la simulation d'un cas d'étude sur modèle couplé d'interactions entre l'environnement urbain et la demande énergétique des bâtiments nous a permis d'étudier les effets des propriétés radiatives des façades sur l'îlot de chaleur urbain et sur la consommation énergétique annuelle.

1. État de l'art sur le traitement de l'îlot de chaleur urbain (ICU)

L'ICU participe à la dégradation de l'environnement de la ville vis-à-vis de la performance énergétique des bâtiments et du confort des espaces extérieurs et habités. Le développement de solutions d'atténuations passe par l'identification des processus physiques présentés ci-après. Les modèles développés ont permis de montrer le potentiel de solutions de traitement des surfaces urbaines telles que celle envisagée dans notre étude.

1.1. Processus physiques de formation de l'ICU

Actuellement, l'utilisation systématique de données climatiques régionales, peu représentatives des spécificités des sites urbains, dans des logiciels de simulations énergétiques du bâtiment performants (EnergyPlus, TRNSYS…) induit des erreurs de dimensionnement importantes (Williamson et al. 2001). La mise en œuvre de systèmes de chauffage, climatisation et ventilation mal adaptés entraine une surcharge des réseaux de production énergétique parfaitement évitable. Dans l'introduction, les effets néfastes estimés sur les consommations énergétiques de bâtiments situés à Athènes et Londres ont été calculés grâce à des données météorologiques in situ mais la disponibilité de telles données est rare.

De plus, la complexité du tissu urbain est responsable des conditions particulières, par conséquent il y a autant d'irrégularités météorologiques dans une ville qu'il y a de structures urbaines différentes. L'exigence actuelle est donc à la prédiction de données urbaines représentatives à l'aide de modèles analytiques et numériques pour pouvoir renseigner les modèles sur les conditions climatiques locales (Best 2006). L'interaction de ces deux exigences devrait permettre l'étude de stratégie de rénovation énergétique applicable à l'échelle d'un plan d'urbanisme pour des conditions atmosphériques de meilleure qualité.

1.1.1. Notions de climats et microclimats

Les vagues de chaleur qui focalisent l'attention des populations sont la conséquence d'évolutions climatiques à grande échelle. Les zones climatiques sont définies par les moyen-

nes des paramètres physiques qui constituent les conditions atmosphériques au dessus d'un territoire défini sur une période de temps suffisamment étendue. La formation d'un climat à petite échelle par rapport à la superficie terrestre résulte de la composition statistique d'un ensemble d'événements météorologiques à différentes échelles (Landsberg 1981).

A l'échelle synoptique, le climat est relatif aux caractéristiques astronomiques de la Terre et à la distribution spatiale entre les terres et les étendues d'eau qui génère des vents entre les dépressions et les anticyclones. Ces zones climatiques globales présentent des variations à dimension régionale, où les conditions climatiques sont dépendantes des caractéristiques topographiques. On peut alors prévoir des tendances comportementales des vents locaux à l'intérieur de la couche limite atmosphérique (brises de mer, brises de terre, canalisation des vents dans les vallées…), ainsi que des variations d'amplitude pour les températures saisonnières, diurnes et nocturnes. La figure 3 montre les couches atmosphériques de la troposphère qui sont affectées par la rugosité et les échanges de chaleur de l'environnement urbain.

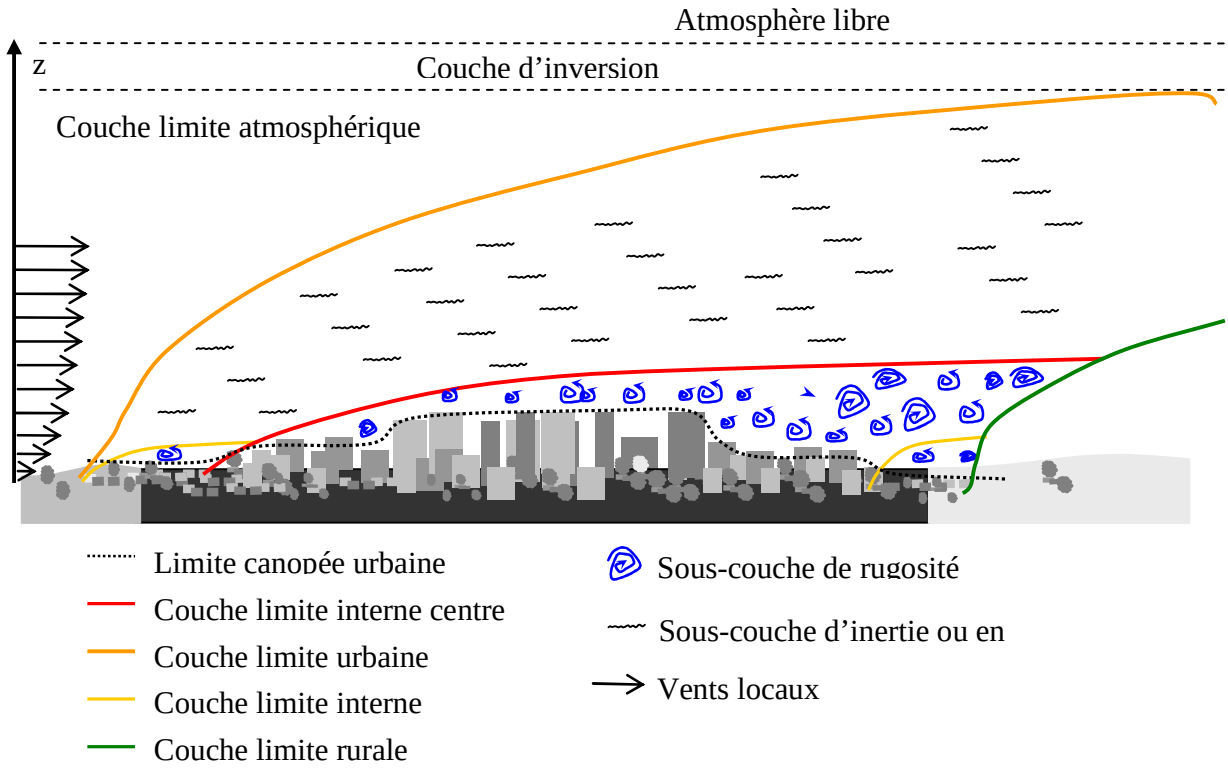


Figure 3 : Représentation de la couche de surface et de ses sous-couches au dessus d'un sol hétérogène

L'influence de la surface terrestre dans les phénomènes atmosphériques se limite à la troposphère qui s'étend dans les 2 km au dessus de la surface, la couche limite urbaine qui se déve-

loppe au dessus d'une ville est le résultat de la combinaison de la rugosité aérodynamique du tissu aux vents locaux et de transferts turbulents sensibles et latents provenant d'en dessous de la canopée urbaine. L'importance de ces transferts de chaleur et d'humidité au-delà de la canopée est dépendante du taux de refroidissement de l'air avec la hauteur. Sa valeur par rapport à un gradient adiabatique de référence pour les conditions « neutres » indique la stabilité de l'atmosphère et la hauteur de la couche d'inversion (Bozonnet 2005). Lorsque l'air se refroidit peu avec l'altitude, les échanges de masse et de chaleur au dessus de la ville diminuent et la température sous la canopée s'échauffe. L'échelle de la ville correspond à une dimension entre les méso-climats et les microclimats, la limite entre les deux termes n'est pas bien définie, on classe aussi ces 2 manifestations sous le terme « local ». On peut relier leur appartenance à l'importance des phénomènes météorologiques qu'ils provoquent sur les dimensions spatiales verticales et horizontales.

Le développement de microclimat peut se distinguer à l'échelle de quelques dizaines de mètres seulement. Il peut résulter de l'effet thermique d'une ombre portée, de l'humidité apportée par la végétation dans un environnement bâti ou des champs de pression induits par le vent sur une construction élevée. Le microclimat est le résultat de la cohabitation de climats spécifiques à toutes les échelles sur terre, chaque phénomène a une influence plus ou moins marquée sur les conditions météorologiques en un point. La méso échelle distingue le climat de la ville et de son environnement rural proche sous la couche limite atmosphérique. Les modifications des températures et vitesses de l'air moyennées à l'ensemble de la couche limite urbaine appartiennent à l'échelle locale. Les modifications météorologiques sous les couches limites internes à l'échelle des aménagements territoriaux intra-urbains (type de quartiers) sont qualifiées de phénomènes microclimatiques ainsi que les phénomènes dus à l'influence de morphologies particulières.

1.1.2. Formalisation du bilan énergétique à l'échelle d'une ville

Les campagnes expérimentales menées par les climatologues démontrent que le phénomène d'ICU affecte uniquement les basses couches de l'atmosphère (Pigeon et al. 2008). Ainsi les échanges d'énergie et de matières à caractériser peuvent se réduire aux processus de transferts élémentaires relatifs à une surface urbaine prise dans son ensemble. L'équation de bilan énergétique d'une entité de surface urbaine définie est traduite par l'équilibre entre ses termes « sources » et ses termes « puits » d'énergie. L'approche utilisée par beaucoup de météorolo-

gues pour établir le bilan énergétique d'une surface fictive modifiée est décrite par Oke (1987), elle consiste à considérer tous les flux entrant et sortant d'un volume de contrôle élémentaire s'étendant de quelques mètres sous la surface apparente du sol au sommet des bâtiments (Figure 4).

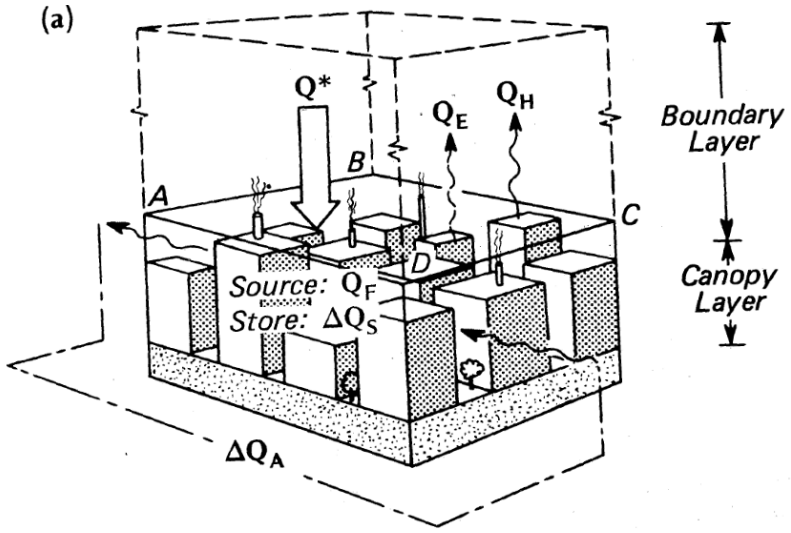


Figure 4 : Schéma des flux impliqués dans le bilan énergétique d'un volume entre le sol et la canopée urbaine (Oke 1987).

La limite haute du volume constituée par la hauteur moyenne des toitures (ABCD) est appelée canopée urbaine par analogie avec les canopées végétales que l'on retrouve dans les forêts. L'échelle privilégiée s'apparente alors à une approche macroscopique, et l'équation s'écrit :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \qquad \text{Équation 1}$$

- Q^* est le flux de rayonnement absorbé, toutes longueurs d'ondes confondues,
- Q_F est le dégagement de chaleur produit par l'ensemble des activités humaines, terme toujours positif aussi appelé flux anthropique,
- Q_H et Q_E représentent les flux turbulents de chaleur sensible et latente perdues, comptés positifs lorsque qu'ils s'effectuent de la surface vers l'atmosphère,
- ΔQ_S est la perte d'énergie interne par unités de temps et de surface de l'ensemble du volume de contrôle incluant les bâtiments. C'est un terme « puits » en journée avec l'accumulation par les matériaux de construction, et un terme « source » pendant la nuit lorsque qu'il restitue la chaleur stockée.

- ΔQ_A est le flux perdu par advection moyenne de chaleur à travers l'ensemble des interfaces du volume de contrôle. Les termes échangés au niveau de l'interface avec la couche limite urbaine sont dépendants des échanges avec la surface urbaine et des conditions atmosphériques à l'échelle régionale.

Le flux de rayonnement absorbé par les surfaces urbaines englobe deux composantes traitées séparément qui sont :

- La fraction du flux solaire incident qui pénètre dans le volume de contrôle sans en ressortir, définie selon une absorptivité solaire effective globale, α_{sol} , à l'échelle de la ville
- Le bilan radiatif entre la part absorbée du flux de grandes longueurs d'ondes (GLO) incident émis par la voûte céleste comptée positive et la part du flux GLO émis par l'ensemble de la surface urbaine quittant le volume de contrôle, régulée par une émissivité GLO effective globale, ε_{GLO} prenant en compte les aspects d'isotropie des surfaces urbaines

La formule classique du bilan radiatif le volume urbain est :

$$Q^* = \alpha_{sol} \cdot E_{sol} + \varepsilon_{GLO} \cdot \sigma\left(T_{ciel}{}^4 - T_S{}^4\right) \qquad \text{Équation 2}$$

Où E_{sol} est l'éclairement global provenant du soleil, T_{ciel} la température équivalente du ciel et T_{S}, la température moyenne des surfaces urbaines. Le rayonnement solaire incident est une variable cyclique dont les schémas de variation spatiale et temporelle sont très bien définis mais dont l'intensité est sujette à des modifications par absorption, diffraction et diffusion atmosphérique qui a pour effet de diminuer cette intensité d'une manière générale dans toutes les longueurs d'onde et plus fortement dans certaines bandes d'absorption moléculaire des composants de l'atmosphère terrestre. Les composantes principales sont :

- L'air sec
- La vapeur d'eau atmosphérique
- Les particules aérosols

Le rayonnement solaire modifié par diffraction et diffusion s'éparpille dans l'atmosphère de manière isotrope (rayonnement diffus) à l'instar du rayonnement direct non modifié qui est directionnel. L'absorption des photons par les molécules ou particules précitées conduit celles-ci à augmenter leur niveau d'énergie et ainsi modifie leur émission propre à une longueur

d'onde différente. Le rayonnement GLO incident est déterminé par une température équivalente de la voûte céleste qui fait référence à la combinaison des niveaux d'énergie émis par les gaz atmosphériques, principalement le CO_2, l'ozone (O_3) et la vapeur d'eau. Ce procédé implique la masse, la constitution moléculaire et la distribution de température dans la colonne d'air dans la couche atmosphérique (Pérez-García 2004). La formation temporaire et variable de corps nuageux dans l'atmosphère, par leur distribution et leur densité modifie radicalement le comportement de ces deux rayonnements. Il est donc important de les distinguer du reste de l'atmosphère. Dans les simulations simplifiées, la quantité de nuage présente dans le ciel est simplement caractérisée par la nébulosité *N*, dont l'unité est appelée octas. Cet indice de couverture du ciel, représente en fait l'angle solide dessiné par la couverture nuageuse en prenant en compte le 8ème d'angle solide du ciel visible, par exemple $N = 0/8$ pour un ciel clair et 8/8 pour un ciel totalement couvert (Chain 2004). Alors que l'intensité du rayonnement solaire est fortement diminuée par la présence de nuage, l'intensité du rayonnement GLO incident est plus forte lorsque le ciel est totalement couvert.

1.1.3. Mécanismes affectant les espaces urbains et ruraux

Pour faire ressortir la spécificité des termes du bilan thermique entre les territoires urbains et les territoires ruraux couverts de végétaux, nous allons comparer leur comportement diurne et nocturne. Cette configuration de périphérie végétalisée n'est pas vraie pour toutes les villes, par exemple Abu Dhabi ou Las Vegas situées au cœur d'étendues désertiques, mais elle reflète bien le cas des agglomérations européennes. En période diurne, les valeurs d'éclairement solaire et GLO exprimées dans le terme radiatif du bilan énergétique sur un volume rural et un volume urbain peuvent être considérées équivalentes, même s'il est acquis que la pollution urbaine constitue un ultime rempart au rayonnement et diminue sensiblement l'éclairement solaire (Codato et al. 2008) et augmente celui fournit par les GLO (Gomes et al. 2008). Dans la journée, on constate une réduction importante du flux de chaleur latente urbain en comparaison à celui affectant les surfaces rurales. Cette caractéristique est due à l'utilisation massive de matériaux rendant les surfaces imperméables et par conséquent à la raréfaction des végétaux et des réserves d'eaux disponibles pour dispenser la chaleur par évaporation. Pigeon et al. , (2008) considèrent que le rapport Q_E / Q^* dans une zone rurale est supérieur à 0,5 alors que dans les zones urbaines denses celui-ci est compris entre 0,1 et 0,2. Christen et al. (2004) ont réalisé des mesures météorologiques dans la ville et la périphérie de Bâle, en Suisse. Cette

ville moyenne (400 000 habitants, 130 km² d'emprise au sol pour la surface bâtie) a montré une différence claire de sensibilité des apports sensibles et latents entre le centre ville, sa périphérie résidentielle moins urbanisée et la périphérie rurale. La figure 5 montre la répartition diurne moyenne du flux de chaleur net amené par le bilan radiatif et des autres composantes du bilan énergétique pour 5 sites mesurées pour l'été 2002. Le ratio de Bowen, noté β, représente le rapport entre le flux sensible et le flux latent perdus aux surfaces urbaines.

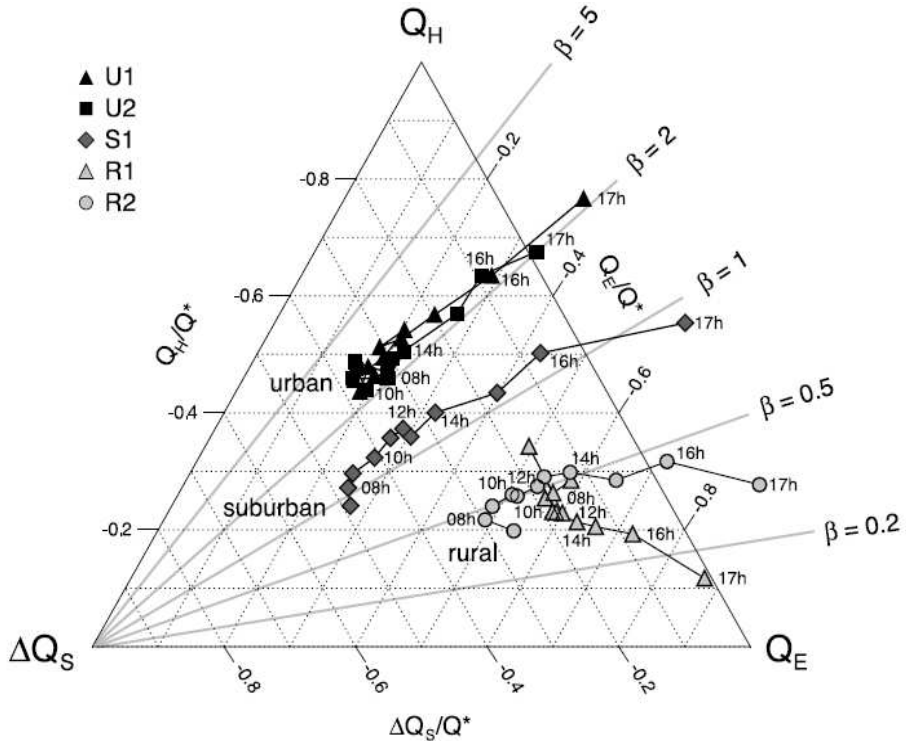


Figure 5 : Répartition des composantes énergétiques mesurées, le flux sensible, latent et la variation d'énergie interne à la surface de sites choisis dépendamment de l'influence du bilan radiatif Q* (Christen et al. 2004)

Les signes des grandeurs indiquées sont inverses à l'équation de bilan présentée ci-dessus. Les ratios Bowen élevés des sites plutôt imperméabilisés et secs (centre ville), à l'instar de ceux couverts de végétation (périurbain), reflètent la disponibilité d'une plus grande quantité de l'énergie solaire pour le terme « puits » de stockage par les matériaux (ΔQ_S), et pour les échanges convectifs surfaciques avec l'air provoquant l'élévation de sa chaleur sensible (Q_H).

En ville, la surface d'échange développée augmente considérablement du fait des configurations géométriques ce qui accentue le potentiel de stockage. Le terme radiatif (Q^*) est particulièrement élevé dans les rues de type « canyon », où la largeur est moins importante que la

hauteur des deux bâtiments dont elle est flanquée. Le rayonnement solaire pénétrant dans l'ouverture de la rue, intègre un processus d'inter-réflexions et de multiples absorptions avec l'ensemble des surfaces de la rue et les locaux vitrés, et la part du flux radiatif réfléchi vers l'atmosphère s'en trouve diminuée. Ce piège radiatif est aussi valable pour le rayonnement thermique GLO émis par les surfaces, qui a cause de la vision réduite du ciel ne peut profiter pleinement du potentiel de rafraichissement offert par la voûte céleste, amenuisant ainsi le refroidissement des surfaces verticales et de la chaussée. Le potentiel de refroidissement des toitures est relativement plus élevé à cause de leur grand facteur de forme avec la voûte céleste et de leur moindre rugosité mais en règle générale la forte capacité calorifique des matériaux de construction utilisés et les valeurs plus faibles de leurs propriétés radiatives de réflectivité solaire et d'émissivité GLO font que les toitures demeurent plus chaudes que beaucoup de surfaces rurales. Indépendamment du facteur de forme des surfaces vers le ciel, le rafraîchissement radiatif nocturne n'est significatif que par ciel clair lorsque la température fictive du ciel est considérablement plus basse que celle des surfaces urbaines (Kolokotroni et al. 2008).

La forte surface développée pourrait laisser penser à un potentiel de refroidissement par convection turbulente optimisé mais le confinement des structures constitue un terme de résistance mécanique pour les écoulements d'air. Les vitesses de l'air sont considérablement réduites, minimisant ainsi l'évacuation de la chaleur mais aussi des polluants. Pendant la nuit, les échanges de chaleur sont très faibles dans les zones rurales. Les nuits d'été, par vents locaux faibles et ciel clair, les conditions atmosphériques en dessous de la canopée se retrouvent « détachées » de l'atmosphère sus-jacente considérée comme neutre ou stable. Cette situation entrave le transfert vertical de chaleur (Q_H) et d'humidité (Q_E) ainsi que le transport des polluants qui se retrouvent piégés sous la canopée. Une sorte de mini-effet de serre se développe et entraîne l'augmentation du bilan radiatif GLO net des surfaces urbaines, ce sont les conditions idéales pour identifier le phénomène d'ICU (Mills 2008).

Les rejets thermiques liés à l'activité humaine constituent eux aussi une source de chaleur cyclique de l'environnement urbain. De nombreuses études les ont estimés entre 5 et 150 W/m² selon l'urbanisation et la saison (Offerle et al. 2006) avec aussi des cas extrêmes comme ceux évalués jusqu'à 1590 W/m² dans certains quartiers de Tokyo (Ichinose et al. 1999). Cette source de chaleur anthropique est largement influencée par le métabolisme humain (densité de population), le chauffage urbain en hiver et le trafic routier. Lors des périodes estivales, on s'aperçoit que la source anthropique principale est liée au conditionnement des bâtiments, les

condenseurs des unités de climatisation dissipent leur chaleur à l'extérieur des bâtiments et auto-entretiennent ce phénomène d'élévation de température. Par ailleurs, le fonctionnement des systèmes de rafraîchissement se trouve entravé puisque la différence de température plus importante au condenseur réduit leur efficacité énergétique (Hassid et al. 2000; Papadopoulos 2001).

1.2. Modélisation de l'ICU

Les outils de modélisation de ces phénomènes doivent être choisis ou adaptés en fonction de la destination du résultat. Pour simuler un environnement reflétant les résultats mis en valeur par les campagnes expérimentales de mesures, il est souvent nécessaire de coupler différentes échelles spatiales et temporelles. La représentation du climat régional peut être réalisée par forçage des fichiers de données de conditions météorologiques représentatives ou par simulation à l'aide de modèle météorologique synoptique à précision régionale.

1.2.1. Modélisation à l'échelle locale de la canopée urbaine

Les modèles météorologiques synoptiques et méso-échelles sont utilisés pour les études numériques des phénomènes de réchauffement urbain en se limitant à la troposphère (Dupont 2001). La taille des mailles horizontales de ces modèles varie entre 1 et 2 km, auxquelles on confère des caractéristiques moyennées telles que la réflectivité solaire, les ratios d'aspect géométrique des structures, la longueur de rugosité ou l'humidité disponible, ils ne sont donc pas capables de prendre en compte l'influence physique induite par la morphologie complexe de la canopée urbaine sur l'ensemble de la couche limite atmosphérique (CLA) au dessus de la ville. La représentation simulée par le modèle méso est plutôt à même de fournir les conditions météorologiques dans la sous-couche en équilibre (ou sous-couche d'inertie) au dessus de la hauteur de mélange (sous-couche de rugosité). Pour une représentation plus réaliste des phénomènes déclenchant les variations de la température et de l'humidité de l'air sous la canopée, les climatologues ont adopté des modèles de canopée urbaine plus raffinés (souvent à 1 dimension) pour établir les conditions météorologiques propre au milieu urbain.

Les modèles de canopée à une dimension ont été développés pour être couplés avec les modèles météorologiques méso échelles. Les hétérogénéités urbaines sont exprimées de manière simple et condensée, généralement une forme urbaine très simplifiée est utilisée pour repré-

senter la surface type : il peut s'agir de répétitions de blocs à base carrée ou de répétitions de rues de longueur infinie, comme par exemple des rues type « canyon ». On peut citer :

- le modèle TEB (Masson 2000) qui n'est applicable qu'à la partie construite des villes et qui ne traite pas les surfaces végétales
- SM2U qui traite l'ensemble des échanges hydriques (Dupont 2001)
- Le modèle CAT (Erell et al. 2006) qui estime la température dans un canyon urbain.

Le rayonnement solaire est calculé de manière à satisfaire l'hypothèse faite d'équiprobabilité des orientations de rues, et de nombreuses simplifications, notamment géométriques, sont utilisées pour gagner du temps de calcul (Lun et al. 2009). Les flux anthropiques sont modélisés par les échanges par conduction des façades et du toit liés à une température de consigne intérieure fixe, mais aussi à des sources moyennées sur les toitures et la chaussée respectivement pour les rejets des cheminées industrielles et du trafic routier. Le bilan énergétique sur le volume d'air dans la rue est défini conformément à l'équation 1. Pour le modèle CAT par exemple les résultats du modèle hydrologique LUMPS (Grimmond et al. 2002) sont utilisés et le stockage et l'inertie du canyon sont caractérisés par les coefficients du modèle « Objective Hysteresis Model » OHM (Grimmond et al. 1991).

La plupart de ces modèles de canopée 1D ont été validés avec les résultats de mesure de champs in-situ ou sur des maquettes à échelle réduite et ils donnent des prédictions acceptables de la température d'ICU (Kanda et al. 2005). Par exemple, les résultats du modèle CAT ont été comparés à des mesures effectuées in situ que l'on peut voir dans la figure 6 :

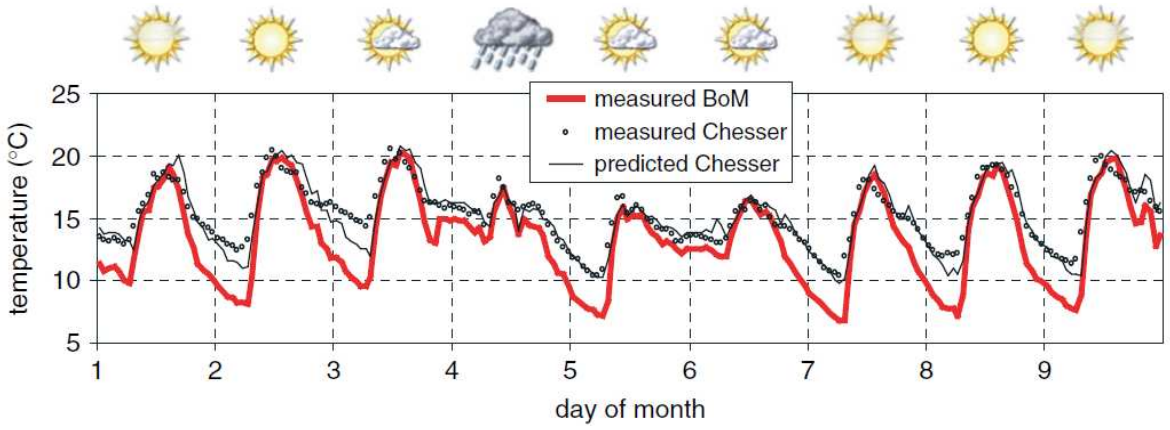


Figure 6 : Comparaison de la température de l'air prédite et mesurée dans une rue canyon à Adélaïde (Australie) pour une période de 9 jours en mai 2000 (hiver) (Erell et al. 2006)

Les données relatives à la température régionale sont également affichées en rouge. La courbe de prévision est plutôt bien corrélée aux mesures de champs. D'après les auteurs, les biais observés entre le modèle et la réalité semblent provenir principalement de l'hypothèse de température d'air uniforme à l'intérieur du canyon et du modèle de rejet anthropique qui est peu détaillé. Néanmoins, ce modèle constitue une bonne approximation de la température pour l'utiliser comme donnée d'entrée dans les modèles de simulation énergétique du bâtiment. Si l'hypothèse d'une température d'air unique sous la canopée permet le calcul à l'échelle de la ville pour estimer l'effet de la morphologie urbaine et du climat régional sur un microclimat, les hypothèses physiques utilisées et la taille de résolution sont encore trop grossières pour des études de consommation énergétique des bâtiments.

1.2.2. Modélisation des échelles microclimatiques : des quartiers aux blocs urbains

L'étude de l'effet d'îlot de chaleur sur les consommations d'énergie dans le bâtiment nécessite une description plus fine des locaux et des échanges avec l'intérieur des bâtiments. Pour cela, des liens sont développés entre les échelles spatiales méso, les modèles de canopée et l'échelle microclimatique par l'ajout d'un logiciel de simulation thermique du bâtiment en bout de chaine (Kikegawa et al. 2003).

La description architecturale et le maillage des surfaces de la scène urbaine permettent un calcul plus raffiné, comme Bouyer (2009) qui a réalisé un couplage dynamique complet entre un logiciel de calcul du rayonnement sur une scène urbaine (SOLENE), qui utilise la méthode des radiosités pour résoudre les échanges radiatifs solaire et GLO, un logiciel de CFD (Fluent), pour la résolution des équations de bilan de masse (air, humidité), de mouvement et d'énergie sur des volumes élémentaires de contrôle, et d'un modèle de bâtiment multizones.

Une distribution plus réaliste de la stratification des températures de surfaces permet d'affiner le transfert de chaleur par flux conductif dans les bâtiments. La description des conditions thermoaérauliques aux abords de l'enveloppe peut être modélisée de façon très primitive en imposant des profils de vitesse et des coefficients de convection surfacique constants (Krayenhoff et al. 2007) ou par l'utilisation de modèles microclimatiques plus fins comme les codes de dynamique des fluides (CFD). Souvent, un modèle atmosphérique 1D détermine les conditions aux limites soit un profil de vitesse pour les parois verticales du volume considéré et une hauteur limite pour la hauteur.

Le couplage de ces modèles, comme celui illustré dans la figure 7 permet d'affiner l'estimation des charges liées au fonctionnement des bâtiments, l'effet de l'ICU sur les performances des systèmes de rafraîchissement ou de se focaliser sur l'effet des charges latentes et sensibles amenées par l'aménagement de jardins (Bouyer 2009)…

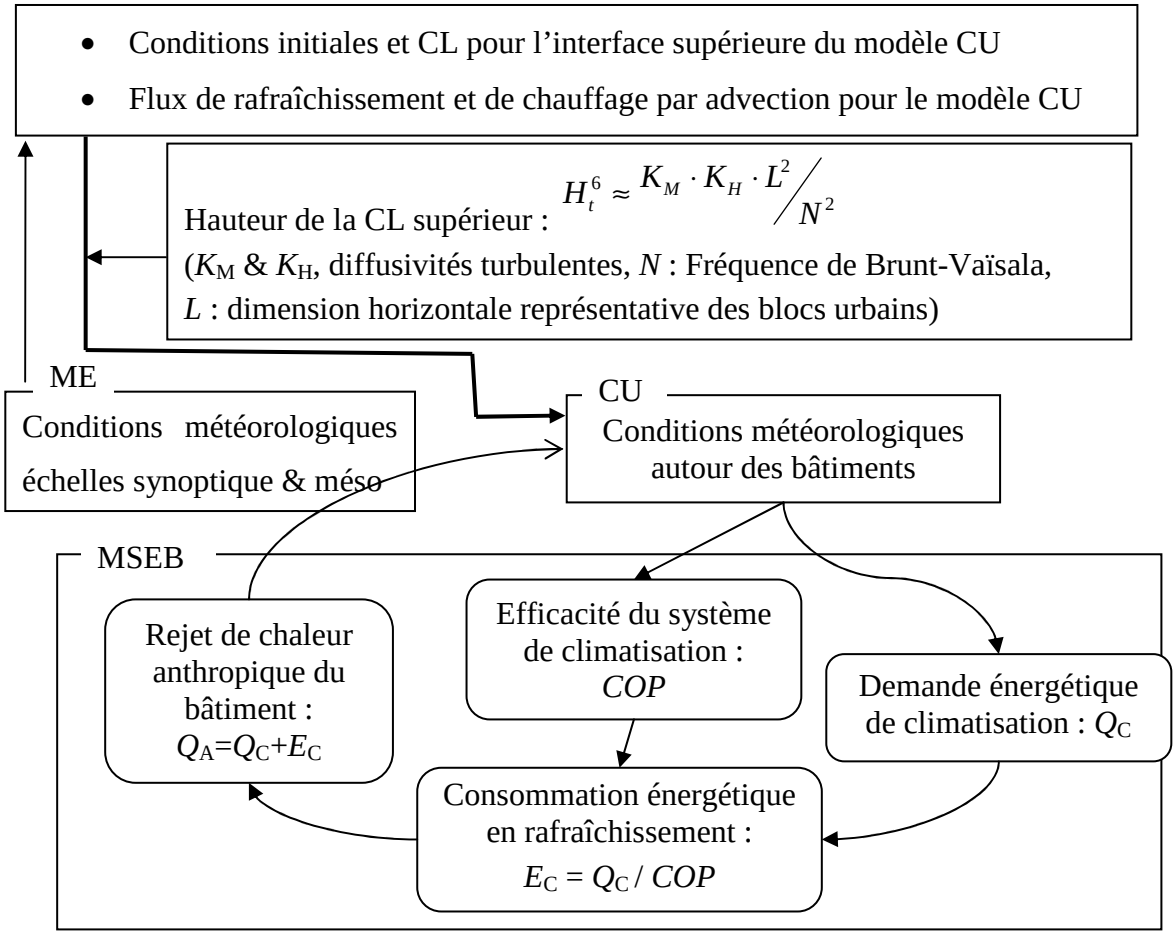


Figure 7 : Algorithme de fonctionnement du couplage entre un modèle méso-échelle (ME), un modèle de canopée urbaine 1-D (CU) et un modèle simplifié de simulation énergétique du bâtiment (MSEB) (après Kikegawa et al. 2003)

Ce genre de modèle est privilégié pour quantifier l'impact des différentes stratégies d'atténuation de l'ICU à l'échelle d'un bloc urbain sur la température de l'air ainsi que les émissions de CO_2 (Kikegawa et al. 2006 ;Akbari 2005 ;Sailor et al. 2007).

L'approche par CFD a été initiée pour l'étude des problèmes complexes de dispersion des polluants qui demandent la simulation des effets de forme des espaces urbains sur l'écoulement des vents locaux horizontaux et verticaux dans la canopée. Des progrès continus

ont été réalisés dans la sophistication des méthodes numériques, le raffinement de la géométrie des maillages, les différentes approches utilisées pour modéliser les phénomènes de turbulences tels que la DNS (Direct numerical Simulation), la LES (Large Eddy Simulation), la méthode RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes), la DES (detached-eddy simulation) et la puissance des solveurs. Même si les modèles CFD sont sensés être représentatifs des écoulements détaillés, on remarque encore une mauvaise concordance des résultats avec les observations in-situ, particulièrement pour les faibles vitesses de vents et une incapacité à gérer le caractère fluctuant de la direction du vent aux limites du problème pour n'importe quelle période de temps simulée (Assimakopoulos et al. 2006).

La description des bâtiments et de leurs systèmes énergétiques peut être plus ou moins poussée, elle peut se limiter à des modèles nodaux comme dans le code de simulation de l'environnement urbain ENVI-MET (Bruse et al. 1998) ou être couplé de manière synchrone (méthode dite du « ping-pong »), chaque modèle est résolu une fois à chaque pas de temps. En couplant Windperfect (logiciel de CFD) et EnergyPlus (logiciel de simulation énergétique du bâtiment), Hsieh et al. 2007 a évalué la répercussion de la chaleur rejetée par les condenseurs des systèmes d'air conditionné sur leur consommations énergétiques et leur coefficients de performance dans un quartier densément peuplés.

L'ensemble des modèles présentés ci-dessus présentent un handicap en termes de temps de calcul pour les applications liées aux consommations énergétiques des bâtiments sur des cycles saisonniers. Pour satisfaire à des temps de calcul raisonnables, la tendance a souvent été à la simplification des interactions urbaines à l'échelle de formes spécifiques bien connues où l'on peut employer des équations empiriques pour décrire les mouvements d'air.

1.2.3. Applications aux formes urbaines spécifiques

Le tissu urbain est complexe et propose de nombreuses morphologies individuelles telles que les pavillons, les esplanades, les cours fermées, les cours ouvertes… chaque forme a sa fonction. Les formes urbaines spécifiques ont été étudiées en particulier au regard des apports solaires directs. Dans les milieux urbains denses on rencontre des **patios et des cours** entourées de 4 bâtiments, ce sont des structures utilisées dans les médinas pour conserver un endroit au frais pendant l'été, mais l'effet d'ombre portée caractéristique qui peut s'avérée utile en été, minimise les apports solaires en hiver (Yezioro et al. 2006). Les **parcs urbains** peuvent être considérés comme des formes spécifiques à part dans la définition du tissu urbain. La contri-

bution relative des différents flux de chaleur dans le bilan énergétique nocturne des parcs urbains a été exploitée par la construction de modèles physiques à échelle réduite (Spronken-Smith et al. 1999). Cette approche a l'avantage de permettre l'examen des processus opérant à plus petite échelle à l'intérieur d'un complexe urbain établi, ils ont pu observer un effet de micro-advection dû à des échanges turbulents complexes de chaleur latente et sensible entre surfaces sèches et imperméables. Spronken-Smith et al. (2000) ont enquêté sur l'importance des termes d'advection à la surface d'un parc urbain irrigué à échelle réelle dans un climat chaud. A l'analyse des composants énergétiques déjà vus dans le modèle physique réduit, vient s'ajouter les effets advectifs à l'échelle méso. En effet, l'air plus chaud provenant de l'environnement urbain se refroidit et descend sur le parc à cause de la différence massique et s'associe à l'énergie radiative pour améliorer le processus d'évaporation à la surface du parc (Figure 8)

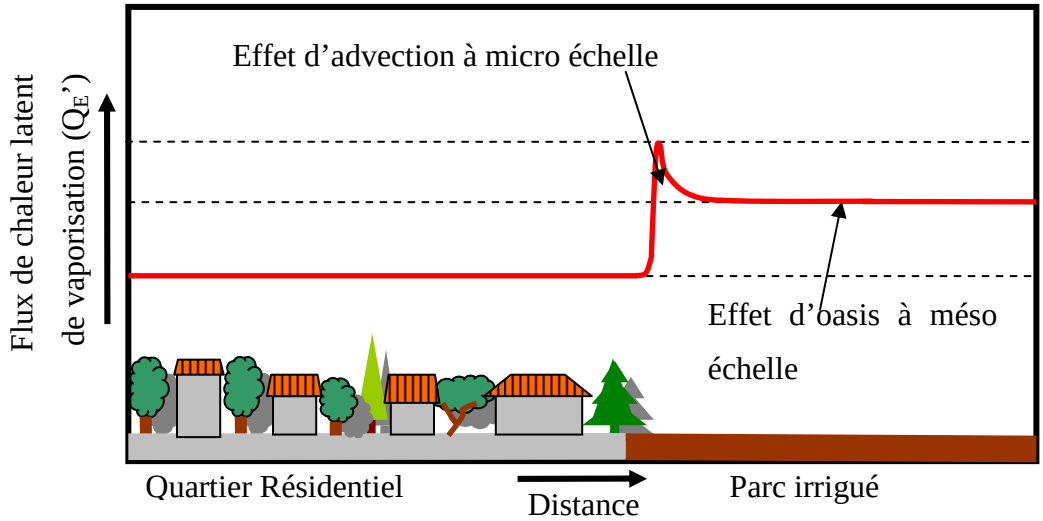


Figure 8: Variation hypothétique du flux latent avec la distance à la limite de la surface imperméable urbaine et du parc irrigué (d'après Spronken-Smith et al. 2000)

L'effet d'oasis est remarquable pour tous les parcs dans une agglomération urbaine et plus ou moins marqué selon la disponibilité en eau, en revanche l'effet dû à la micro-advection aurait le mérite d'être pris en compte dans les modèles méso-échelles car le flux de chaleur latente de vaporisation Q_E' provient des surfaces urbaines et donc les environs urbains proches du parc sont rafraîchis par ce phénomène.

La compréhension des processus d'échanges thermiques et massiques et de leurs interactions passe par la décomposition de la forme urbaine complexe en composants basiques, le plus

connu d'entre eux, parce qu'identifié comme particulièrement responsable du piégeage radiatif en milieu urbain, est la rue canyon. Elle est devenue la géométrie typique des études relatives à l'îlot de chaleur urbain. La **rue canyon** est décrite par son ratio géométrique entre sa hauteur *H* et sa largeur *W* et sa longueur est considérée comme infinie. Cette décomposition rend possible l'isolation de l'influence des facteurs individuels sur l'atténuation de l'ICU. Oke (1988) dans ces travaux sur la climatologie urbaine a conceptualisé ce ratio géométrique *H* / *W* pour décrire la forme des écoulements dans la rue flanquée de bâtiments de même hauteur pour un vent dominant perpendiculaire à son axe. Il distingue trois régimes basiques d'écoulement pour:

- un *H*/*W* faible, on peut considérer que le vent agit comme sur des rugosités isolées,
- un *H*/*W* inférieur à 0,54, on constate des interférences de sillage
- un *H*/*W* supérieur à 0,54, l'écoulement est rasant et un vortex, parfois deux à rotation inversée se forment dans la rue.

L'écoulement parallèle à la rue a été dans un premier temps observé et mis en équation par Nicholson (1975)et le croisement de celui-ci avec les écoulements rasants a été décrit par des équations semi-empiriques (Hotchkiss et al. 1973; Yamartino et al. 1986) et confirmé par des études de champs (Nakamura et al. 1988) et assemblés sous forme d'algorithme pour une prévision périodique (Georgakis et al. 2008). Ces connaissances ont été utilisées pour modéliser les écoulements de manière simplifiée dans les modèles de bilan énergétique de rue canyon (Mills 1993). Bozonnet (2005) s'est servi de ces relations pour la définition des conditions aux limites d'une méthode zonale à l'intérieur de la rue canyon, où le mouvement d'air est piloté par l'interaction entre la poussée thermique due aux différences de températures entre les surfaces de la rue et la quantité de mouvement provoquée par les vents dominants au dessus du canyon.

Les contributions des inter-réflexions dues au rayonnement solaire et aux échanges radiatifs GLO à l'intérieur des canyons peuvent être calculées selon plusieurs niveaux de précision. Par exemple, les échanges radiatifs ont été envisagées de manière simplifiée à travers différentes relations géométriques et calculs de facteurs de forme avec le ciel (Aida et al. 1982; Oke 1988; Swaid 1993) ou alors de manière découplée pour les apports solaires avec la méthode exacte des radiosités, et par la méthode simplifiée des enceintes fictives pour les grandes lon-

gueurs d'onde afin d'alléger les calculs itératifs liés aux bilans énergétiques de surfaces (Bozonnet et al. 2005).

Ce type de modèle utilisé au LEPTIAB et repris dans ce travail de thèse (voir chapitre 4) permet une estimation des consommations énergétiques saisonnières et une description des conditions thermoaérauliques aux abords du bâti avec un niveau de finesse suffisant. La forme générique du canyon urbain est retenue pour sa représentativité d'un espace dense (de même que pour des modèles à plus grande échelle, cf. § 1.2.1).

1.2.4. Validation physique des modèles

L'ensemble des outils utilisés ont besoin d'une validation pour pouvoir s'en servir à bon escient pour le dimensionnement de solutions techniques à l'atténuation de l'ICU. La description des modèles est très importante pour connaitre la valeur qualitative et le champ d'application du modèle (équations empiriques / physiques). Les récentes campagnes expérimentales menées sur des rues canyons réelles et à taille réduite (Eliasson et al. 2006; Idczak et al. 2007; Offerle et al. 2007) ont permis de confirmer la forme des écoulements pour des vents parallèles mais ils relèvent aussi les interruptions intermittentes du vortex par des phénomènes turbulents advectés par les toitures dans la rue. L'utilisation des coefficients de convection surfacique empiriques est elle aussi parfois critiquée, une surestimation des coefficients de 30 à 60% pour les façades face au vent est parfois mise en évidence (Blocken et al. 2005). La diversité des outils utilisés pour l'estimation des liens de cause à effet entre les microclimats urbains et les consommations énergétiques des bâtiments montre que la connaissance actuelle du microclimat urbain est bonne. Les nombreuses informations qualitatives et quantitatives suite aux observations in situ ont été utilisées pour créer des modèles empiriques, des modèles physiques ainsi qu'une méthodologie afin de permettre l'interopérabilité des modèles pour le champ d'ingénierie de la performance énergétique des bâtiments. Des stratégies d'atténuation de l'ICU ont été développées, beaucoup manquent encore de mises en œuvre et de preuves démonstratives des bénéfices économiques et qualitatifs qu'elles peuvent apporter à l'environnement urbain pour entraîner une utilisation plus généralisée.

1.3. Applications expérimentales de stratégies d'atténuations de l'ICU

Le phénomène d'ICU est lié à des facteurs incontrôlables dus aux effets temporaires variables tels que la vitesse et direction du vent ou la couverture nuageuse, la pluie et à des effets cycliques variables tels que l'éclairement solaire et les rejets anthropogéniques. Parmi les facteurs contrôlables on retrouve la végétation, ou la morphologie urbaine avec en particulier la densité, la hauteur des bâtiments et les facteurs de vue du ciel des surfaces urbaines, ainsi que les propriétés radiatives, de perméabilité et thermiques des matériaux utilisés. La distribution maîtrisée de ces termes de stockage, de « puits » et de « source » agit sur le bilan énergétique de la surface urbaine. Pour cela on peut optimiser les échanges latents dans la ville en jouant sur l'imperméabilisation des sols, par l'utilisation de la végétation, par l'utilisation de fontaines, ou alors réduire les apports solaires en identifiant les aménagements urbains susceptibles de troubler le confort urbain et en augmentant le coefficient de réflectivité solaire des surfaces urbaines par l'utilisation de matériaux propices. L'ensemble des solutions d'atténuation visent à limiter les rejets anthropiques liés à aux systèmes énergétiques des bâtiments.

1.3.1. Plans d'urbanismes adaptés à la formation du microclimat

La rue est l'interface entre le bâtiment, son ambiance intérieure et celle de l'espace extérieur situé sous la canopée urbaine. Lors de sa conception, on peut considérer deux problématiques, qui sont les effets du microclimat de la rue:

- Sur l'activité humaine dans les espaces extérieurs (confort extérieur et qualité de l'air).
- Sur les performances énergétiques des bâtiments (coûts liés aux systèmes CVC)

Les objectifs que l'on veut atteindre dans chacun des cas révèlent souvent des aménagements incompatibles. Pour cette raison, Erell (2008) incite à une définition claire des activités à dédier à des zones urbaines spécifiques dans l'optique d'y développer des microclimats convenables. Dans le cas des applications de confort urbain, les vitesses des vents importantes constatées aux pieds de constructions élevées fournirait le champ aéraulique suffisant pour contrôler la pollution émise par une rue passante et la disperser (Erell 2008).

L'orientation des rues est régulée par rapport aux vents dominants alors que d'autres paramètres, tels que la hauteur et la distance entre les bâtiments servent à respecter le droit à l'ensoleillement de chaque bâtiment. Chaque région climatique a développé des spécificités

dans l'agencement de ses rues et de ses bâtiments. Les centres villes anciens des cités européennes les plus au nord sont caractérisés par des rues relativement étroites et tortueuses avec une implantation de bâtiments dense. La compacité de ces structures offre protection aux vents et aux intempéries et permet de conserver la chaleur urbaine lors de la saison d'hiver. Au contraire, on peut chercher à ouvrir l'accès aux brises de mers vers l'intérieur des villes, à Tokyo, l'espacement des constructions hautes en bordure de mer permettrait l'entrée des brises de mers plus profondément dans l'agglomération pour atténuer l'ICU (Tamura et al. 2006). De plus, les rues formées par des bâtiments plus espacés et moins hauts bénéficient quand à elles d'une meilleure exposition solaire.

Dans les pays tropicaux, on maximise l'espacement des rues et les bâtiments poreux (géométrie ouverte) afin de privilégier la ventilation naturelle et la dispersion de l'humidité et des polluants liés au transport. La réduction du flux solaire est plutôt effectuée par des composantes architecturales individuelles de protection solaire, la priorité est donnée à la ventilation lorsqu'il s'agit de l'orientation et des dimensions de la rue (Nyuk Hien et al. 2009). Dans les pays méditerranéens, l'étroitesse des rues est encore plus accentuée afin de conserver des espaces abrités du soleil pour permettre la déambulation des piétons dans des conditions de confort extérieur acceptables durant la période estivale. Cet aspect architectural permet de conserver une température plus fraîche durant la journée, mais une fois la nuit tombée, la chaleur accumulée par le bâti environnant est diffusée dans la rue qui accumule la chaleur sans pouvoir s'en débarrasser par échanges radiatif avec la voûte céleste ou par les écoulements d'air. Johansson (2006) a mesuré la température de l'air dans des rues profondes pendant les périodes d'hiver à Fez au Maroc où le rapport des dimensions hauteur sur largeur était de 10. La température de l'air y était inférieure à celle des environs ruraux pendant le jour et la dépassait de 2-3°C pendant la nuit.

Lorsqu'on s'occupe uniquement des aspects énergétiques, les solutions techniques de conception envisagées peuvent aussi faire face à des objectifs variables et conflictuels. C'est le cas surtout dans des latitudes moyennes, qui par leurs variations climatiques ont des besoins énergétiques saisonniers antagonistes, il est difficile de trouver une solution technique adaptée. Dans les pays des latitudes moyennes, Oke (1988) affirme l'existence d'une zone de compatibilité avec un ratio *H/W* de 0,4 assurant un compromis entre ces objectifs conflictuels. Ce rapport représente une compacité très faible par rapport aux espaces urbains existants. Cependant, l'apparition de l'automobile et le développement des systèmes de conditionnement d'air

à l'intérieur des bâtiments ont réduit la préoccupation accordée aux variations météorologiques dans la conception des plans d'urbanisme (Erell 2008).

1.3.2. Stratégies applicables aux centres urbains denses comme mesures de réhabilitation énergétique et microclimatique

La rue canyon étroite est l'unité d'étude utilisée dans cette thèse afin de représenter l'environnement urbain dense. Le paragraphe qui suit présente les solutions techniques qui permettraient de réduire les consommations énergétiques des bâtiments qui la composent. La solution préférée des architectes et des urbanistes est souvent celle qui vient s'intégrer le plus tard possible dans les processus de planification et qui a le moins de conséquences sur les autres aspects de la construction (Erell 2008). Les solutions présentées dans le paragraphe suivant s'appliquent aussi bien à la rénovation d'un espace existant que dans les plans initiaux d'un quartier en construction. La figure 9 révèle les postes d'apports sensibles et latents à la masse d'air circulant dans l'agglomération de Tokyo au Japon qui participent au développement de l'ICU.

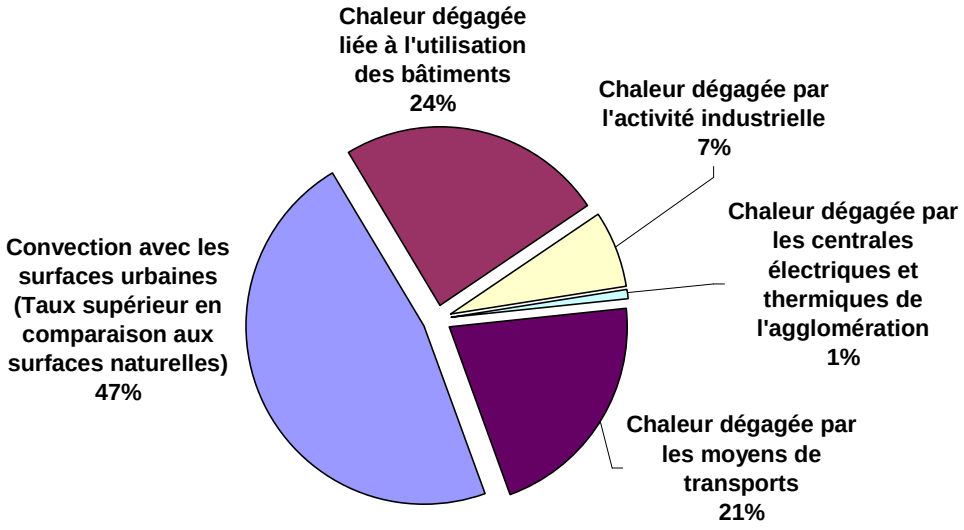


Figure 9 : Apports journaliers moyens de chaleur sensible contribuant à l'ICU de Tokyo (Ministère de l'environnement Japonais dans Kondo 2006)

La part liée à l'échange de chaleur par convection, évaluée à 47%, dépend principalement de la vitesse des écoulements d'air sur les surfaces urbaines et de la valeur de la différence de température entre l'air et les surfaces. En réduisant la température des surfaces on permettrait de réduire à la fois la convection par les surfaces urbaines et la chaleur dégagée par les bâti-

ments et les centrales thermiques. La convection aux surfaces peut être réduite en abaissant la température de surface ce qui peut être réalisé directement par l'augmentation de la réflectivité solaire des surfaces ou par ombrage, par l'apport d'humidité dans les surfaces urbaines qui utilisera les charges solaires et la charge sensible pour s'évaporer. Les deux solutions ont pour conséquence indirecte de rafraîchir l'air utilisé au niveau des condenseurs des unités de climatisation ce qui influe sur la charge nécessaire à amener l'air intérieur à sa température de consigne et donc fait décroitre la consommation énergétique d'été. Nous allons décrire ici les différentes mesures implémentées.

Effet liés à l'évaporation d'eau sur les surfaces urbaines

Les villes ayant une façade exposée à une étendue d'eau importante présentent une température décroissante dans les quartiers en se rapprochant de la mer (Marseille : Pigeon et al. 2008; Los Angeles : Dousset et al. 2003). Le terme d'évaporation lié à la présence d'une masse d'eau peut se chiffrer par la connaissance de son étendue, de sa différence de température avec l'air et de la vitesse du vent. A cet effet, la réduction de la demande en rafraichissement par utilisation de bassin au pied des bâtiments dans un pays chaud a été étudiée dans le désert Israélien sur un modèle réduit de rues canyons formé par des briques (Figure 10).

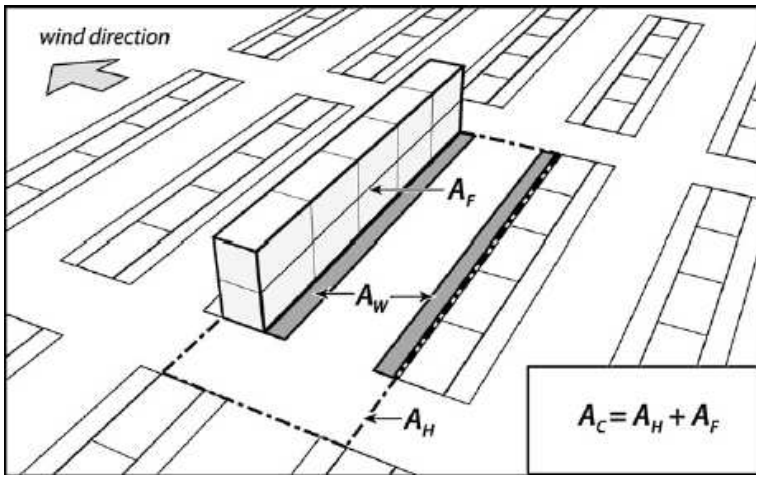


Figure 10 : Vue schématique de la configuration des rangées de rues canyons à l'échelle réduites avec le module de répétition du bâtiment et un double bassin (Krüger et al. 2008)

Le potentiel de rafraîchissement a été mesuré selon la température des surfaces des murs et par rapport à la différence de température à l'extérieur de la maquette et celle dans la maquette. La température de l'air a aussi été calculée avec un modèle pronostique de température

dans les canyons (CTTC) puis reportée dans un modèle de simulation énergétique pour les bâtiments pour définir l'impact sur les consommations. Le potentiel de rafraîchissement est une fonction directe de la surface hydrique, A_W, sur la surface totale de bâti, A_C. Les besoins en climatisation décroissent de 30 à 85% pour la façade face au vent et de 23 à 75% pour la façade à l'abri pour des ratios A_W/A_C évoluant de 0,05 (1 bassin, 2 étages) à 0,14 (2 bassins, 1 étage). Cependant, l'effet des apports d'humidité sur les systèmes de climatisation n'a pas été pris en compte.

Récemment, dans le district de Shiodome à Tokyo au Japon, une équipe de chercheurs a expérimenté l'association d'une chaussée poreuse à rétention d'eau couplée avec des systèmes d'irrigation des routes par vaporisation avec les eaux usées (Yamagata et al. 2008). Les mesures in-situ ont révélé une diminution de la température de surface de la chaussé de 8 °C durant la journée et de 3 °C pendant la nuit. L'effet se poursuivant plus longtemps durant la nuit à cause de la quantité d'eau retenue dans la matrice poreuse. Cette solution semble efficace pour l'atténuation du phénomène d'ICU mais demande la mise en place d'un réseau de management des eaux usées assez important.

Plantation de végétation en espaces urbains denses

Pendant la journée, les arbres interceptent le rayonnement solaire et s'ils ont des réserves d'eau disponibles à leurs racines, ils entament un processus d'évapotranspiration qui rafraichit l'air alentour en introduisant des charges latentes dépendant de la surface exposée de leur feuillage. S'ils n'ont pas ou peu d'humidité disponible, les arbres agissent seulement comme des parasols, cette fonction étant la principale cause de la réduction de température due aux arbres, le flux par convection provenant des surfaces ombragées étant largement diminué (Giridharan et al. 2007). Comme la conduction dans les bâtiments est plus influencée par les températures de surfaces que par la réduction de la température de l'air, le surplus de consommation énergétique sera plus facilement réduit par ombrage. Pendant la nuit, les arbres constituent un obstacle supplémentaire au rafraîchissement par échange GLO avec la voûte céleste, et ils ne sont pas capables d'évaporer leurs réserves par manque d'apports sensibles. Les végétaux ont besoin d'apports solaires pour faire leur photosynthèse et que leur évaporation soit efficace, et ils sont susceptibles d'ajouter une résistance mécanique à l'écoulement d'air. Par conséquent leur utilisation dans des rues canyons profondes peut être dérisoire.

Végétalisation des parois disponibles

L'incorporation de toitures ou façades végétalisées est aussi une solution, la condition étant de pouvoir les appliquer sur une importante partie de la surface urbaine, ils ont aussi l'avantage de réguler le drainage de l'eau lors des épisodes de pluies diluviennes et d'améliorer la qualité de l'air en fixant le CO_2 et les NO_x présents dans l'air ambiant. Le concept de rafraîchissement par transfert latent d'évapotranspiration est fortement balancé par la disponibilité en eau pour les éléments végétalisés, plantes et arbres. En utilisant un modèle mathématique pour simuler la couverture végétale de 50% des toitures de Toronto au Canada, la réduction de température pendant l'été pourrait être de 1°C, et de 2°C si celles-ci était régulièrement irriguées (Citation de Theodosiou 2009, d'après Bass et Al.). La simulation des réductions de température d'air dans une rue canyon, par la végétalisation des façades et des toitures par lierre grimpant, a été menée pour différents climats avec des résultats allant de 9,1 °C à 1,7°C sur la moyenne journalière respectivement pour Ryhad et Londres. Les meilleures performances étant réalisées pour les climats arides et pour une configuration où toits et façades sont recouverts (Alexandri et al. 2008) avec une nette diminution pour l'air au dessus des toits.

Localisation des émissions anthropiques

Le choix des systèmes de climatisation à production centralisée ou des systèmes split de type individuels est souvent dépendant de critères de faisabilité technique et économique. Pourtant, la localisation des condenseurs est relativement importante pour la modification des microclimats et des consommations énergétiques. La décharge de l'air vicié par le condenseur des unités de climatisation peut être optimisée, par exemple par l'intégration de pompes à chaleur par échanges géothermiques, ou en évitant un maximum les systèmes de type split en façade. Le secteur tertiaire est pour sa part souvent équipé de systèmes de climatisation centralisés qui permettent une localisation des équipements en toiture. Cette disposition du rejet en chaleur sensible influence de façon moindre la température de l'air en espace urbain. L'utilisation de technologie de type tour de refroidissement contribue à l'entretien de l'ICU par apport latents. La réduction de la température extérieure et des consommations énergétiques a été simulée grâce à un modèle couplé de méso-échelle / canopée 1D / bâtiments relevant une réduction atteignant jusqu'à 0,72°C sous la canopée et 130 W/m² pour la décharge de chaleur dans le sol en comparaison avec des systèmes traditionnels.

Nécessité d'un meilleur dimensionnement des appareils de climatisation

Dans le livre « rafraîchir la ville / Cooling the cities », Adnot et al. (2004) font part de la nécessité d'avoir de meilleur dimensionnement des systèmes de climatisation dans les espaces urbains et d'éviter les surdimensionnements en respectant les ratios d'efficacité énergétique proposés par les constructeurs (EER) qui selon eux ne correspondent pas aux conditions d'utilisation de la vie courante. Le développement de rafraichissement passif par ventilation naturelle par exemple est assez compliqué en ville, de part la concentration en polluants à l'extérieur relativement importante et de la réduction des vitesses d'écoulement d'air, particulièrement dans les rues canyon où le potentiel de ventilation nocturne peut être réduit de 90% (Geros et al. 1999). Le dimensionnement d'installation de ventilation naturelle nécessite une connaissance parfaite des caractéristiques du vent dans le site observé et une adaptation des composants aux conditions locales (Allard et al. 2005).

Utilisation de revêtements de surface réfléchissant l'énergie solaire

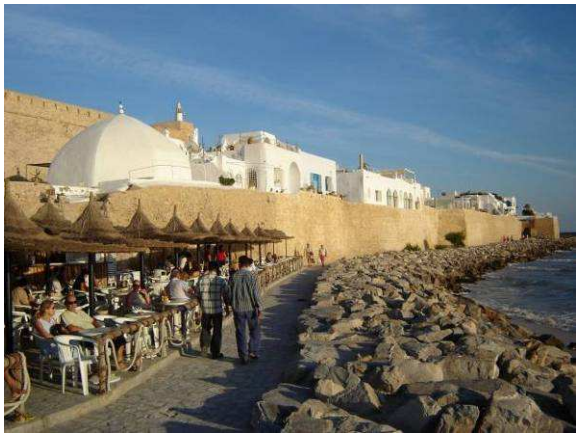
La réflectivité d'une surface dans le spectre solaire, aussi appelée ***albédo,*** est définie comme sa réflectivité intégrée sur l'ensemble des directions hémisphériques et sur l'ensemble des longueurs d'ondes du spectre solaire (0,3 à 2,5µm). Ce paramètre se décline entre 0 et 1, 0 représentant un « corps noir » parfaitement absorbant, et 1 étant le réflecteur parfait. Sa définition est donnée par :

Équation 3

$$\rho_{SOL} = \frac{\int_{0,3}^{2,5} \rho_\lambda E_\lambda . d\lambda}{\int_{0,3}^{2,5} E_\lambda . d\lambda}$$

Où, E_λ est l'éclairement spectral en W.m^{-2}, ρ est la réflectivité spectrale de la surface S considérée, λ est la longueur d'onde.

L'utilisation de revêtements clairs pour revêtir les habitations des pays chauds afin d'améliorer le confort des occupants, tel que le blanc de chaux (surface sélective froide), est une pratique très ancienne et encore courante des populations locales du pourtour méditerranéen, d'Afrique, d'Amérique centrale et du Moyen Orient (Figure 11).



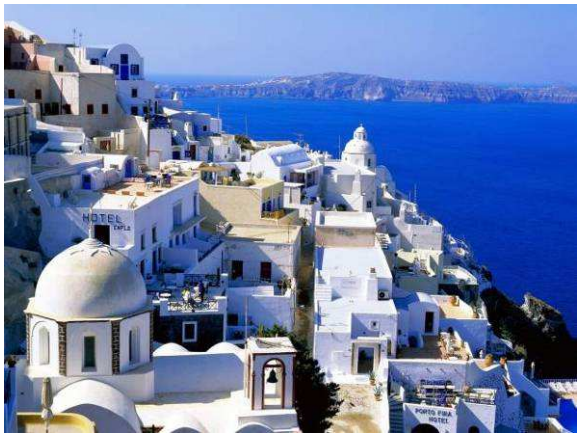


Figure 11 : Villages passés au blanc de chaux, Hammamet (Tunisie) et Santorin (Grèce)

Les teintes blanches présentent la capacité quasiment maximale à réfléchir le rayonnement solaire dans le domaine des visibles. Cette technique permet de conserver une température plus fraîche à l'intérieur qu'un même bâtiment peint d'une couleur plus foncée et donc plus absorbante dans les visibles. Dans une moindre mesure, les couleurs claires (pigments colorés éclaircis à l'aide de pigments blancs) sont aussi utilisées avec des performances honorables.

Les revêtements clairs permettent de réduire la température des surfaces urbaines, leur utilisation à grande échelle permettrait de diminuer l'échange de chaleur sensible par convection avec l'air extérieur, et donc sa température. Indirectement, la demande énergétique à l'échelle de la ville serait affectée ainsi que la charge aux centrales de production d'énergie. Les gains énergétiques et environnementaux liés à l'utilisation de matériaux « cool » à grande échelle a été extrapolé à l'ensemble des villes Américaines (Sailor et al. 2007) grâce à une série de calculs découplés entre un modèle synoptique et DOE2. Les résultats sont présentés sous la forme d'un logiciel informatif (MIST), mis à la disposition des architectes et des urbanistes.

Taha (1997) a simulé les effets d'une modification de l'albédo global urbain dans le bassin sud de Los Angeles. Il a modélisé l'effet d'une modification extrême (+0,30 pour la réflectivité originelle de la surface horizontale considérée) de l'albédo des structures urbaines pouvant recevoir ce traitement, principalement les quartiers résidentiels, les centres commerciaux et bureaux et les parkings. Le modèle numérique résolvant les équations de température, humidité et écoulement d'air à l'échelle méso a été appliqué à un maillage de 2600 mailles de 5 × 5 km. Seul 1/6ème des surfaces a pu faire l'objet d'une modification, le reste étant composé de surfaces naturelles (désert, forêts, prairies), ce qui a permis une augmentation moyenne de

0,13 de l'albédo de ces cellules. Pour une journée estivale chaude et ensoleillée, la température de l'air ambiant simulée est alors réduite de 2°C en moyenne et de 4,7°C pour le pic situé à 15 h. D'autres calculs effectués parallèlement ont permis d'établir la réduction d'émission de polluants liée à la production d'énergie électrique et aux réactions thermo-dépendantes de la formation d'ozone et du smog urbain. D'autres publications complètent ces résultats mettant en scène les effets de la modification de l'albédo global à des échelles plus élevées sur les rejets de gaz à effets de serre (Taha 2008; Akbari et al. 2009).

Cette dernière solution semble la moins contraignante de toutes en terme de rénovation ou de conception, elle peut être réalisée à l'aide d'une simple couche de peinture. Le paragraphe suivant reprend les résultats des études déjà réalisées sur le traitement radiatif des surfaces urbaines et les produits existant pour développer cette stratégie.

1.4. Impact du traitement radiatif des surfaces urbaines

Le ***rayonnement solaire***, première source diurne d'apports thermiques a un spectre de longueurs d'onde compris approximativement entre 0,3 et 2,5µm (SOL). On divise souvent ce domaine de rayonnement en 3 sous-domaines, celui des visibles (**VIS** : 0,4 à 0,76µm), une partie des ultra-violets (**UV** : 0,2 à 0,4µm) souvent majoritairement responsables des dégâts structurels sur le produit et son substrat, ainsi que le domaine des proches infrarouges (**PIR** : 0,76 à 2,5µm). Les bornes de ces sous-domaines varient légèrement selon les sources. En se référant au spectre solaire normalisé fourni par l'ASTM (*American Society for Testing and Material*), l'énergie contenue dans ces spectres est d'environ 5% pour les UV, 46% pour les VIS et 49% pour les PIR

1.4.1. Qualification des produits « cool »

Depuis une quinzaine d'années, les revêtements utilisés pour l'enveloppe des bâtiments et les chaussées urbaines sont étudiés selon leurs propriétés radiatives et classés selon leur applicabilité en tant que technologie passive rafraîchissante. L'ensemble de solutions de revêtements contemporains qui présentent une **réflectivité solaire** et une **émissivité thermique dans les infrarouges lointains** (**GLO** : 5 à 50µm) élevés s'est vue affublé de la dénomination « Cool », pour les toitures (cool-roof, Akbari et al. 2005), les peintures (cool paints, Synnefa et al. 2007) ou parfois « cold », pour les chaussées (cold materials, Doulos et al. 2004).

L'émissivité GLO d'une surface varie selon des lois différentes d'une substance à l'autre, elle peut varier selon l'état de surface (rugueuse, polie), la composition (teneur en eau) ou l'état chimique (corrosion…). Afin de manipuler de manière pratique l'émissivité d'une surface réelle, on intègre l'émissivité hémisphérique spectrale d'un corps sur une bande de longueurs d'onde. Le spectre peut être restreint à la bande spectrale 5-50µm pour les températures terrestres. L'émissivité hémisphérique aux grandes longueurs d'ondes $\varepsilon_{GLO,}$ est donnée par :

$$\varepsilon_{GLO} = \frac{M}{M^{\circ}} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} \cdot M^{\circ}{}_{\lambda} \cdot d\lambda}{\sigma \cdot T^4} \qquad \text{Équation 4}$$

De plus, la loi de Kirchoff affirme que pour n'importe quel matériau, l'absorptivité et l'émissivité monochromatique d'un corps sont égales pour toutes les températures et longueurs d'ondes spécifiées :

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \qquad \text{Équation 5}$$

L'extension de cette loi aux grandeurs totales n'est généralement pas possible à l'exception des corps noirs et des corps gris, qui possèdent par définition des caractéristiques invariantes avec la longueur d'onde. Une surface très polie, s'apparentant à un miroir, peut avoir une émissivité inférieure à 0,1, alors que les surfaces peintes ou les surfaces oxydées, sans aucune influence provenant de leur couleur dans le spectre visible, vont afficher des émissivités de l'ordre de 0,9. Les métaux non oxydés présentent une opacité quasi-parfaite ainsi qu'une réflectivité spécifique dans les courtes et grandes longueurs d'onde relativement haute (0,6 à 1) variant très peu en fonction de la longueur d'onde.

Pour une surface à faible albédo, la différence de température entre une surface horizontale et l'air ambiant lors du pic de rayonnement solaire peut atteindre jusqu'à 50°C alors que pour les albédos élevés, dans les latitudes moyennes, la différence de température entre la surface d'une toiture et de l'air ambiant est d'environ 10°C (Akbari et al. 2001). Une surface à basse émissivité dans les GLO peut conserver une température aussi fraiche qu'une surface à émissivité GLO élevée si sa réflectivité solaire est considérablement plus élevée

La figure 12 illustre le bilan énergétique d'une toiture:

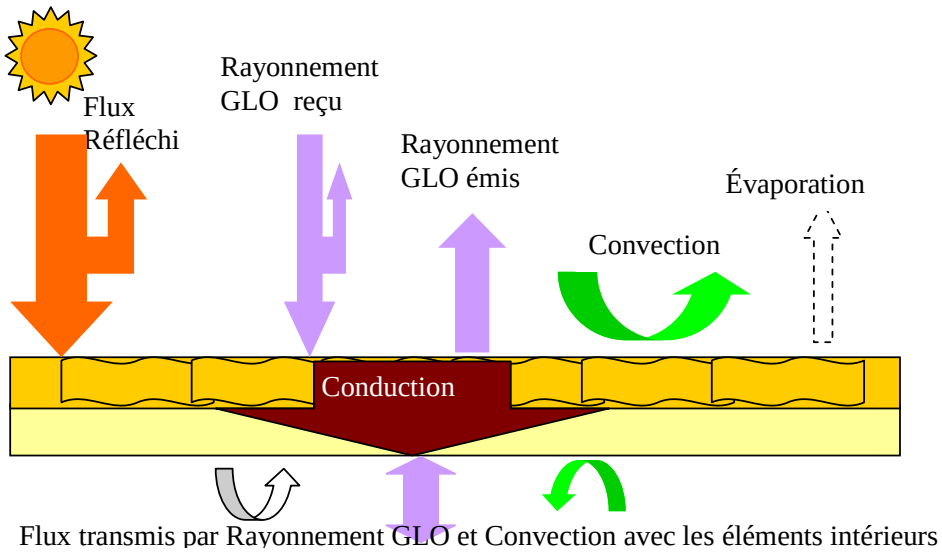


Figure 12 : Composantes du bilan thermique à la surface extérieure d'une toiture de bâtiment.

Par temps sec, la toiture considérée se retrouve avec l'équation de bilan de surface suivante :

$$\alpha_{sol} \cdot E_{sol} + \varepsilon_{GLO}\left(E_{GLO} - \sigma \cdot T_S^4\right) + h_C \cdot \left(T_{air} - T_S\right) = \varphi_{COND} \qquad \text{Équation 6}$$

Avec, α_{sol}, l'absorptivité solaire de la surface de la toiture, E_{sol} l'éclairement solaire, E_{GLO} l'éclairement GLO reçu du ciel et d'éléments alentours, h_c le coefficient d'échange surfacique avec l'air, dépendant de ΔT, de la vitesse et de la turbulence de l'écoulement d'air à l'approche de la surface et φ_{COND} le flux échangé par conduction avec la surface intérieure de la paroi considérée. La combinaison d'un albédo et d'une émissivité thermique élevés, fait que le matériau considéré peut être qualifié de « cool ». un calcul dans des conditions standards, un toit de tôle métallique neuf ayant une émissivité de 0,2 et une réflectivité de 0,79 aura la même température de surface qu'une toiture blanche neuve d'émissivité 0,75 et de réflectivité 0,7 (Levinson et al. 2005). Néanmoins, certains produits de composition métallique ont une émissivité thermique plus faible mais une réflectivité très élevée (surfaces polies) et peuvent aussi être considérés dans la classification « cool ».

1.4.2. Développement de produits colorés cool

Si les teintes blanches présentent les meilleures réflectivités sur l'ensemble du spectre solaire (avec certaines variations) celles-ci ne conviennent parfois pas pour des raisons esthétiques. Le développement de la demande énergétique liée à la climatisation et les efforts pour conserver une qualité environnementale correcte dans les agglomérations urbaines ont poussé les

scientifiques à développer des produits colorés avec une réflectivité solaire accrue au-delà des visibles, c'est-à-dire dans les proches infrarouges contenant plus de 50% de l'énergie solaire.

L'expérimentation de mélanges entre pigments traditionnels et pigments incolores et inorganiques à haute réflectivité dans les proches infrarouges a permis la fabrication de 14 échantillons de peintures colorées de ton équivalent aux peintures préparées sans pigments incolores (Synnefa et al. 2007). Ces couples standard / cool ont subit une caractérisation spectrale qui est illustrée dans la figure 13 par une comparaison de la réflectivité spectrale dans le domaine des longueurs d'onde solaire d'une peinture standard de teinte marron et de son équivalent préparé « cool ».

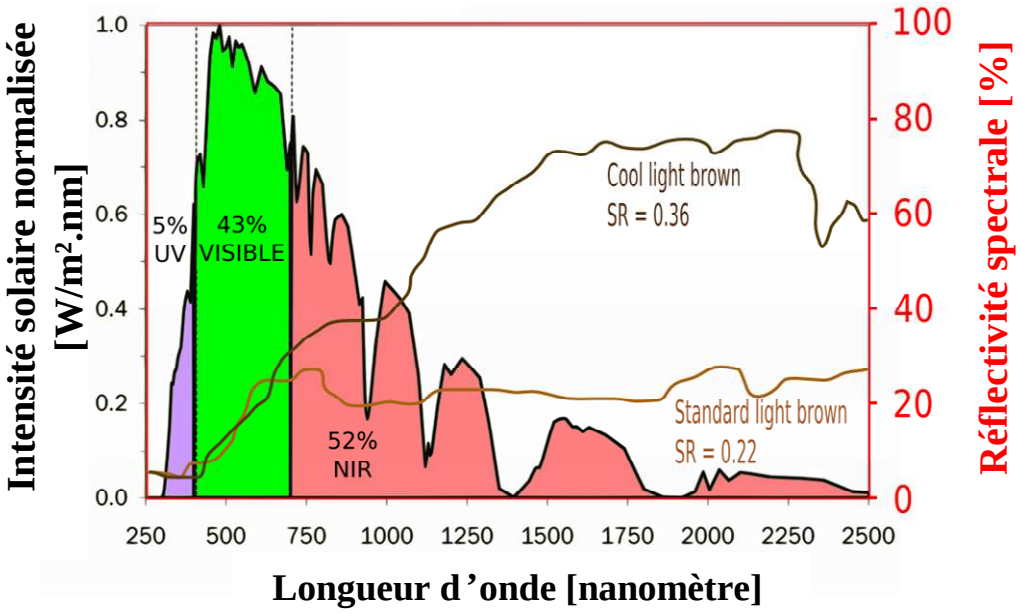


Figure 13 : Résultat d'analyse spectrophotométrique (axe de droite, courbe) pour une paire d'échantillons de peinture cool et standard de même couleur marron.

La courbe remplie représente le spectre solaire incident à la surface terrestre divisée selon les trois sous-domaines avec le pourcentage d'énergie contenu dans chacun d'eux. On s'aperçoit que leur réflectivité spectrale est équivalente dans le visible, elles ont donc le même coloris et diffère totalement dans les proches infrarouges, ce qui vaut une réflectivité solaire de 0,22 au produit standard et de 0,36 au produit « cool ». L'impact de cette réflectivité solaire accrue sur la température de surface a été mesuré sur des dalles de béton recouvertes des peintures standards et réfléchissantes pendant un été à Athènes. La différence de réflectivité totale maximale entre 2 revêtements « cool » et standard a atteint 0,22, correspondant à une réduction du pic de température de 10,2°C.

D'un point de vue théorique, si l'on parvenait à réfléchir l'ensemble du rayonnement thermique contenu dans les proches infrarouges, même en ayant une absorptivité totale dans les visibles, on pourrait atteindre une réflectivité solaire globale de 0,5. D'où les efforts mis en œuvre par les chercheurs pour développer des peintures et de revêtements sélectifs dont les propriétés radiatives ont un effet sur l'énergie émise dans le domaine des proches infrarouges et des infrarouges lointains. Pour la fabrication de telles peintures, Levinson et al. (2005) ont déjà classifiés 87 pigments selon leurs capacités à réfléchir dans les proches infrarouges avec un modèle de calcul prenant en compte leurs propriétés chimiques et radiatives.

1.4.3. Impact du vieillissement et de l'encrassement sur la réflectivité solaire

Lorsqu'on envisage d'utiliser une technologie « cool », il est important de considérer la réflectivité de la surface neuve mais aussi son évolution à long terme. Les urbanistes et décideurs sont souvent réticents à utiliser les produits clairs ou blancs pour la confection des chaussées ou autres surfaces à cause de leur capacité à s'encrasser et l'impact esthétique que cela provoque (Corburn 2009). L'impact de l'érosion et de l'encrassement sur les coefficients de réflectivité solaire ont été étudiés dans de nombreuses publications. Le premier reflète l'usure résultant de l'action combinée du vent, de l'ensoleillement (principalement les dégâts initiés par l'énergie contenue dans les photons UV sur les liens atomiques entre les atomes de carbones et d'hydrogènes des molécules organiques), de la pluie, de la grêle, de la neige, de la pollution atmosphérique et des variations de température (Levinson et al. 2005; Berdahl et al. 2008). Le second terme englobe l'évolution des caractéristiques de surface sous l'effet du dépôt de particules minérales et organiques, et de l'accumulation de cendres, d'hydrocarbones ou de suie provenant de la combustion, mais aussi le résultat de la croissance biologique (cyanobactéries, champignons, algues).

Une campagne de mesures sur 25 échantillons de toitures blanches rapporte que les surfaces perdraient 15% de leur performance en réflectivité solaire au cours de la première année, puis un déclin de 2% par an (Berdahl et al. 1997). La figure 14 est composée de deux graphiques représentant l'évolution de la réflectivité solaire d'une peinture « cool » de couleur blanche (gauche) et d'une peinture de couleur noire (droite) sur une période d'un an et demi.

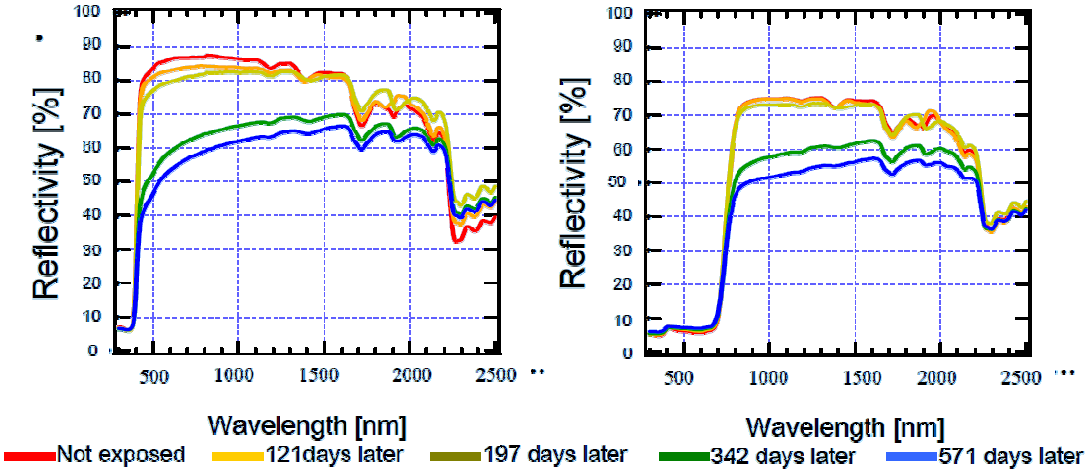


Figure 14 : Résultats de l'effet du vieillissement sur la réflectivité solaire d'un échantillon blanc et d'un échantillon noir de peinture « cool » (Kondo 2006).

Deux échantillons identiques d'aluminium peints, de 40 cm² de surface, ont été exposés horizontalement sur le toit d'un immeuble à Tokyo, pendant que 2 échantillons identiques étaient conservés à l'abri des intempéries (Kondo 2006).

On peut s'apercevoir pour les deux produits que le coefficient de réflectivité solaire s'atténue très faiblement pendant les 6 premiers mois. En revanche, au-delà d'1 an/1 an et demi, la performance des peintures chute de manière importante comme le rapporte le tableau suivant.

Tableau 1 : Évolution des réflectivités en fonction du temps d'exposition.

	Réflectivité solaire [%]		**Réflectivité visible [%]**		**Réflectivité PIR [%]**	
	Non exposé	571 j. plus tard	Non exposé	571 j. plus tard	Non exposé	571 j. plus tard
Blanc	80,8	54,8	85,2	50,4	82,1	61,4
Noir	40,4	30,7	5,8	6,9	71,2	51,5

Après 1 an et demi, le blanc ne présente plus que 68% de ses performances initiales en termes de réflectivité sur l'ensemble du spectre solaire alors que le noir voit son albédo rabaissé à 76% de sa valeur initiale. On peut s'apercevoir néanmoins que cette baisse est fortement liée à la valeur initiale de la réflectivité dans le spectre des visibles. Comme l'indique le schéma de la figure 15, on peut supposer que la pollution déposée au fur et à mesure de l'année sur la surface des échantillons assombrit les surfaces claires (blanc) mais éclaircit les surfaces originellement foncées (noir).

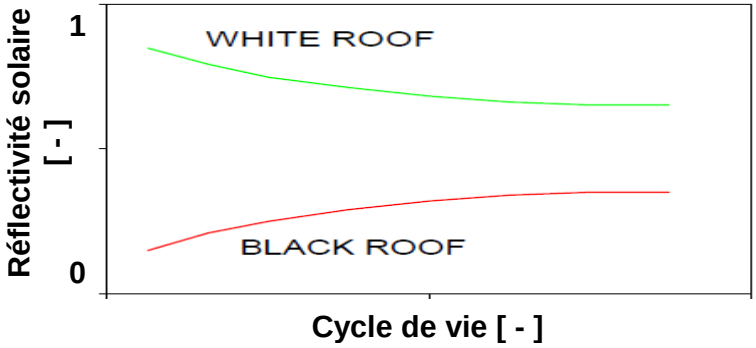


Figure 15 : Effet du temps d'exposition sur des surfaces de tons sombres et clairs (Griggs et al. 1989).

Par contre, la réflectivité dans les proches infrarouges de ces deux échantillons subit globalement la même perte, et donc une augmentation de l'émissivité GLO, ce qui est intéressant en termes de réduction de température, même si les variations constatées sont minimes. Il existe des solutions pour la réfection de la réflectivité des surfaces.

Le regain de réflectivité solaire par nettoyage des surfaces a été évalué par Levinson et al. (2005) sur 15 échantillons de membranes faites de chlorure de polyvinyle blancs ou gris clair prélevés sur des toitures vieilles de 5 à 8 ans. Les échantillons salis par l'exposition présentent une perte de leur réflectivité solaire allant de 11 à 59%. Les techniques de nettoyage des échantillons employés allaient de l'essuyage avec un chiffon sec à la désincrustation à la javel. L'essuyage a permis d'effacer facilement les tâches de suies noires pour raviver la réflectivité solaire initiale de 53 à 95% alors que la javellisation assure toujours de retrouver quasiment la réflectivité originelle (94% et 100%). Cet aspect est à prendre en compte dans la partie coût de maintenance pour l'implémentation de la technologie par les villes.

En plus de la recherche de matériaux aux propriétés réflectives particulières, les fondements d'une utilisation rationnelle de la configuration des propriétés radiatives aux différentes surfaces des bâtiments et des entités urbaines ont été étudiés.

1.4.4. Performances des revêtements cool pour toitures

Jusqu'à maintenant, la plupart des études réalisées sur l'utilisation de matériaux cool pour rafraîchir les villes et diminuer les consommations énergétique d'été ont été réalisées sur les toitures. Cette technologie fait face à un dilemme, la réduction de l'énergie solaire absorbée entraîne une réduction de la charge en climatisation en été mais également une augmentation de

la demande en chauffage pendant l'hiver. Les paramètres pour une bonne mise en œuvre des toitures cool ainsi que leur influence sur la performance énergétique ont été identifiés et sont rappelés dans le paragraphe qui suit.

Influence de l'ensoleillement annuel

La performance énergétique liée aux « cool roofs » est principalement dépendante du ratio d'ensoleillement entre la période d'été et la période d'hiver. Celui-ci est dépendant de la latitude à laquelle est localisé le bâtiment et il se rapproche de 1 lorsque l'on se trouve sur l'équateur. La figure 16 est le résultat de simulation effectuée par le LBNL (*Lawrence Berkley National Laboratory, California*). Pour l'ensemble du territoire américain, ils ont estimé le ratio de l'ensoleillement global sur l'horizontale moyenné pour une période d'hiver (décembre à février) sur l'ensoleillement pour un période d'été (juin à août).

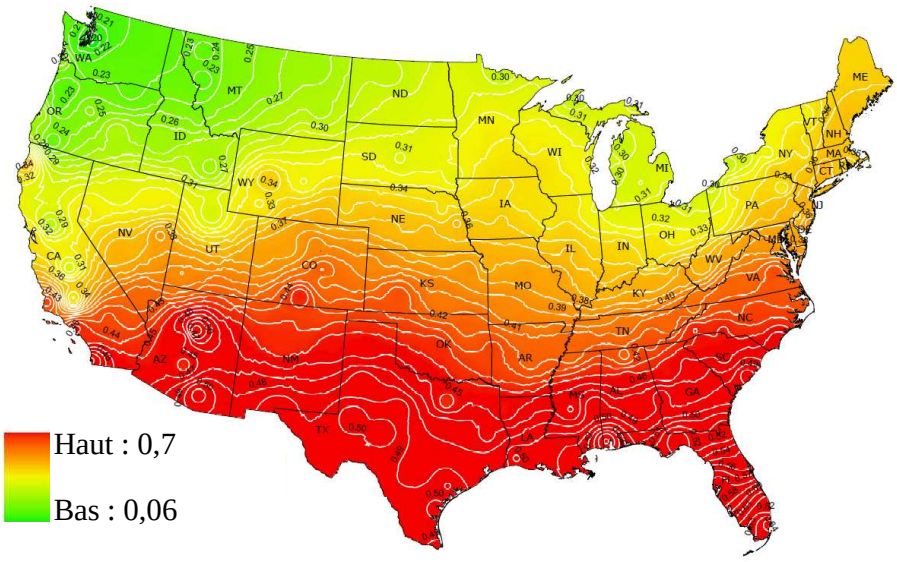


Figure 16 : Carte des États-Unis représentant l'ensoleillement moyen journalier pondéré pour la saison d'hiver (Dec – Fev) sur celui de la saison d'été (Juin – Aout).

On remarque que pour l'ensemble du territoire, l'ensoleillement incident pendant l'été est de 2 à 5 fois plus élevé que pendant l'hiver. Les meilleures performances pour l'utilisation de « cool roof » se situent dans les régions où le ratio est supérieur à 0,3 (couleur jaune-or). En effet, le remplacement expérimental d'une toiture vétuste et très absorbante dans les CLO par un revêtement à fort albédo (blanc~0,75) sur divers bâtiments tests (résidentiel plain-pied et 1 étage, supermarché, bureau 1 étage) en Floride a révélé une économie sur la demande énergétique en climatisation allant de 10 à 43% selon la composition et l'isolation des toits recou-

verts (Parker et al. 1997; Parker et al. 2002). La réduction du pic électrique lié à la demande énergétique de l'ensemble des applications de ces mêmes bâtiments, observée entre 17 et 18 heures, a été estimée entre 16 et 36%. De même, à Sacramento en Californie, plusieurs types de bâtiments ont vu leur consommation énergétique liée au confort d'été réduire de 40 à 50% ainsi que de 30 à 40 % pour le pic de puissance énergétique correspondant (Akbari et al. 1998; Akbari et al. 1999; Levinson et al. 2005).

Effet de l'architecture du bâtiment

L'influence de la latitude géographique est souvent étudiée de concert avec la morphologie particulière des bâtiments. Synnefa et al. (2007) ont simulé le comportement thermique, sur le logiciel TRNSYS, d'un **bâtiment de plain-pied**, avec 4 façades vitrées d'orientation équi-probable et avec une toiture-terrasse ayant une réflectivité solaire de 0.65 et une faible isolation thermique de résistance 0.84W/m².K, dans différentes régions climatiques (figure 17).

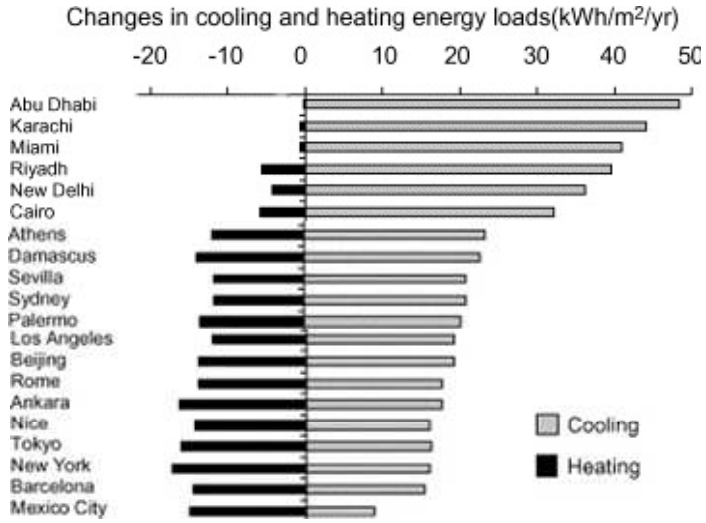


Figure 17: Effets du climat sur la demande en chauffage et climatisation pour une modification de la réflectivité solaire de + 0.65 d'une toiture-terrasse (Synnefa et al. 2007)

Indépendamment du fait que cette forme architecturale puisse ne pas être adaptée à certains climats, les résultats montrent que les pénalités sur la consommation de chauffage sont souvent moins importantes que les gains réalisés sur la charge en énergie de climatisation pour des régions situées entre les latitudes 19.19° (Mexico, Mexique) et 43.4° (Nice, France).Les gains nets d'énergie du bâtiment simulés pour Tokyo, Mexico ou New York sont négatifs, cet effet est principalement dû aux faibles valeurs d'isolation des différentes parois du bâtiment

modélisé. La conséquence étant que les basses températures entrainent une augmentation du flux de chaleur perdu par conduction.

D'après Griggs et al. (1989), les gains liés à la mise en œuvre d'une toiture cool sont dépendant du rapport de surface entre la toiture et le reste de l'enveloppe. Dans les bâtiments élevés, la toiture ne représente qu'une petite portion de l'ensemble de l'enveloppe. La réduction de la consommation énergétique associée à la réfection d'une toiture réflective pour des bâtiments de plus d'un étage peut s'avérer discutable. A l'inverse, pour les bâtiments peu élevés, la surface du toit compose 50 à 75% de l'enveloppe et peut être la surface contribuant majoritairement aux gains et pertes énergétiques de l'espace conditionné. Des campagnes de mesure focalisées sur des architectures d'un étage maximum (Berdahl et al. 1997) ont montré des gains énergétiques intéressants. En Italie, Zinzi et al. (2007) ont traité l'effet du climat, du nombre d'étages et du niveau d'isolation sur le logiciel TRNSYS sur les gains énergétiques réalisés en augmentant l'albédo d'une toiture de 0,2 à 0,8 sur un bâtiment de type bureaux. Parmi les lieux investigués, Milan (latitude 45°28), en climat continental présentait un gain net sur la consommation énergétique annuelle de 4% trop faible et a été éliminés des simulations. Les résultats pour un bâtiment de 1 à 3 étages avec une résistance de toiture caractérisée par un coefficient U_{toiture} variant de 0,3 à 0,9 W/m².K sont rassemblés dans le tableau 2 :

Tableau 2 : Économie simulée sur la consommation énergétique annuelle nette pour une augmentation de ρ_{SOL} de 0,6 - selon le nombre d'étages

Ville	Latitude	Climat	1 étage	2 étages	3 étages
			Gains en consommation énergétique annuelle (%)		
Rome	41°0	Tempéré, hiver doux et humide	5,5 – 10,6	7,1 – 9,5	5,2 – 7,6
Naples	40°5	Méditerranéen	9,9 -13,2	7,1 – 11,0	5,5 – 8,9
Olbia	40°9	Méditerranéen	9,7 – 13,7	7,8 – 11,6	5,7 – 9,6
Palerme	38°0	Méditerranéen chaud	14,4 - 21,7	8,1 – 16,1	5,5 – 12,4

La toiture « cool » a un effet localisé sur le local situé directement sous toiture et les performances énergétiques diminuent lorsqu'on ajoute des étages au point que pour une toiture bien isolée et 2 ou 3 étages (0,3 à 1%), les performances sont égales pour les 3 climats et variable

de 5 à 6,5% pour une toiture non isolée. Cette caractéristique nous incite à penser que l'utilisation de toiture cool pour rafraîchir l'ICU dans les environnements urbains denses constitués de bâtiments hauts n'est pas une technique optimale.

Influence de la résistance thermique de l'enveloppe

L'impact de la résistance thermique de la toiture sur les économies nettes annuelles de consommation électrique réalisées par un bâtiment (les gains en climatisation moins les pertes en chauffage) suite à la réfection « cool » d'une toiture a été illustré par de nombreux travaux (Akbari et al. 1997; Berdahl et al. 1997; Parker et al. 1997; Santamouris et al. 2007; Synnefa et al. 2007). La figure 18 illustre les variations nettes de l'énergie qui sont engendrées par l'augmentation de l'albédo fixée à 0,5 (par rapport au bâtiment avec sa toiture d'origine) pour 4 climats Nord-Américains en fonction de la valeur de la résistance globale entre la surface extérieure de la toiture et le plafond de l'espace habitable. La valeur de la résistance présentée sur l'axe des abscisses n'équivaut pas aux valeurs prescriptives françaises. La RT2005 requiert un minimum de 5 K.m²/W pour les toitures neuves (zone H3), soit une R_{th} de 28 ft.°F.h/Btu.

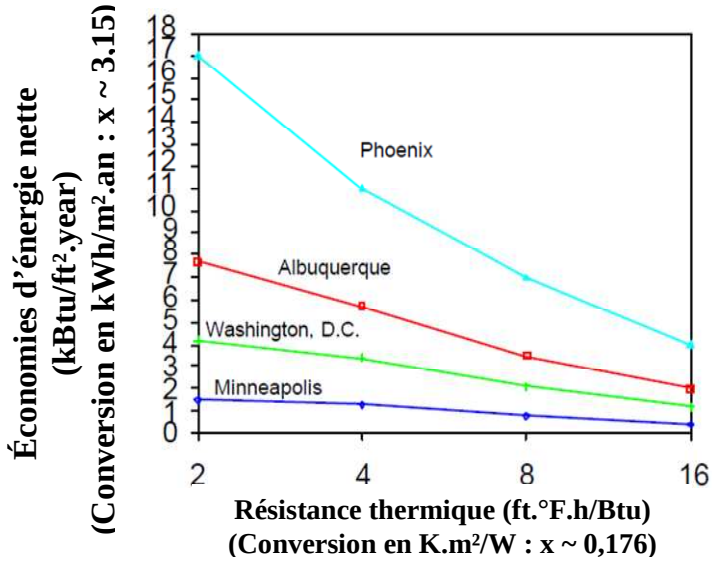


Figure 18 : Effet de la résistance thermique de la toiture sur les gains énergétiques engendrés par l'augmentation de la ρ_{SOL} d'une toiture de 0,5 pour différents climats (Griggs et al. 1989).

Par comparaison, Minneapolis, 44°98 et Washington, 38°63 ont des latitudes de l'ordre de celles de la France (Amiens, 49°9 ; Ajaccio, 41°9). Les densités de flux solaires saisonniers reçus sont donc semblables mais les climats sont différents. Il est alors difficile de comparer

le climat océanique à variation continentale (Amiens) ou un climat tempéré méditerranéen (Ajaccio), au climat océanique à été chaud (Washington) ou au climat humide continental (Minneapolis). La chute des économies envisageables lorsque l'on augmente la résistance de la toiture est toute à fait remarquable. A Washington D.C. pour une toiture non isolée de résistance 0,7 K.m²/W (2 ft.°F.h/Btu), les économies réalisées pour une diminution de l'absorptivité de 0,5 sont de 13,2 kWh/m²/an. Si on isole la toiture selon la RT2005, soit 5,0 K.m²/W (28 ft.°F.h/Btu), les gains nets entrainés seront inférieurs à 1 kWh/m²/an. D'un point de vue économique, les cool-roofs ne sont peut être pas adaptés aux spécificités climatiques de la France.

Bénéfices indirects

Akbari et al. (1999) ont simulé les économies qui seraient réalisées au niveau des centrales de production d'énergies primaires si l'on modifiait les albédos des toitures de l'ensemble du parc immobilier des USA. Les bâtiments résidentiels ont vu leurs albédos passer d'environ 0,25 à 0,55 et les bâtiments commerciaux équipés de toitures terrasses sont eux modifié de 0, 25 à 0,70. En considérant les conditions climatiques propres à 11 grandes zones définies par le gouvernement, les simulations énergétiques de 11 types de bâtiments différents ont été menées puis les résultats ont été extrapolés à l'ensemble du stock immobilier connu. Les économies estimées s'élèvent à 2,6 térawatts heure pour la consommation annuelle, et de 1,7 Gigawatts sur le pic de puissance national. Plus de 50% des économies proviennent des zones climatiques chaudes du sud des USA, mais près de 15% sont réalisés sur la zone Nord-est, moins chaude mais avec une population plus importante.

Toutes ces caractéristiques influentes pour les performances énergétiques dues à l'utilisation de revêtement réflectif pour les toitures se retrouveront dans notre étude liés aux surfaces verticales de l'environnement dense

1.4.5. Façades cool pour l'environnement urbain

Les valeurs de la performance de produits cools sur les façades ont encore été peu étudiées, pourtant le rôle des façades dans l'ICU et la consommation énergétique dans les centres urbains confinés est prépondérant. Les facteurs qui influent sur la performance de l'aménagement des propriétés radiatives aux surfaces verticales seront les mêmes que pour les toitures, et on y ajoutera l'effet des facteurs de forme entre les différentes surfaces au couleur

des scènes urbaines confinées. Jusqu'à présent les travaux réalisés sur les parois verticales n'ont pas étendu leur champ aux effets d'inter-réflexions entre les surfaces de l'environnement. Bougiatioti et al. (2009) ont réalisé une étude thermique des matériaux utilisés comme « peau » pour les façades Athéniennes pour des bâtiments isolés peu ou pas soumis à l'effet des inter-réflexions. Les matériaux des façades ont été caractérisés par les mesures moyennes et maximales de la température de surface diurne, enregistrées par des thermocouples de surfaces et par thermographie infrarouge entre 8 et 20 heures. La base de données ainsi constituée doit servir de références aux architectes qui souhaitent lutter contre l'ICU. Les mesures ont été effectuées sur les façades des bâtiments réels en fonctionnement et sans masques solaires lointains. Les différences de températures maximales entre l'air et les surfaces ont été observées pour les façades ouest, avec un écart allant de 10 à 15 °C pour les matériaux clairs et de 20 à 30°C pour les matériaux foncés. Les matériaux ayant une inertie importante présentent encore 10°C d'écart après 22 h.

Cheng et al. (2005) ont utilisé des maquettes tests de forme cubique pour étudier la sensibilité thermique de l'air intérieur, à la couleur (absorptivité solaire) et à la capacité thermique massique de l'enveloppe sous un climat humide et chaud (Hong Kong). Pendant l'été, la température de l'air dans la cellule à structure légère et sans fenêtres était par rapport à la température de l'air extérieur :

- au maximum 2-3°C supérieure pour la cellule blanche (α_{SOL}=0,25)
- au maximum 12°C supérieure pour la cellule noire (α_{SOL} =0.8)
- Pendant la nuit l'écart entre les cellules devenait négligeable.

En journée, lorsque l'ensoleillement déclinait en dessous de 300W/m², la température à l'intérieur des cellules était réduite de 1 et 5 °C pour la cellule blanche et la cellule noire respectivement, montrant que, plus une surface est absorbante, plus les fluctuations diurnes sont importantes. Suite à l'augmentation de l'inertie des cellules par des éléments de béton de 90mm contre les façades intérieures, ils ont montré une atténuation considérable des maximas de la température intérieure ainsi qu'une légère hausse des minimas à cause de la chaleur stockée dans l'espace habitable et réémise sous forme de rayonnement GLO durant la nuit. Les résultats montrent que dans les climats chauds à forts besoins en climatisation, l'utilisation de la faible inertie est plus adaptée pour les bâtiments résidentiels non occupés

pendant la journée alors que les bureaux nécessitant une climatisation pendant la journée et non la nuit, seraient plus adaptés à une construction de forte inertie.

Les effets de confinement urbain sur le piégeage radiatif ont été pris en compte par Robinson et al. (2007). Ils présentent les résultats d'une étude paramétrique sur la conservation de l'énergie dans une rue canyon en fonction de son ratio géométrique et de la surface de vitrage relative à la surface murale à Athènes, sans précisions sur la valeur de l'absorptivité solaire et GLO des surfaces (Figure 19). Le modèle utilisé comporte un couplage du modèle de micro-climat urbain CTTC avec un outil radiatif prenant en compte les inter-réflexions en site urbain et un code détaillé d'énergétique du bâtiment prenant en compte les effets de vitrage, de luminosité des locaux intérieurs et des scénarii d'occupation intérieure. Les gains sont représentés normalisés par rapport à un canyon *H*/*W* = 1 et 20% de vitrage.

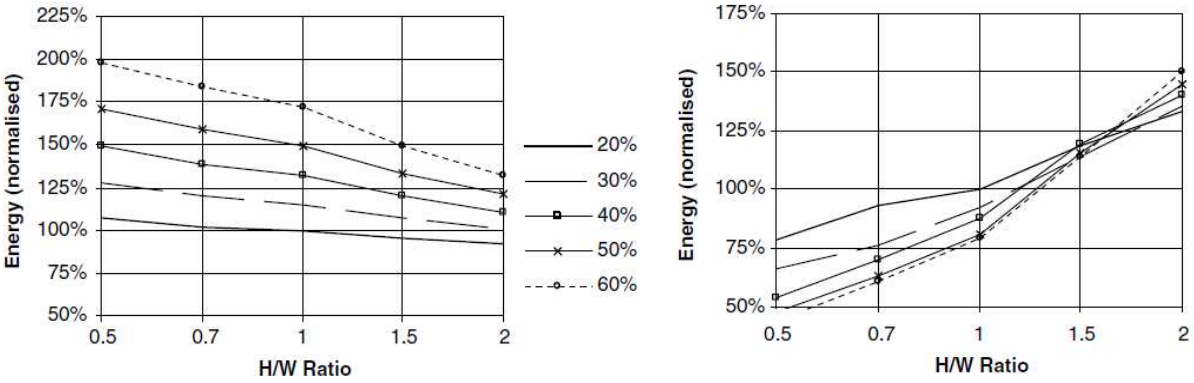


Figure 19 : Variation de la demande d'énergie utilisée pour la climatisation (a) et le chauffage(b) pour les bâtiments d'un canyon en fonction de son ratio *H/W* et de son taux de vitrage

L'énergie normalisée nécessaire à la climatisation diminue lorsque le ratio géométrique augmente et que la demande est maximale pour de grandes surfaces vitrées à l'intérieur d'une rue espacée. De plus, l'écart entre les consommations en rafraîchissement relative à la taille des vitrages diminue lorsque le ratio géométrique augmente. En hiver, la demande en chauffage est moins importante pour les canyons espacés avec des ratios *H*/*W* inférieur à 1 et qui ont une faible surface vitrée. Pour les canyons étroits, *H*/*W* > 1, la demande énergétique en chauffage se réduit lorsque l'on augmente le ratio de vitrage. En intégrant la consommation relative à l'éclairage selon une valeur seuil du rayonnement solaire transmis à travers les vitrages l'ensemble des variations de la consommation énergétique sont sommées sur la période annuelle pour déterminer les émissions annuelles liées à la configuration de la rue canyon, qui bien sûr sont aussi dépendants des systèmes énergétiques utilisés (Figure 20).

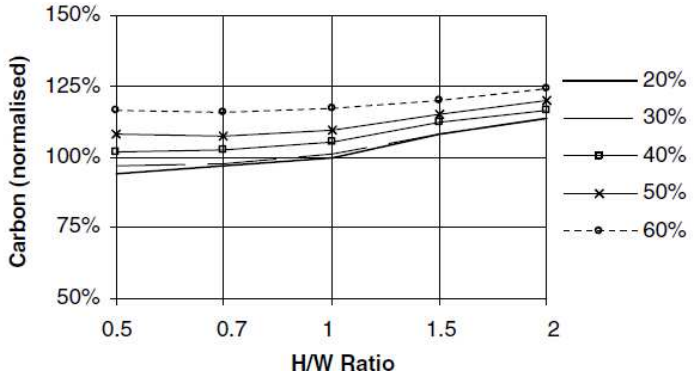


Figure 20 : variation des émissions annuelles en CO_2 liée à la consommation énergétique pour les bâtiments d'un canyon en fonction de son ratio H/W et de son taux de vitrage

La morphologie la plus adaptée à la conservation de l'énergie semble donc être la rue canyon la plus espacée possible avec le moins de vitrages possible. On est donc pratiquement dans la configuration des quartiers résidentiels pavillonnaires. Il faut rappeler que cette simulation ne prend pas en compte les effets aérauliques liés à la structure de rue canyon.

Comme vu précédemment, La variation spatiale de l'intensité d'ICU est largement dépendante des aménagements urbains, des formes architecturales et des techniques de construction. Ces paramètres diffèrent d'une ville à l'autre ; cependant, les quartiers caractérisés par une forte densité, des constructions élevées et une forte demande en climatisation (bureaux) sont toujours les plus touchés. Les toitures cools semblent avoir une efficacité maximale pour les structures pavillonnaires et pour les grands ensembles commerciaux où l'emprise au sol est beaucoup plus élevée que la hauteur du bâtiment. Bien que des gains directs sur la consommation énergétique aient été démontrés dans des cas d'utilisation de revêtements cool sur l'ensemble des toitures à l'échelle du quartier pour des scénarios extrêmes (blanc), le traitement de la toiture est surtout efficace pour les locaux situés directement sous la toiture.

Les images satellites (Voogt et al. 2003) et les campagnes expérimentales sur les flux sensibles et latents s'échappant de la canopée ont démontré la considérable influence des façades verticales et de la chaussée dans les rues composant les centres villes. Dans cet environnement bâti où la densité de construction est maximale, les facteurs de vue du ciel des surfaces sous la canopée sont réduits, le piégeage radiatif et la pauvre ventilation des rues entrainent une certaine inertie pour le refroidissement du volume d'air et des surfaces. Pendant les nuits d'été, les températures de façades d'un canyon à Göteborg, en, Suède demeurent 5 à 7°C plus chau-

des que les toitures pendant la nuit et cette tendance est respectée quelle que soit la saison avec des contrastes un peu moins importants pendant l'hiver (Offerle et al. 2007). L'utilisation de façades cool semble être une bonne solution pour réduire leur stockage d'énergie radiative diurne.

Le travail qui suit propose d'étudier la performance de façades cool et colorés cool sur le stockage d'énergie par piégeage radiatif dans une rue canyon par une approche expérimentale. Cette étude permettra de compléter les connaissances sur les phénomènes physiques liés aux interactions radiatives entre les structures urbaines selon la distribution de la réflectivité à leur surface. La rue canyon, déjà utilisée dans de nombreuses études, semble être la structure générique la plus représentative de l'espace urbain dense. Les influences liées aux paramètres caractéristiques du canyon, tels que la convection aux surfaces, les propriétés thermiques des matériaux, les facteurs géométriques ou la dégradation des réflectivités initiales par vieillissement seront approchées par mesures de bilans de surfaces et complétées par des simulations numériques sur les outils appropriés.

2. Performances thermiques des peintures sur un élément « paroi »

Ce chapitre présente une analyse du bilan énergétique de revêtements applicables au bâtiment. D'abord, nous détaillerons la caractérisation précise des réflectivités solaires et des émissivités GLO de quelques échantillons à l'état neuf réalisée en laboratoire par spectrophotométrie et émissiométrie. Quatre paires d'échantillons de peintures standards / cools sont étudiées. Ces échantillons ont ensuite été disposés sur un banc expérimental extérieur durant une longue période au cours de laquelle leur température de surface et les sollicitations climatiques ont été mesurées. Les photographies des échantillons sur leur support d'expérience après 3 mois d'exposition sont présentées dans la figure 21.

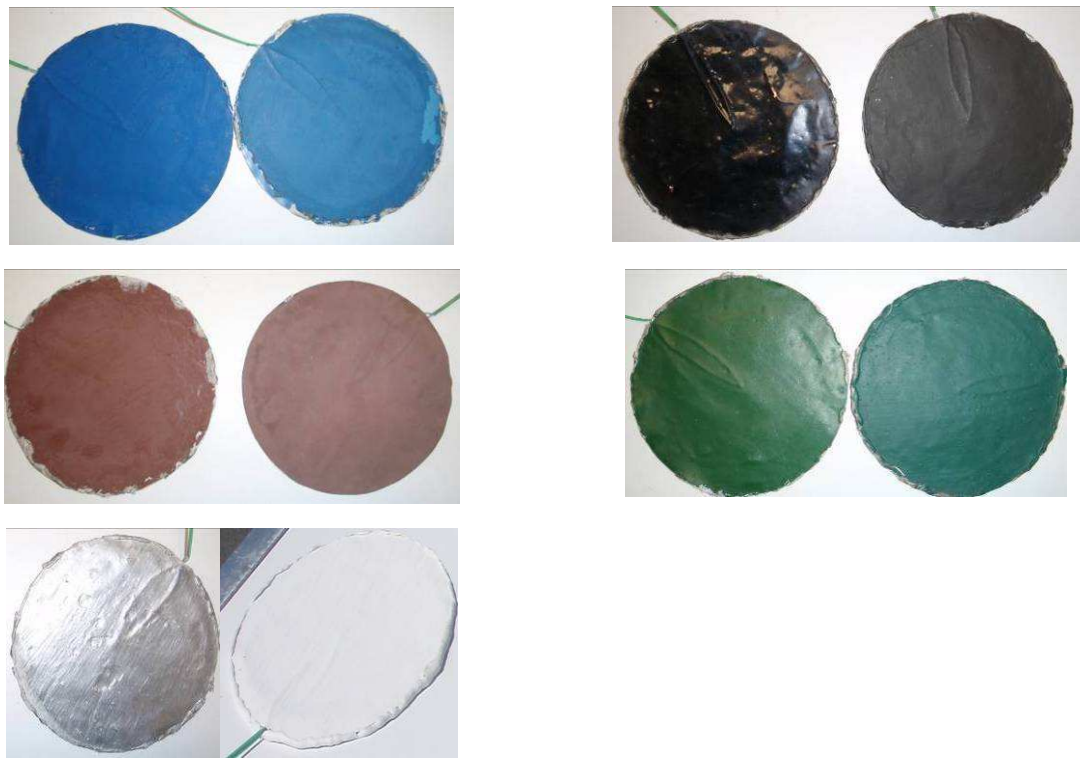


Figure 21 : Disques peints avec les 10 échantillons standard (gauche) et cool (droite) plus les échantillons aluminium et blanc

Les données obtenues ont été traitées de manière à calculer simultanément un coefficient de convection surfacique variable en fonction de la vitesse du vent et 10 réflectivités solaires supposées constantes sur la période de mesure prenant en compte à la fois le vieillissement et l'évolution de l'énergie spectrale contenue dans le rayonnement solaire non normalisé.

2.1. État de l'art et objectifs : Caractérisations et performances des échantillons

L'utilisation de matériaux d'enveloppe ayant une réflectivité solaire et une émissivité GLO élevées pour réaliser des économies d'énergie s'est avérée intéressante pour les toitures (paragraphe 1.4.3). Si la performance énergétique atteinte est dépendante des caractéristiques du bâtiment, la réflectivité d'une surface quant à elle est dépendante de l'état de surface et en particulier de son évolution du fait de leur exposition au climat extérieur et aux intempéries. L'objectif de ce chapitre est de compléter les résultats liés aux performances thermiques des peintures « cools » par rapport à leurs homologues « standards ». Il est nécessaire avant de commencer ce travail de rappeler quelques notions fondamentales quant à la performance théorique des peintures et aux connaissances techniques déjà acquises.

2.1.1. Effet de la pureté et de la concentration

Une peinture est généralement composée de pigments dispersés dans une matrice transparente. La réflectivité globale de la peinture dépend fortement de la quantité de pigments mis en jeu, de leur nature et de leur réflectivité.

D'un point de vue microscopique, on observe que les photons arrivant sur un film de peinture ont tendance à se disperser plusieurs fois avant de ré-émerger du milieu comme lumière réfléchie. En raison du parcours « aléatoire » des photons dans le milieu dispersant, le chemin suivi par les photons réfléchis peut s'avérer long et semé de nombreuses particules de matière absorbantes, ce qui peut réduire fortement la réflectivité. Pour obtenir des matériaux hautement réfléchissant, il convient alors de créer des peintures possédant une densité volumique importante de pigments, fortement diffusifs (Levinson et al. 2005).

L'amélioration de la réflectivité solaire globale de produits colorés pour applications architecturales passe par l'identification de la capacité des pigments à demeurer « froids » en présence d'un rayonnement thermique en opposition à ceux qui s'échauffent. Le laboratoire de Berke-

ley (LBNL, États-Unis) mène une recherche axée sur la combinaison des composants du film de peinture et de leur interaction avec le substrat à l'échelle microscopique. Pour cela, la réflectivité, l'absorptivité et la transmittivité spectrale de 223 films de peintures (mélange de pigments et d'un milieu transparent) sont mesurées sur deux substrats différents (un blanc, un noir) et sans substrat. La liste des films testés est extensive (Levinson et al. 2005). Les coefficients de Kubelka-Munk qui estiment l'absorption et l'éparpillement des photons à l'intérieur du média transparent pigmentés, sont calculés d'après les mesures macroscopiques de la réflectivité des films. Cette méthode permet de classer les films en 3 catégories:

- les pigments qui peuvent être utilisés pour la confection de produits « cool » appliqués à une sous-couche réflective (blanc/métal),
- les pigments « cool » qui éparpillent d'eux-mêmes les photons contenus dans les proches infrarouges, pouvant être appliqués à n'importe quel substrat.
- et les pigments catégorisés « chauds » impropres à la fabrication de produits « cool ».

Par la suite, le but est d'obtenir une méthode volumétrique simple permettant de définir les quantités de composant pour obtenir un mélange de couleur choisie atteignant la réflectivité maximale. Ces résultats ont été utilisés à l'Université d'Athènes pour produire leurs propres peintures cools préparées de manières traditionnelles. Ce sont ces peintures que nous avons utilisées pour notre étude. D'autres études, présentées ci-après, ont permis de démontrer aussi l'impact des paramètres d'aspects surfaciques qui influent sur la réflectivité solaire des matériaux finis.

2.1.2. Effets de la rugosité

A l'échelle des longueurs d'onde du rayonnement solaire, l'état de surface d'un revêtement polymérique ou d'une peinture apparait comme rugueux. C'est pour cela, qu'à l'œil nu, elles paraissent colorées, noires ou blanches et non luisantes, ou réfléchissantes à la manière d'un miroir. Berdahl et al. (1997) ont comparé la réflectivité d'une peinture blanche pulvérisée sur une plaque de verre et sur un shingle bitumineux. La surface exposée du shingle a été estimée à 2 fois sa surface nominale. La figure 22 illustre les tests par spectroscopie effectués sur ces 2 substrats ainsi revêtus. Les échantillons ont été pesés avant et après application afin de vérifier qu'ils avaient bien reçu la même quantité de peinture.

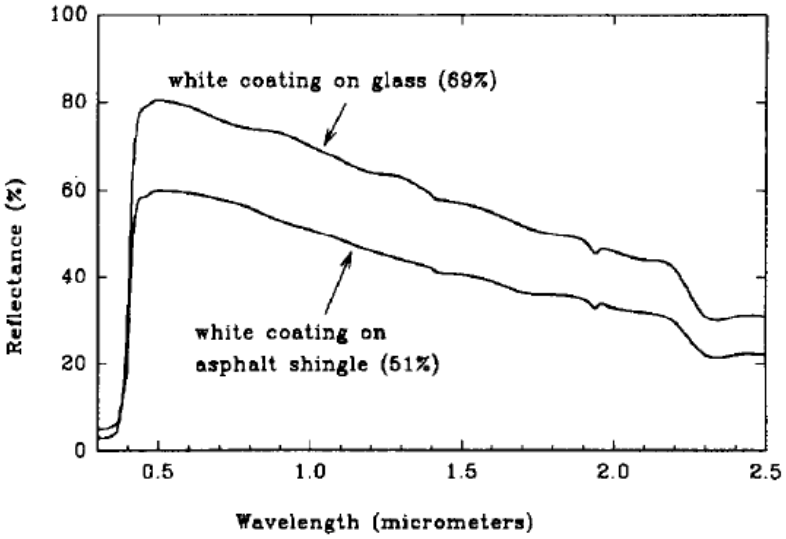


Figure 22 : Réflectivité spectrale de la même peinture appliquée sur un substrat de verre lisse et sur un bardeau d'asphalte rugueux (granules d'environ 1 mm de diamètre).

La forme des courbes spectrales est similaire mais la réflectivité de l'échantillon rugueux ne vaut que les ¾ de la valeur de la surface lisse. On peut aussi voir que la perte maximale en réflectivité des matériaux rugueux se trouve dans les longueurs d'onde visibles. Cet aspect est confirmé par la figure 23 qui affiche nos résultats de tests spectrophotométriques. La réflectivité CLO d'une peinture bleue cool a été ajustée par un spectre solaire normalisé afin d'estimer la part réfléchie par la peinture selon si elle est appliquée à la surface d'une plaque de cuivre lisse ou à la surface d'un échantillon de bardeau bitumineux recouvert de concassé d'ardoise noir présentant un aspect rugueux.

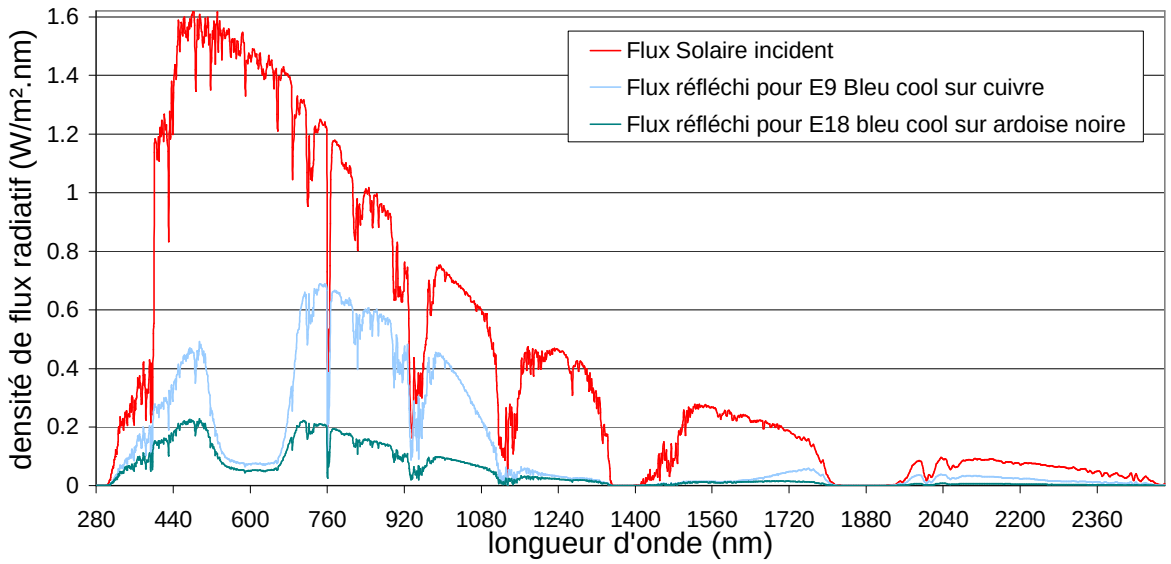


Figure 23 : comparaison de la réflectivité de la peinture Bleu COOL sur des substrats de rugosité différente (cuivre et ardoise rugueuse)

Dans les 2 cas nous avons appliqué 2 couches de peintures aux différents substrats. Le flux radiatif réfléchi de cette même peinture appliquée à l'échantillon rugueux sur le spectre courte longueur d'onde est inférieur de 18,8% par rapport à celui pour un substrat lisse. On remarque néanmoins que les 2 courbes suivent une même tendance dans leur distribution spectrale. Plusieurs hypothèses peuvent être faites. La réflectivité est dépendante du pouvoir couvrant de la peinture, de la couche appliquée et des propriétés radiatives d'origine du substrat. Ou, si l'on se concentre sur une échelle au dixième de millimètre, la réflectivité est la probabilité pour un photon incident d'être réfléchi immédiatement après avoir rencontré une surface. Si la surface considérée est rugueuse plutôt que lisse, un photon qui est réfléchi est susceptible d'avoir besoin de plusieurs réflexions avant de s'échapper. Ainsi, la probabilité qu'il soit absorbé augmente. La rugosité entraîne donc une diminution de la réflectivité de surface. Il sera nécessaire par la suite de préciser la nature, l'aspect et la couleur des substrats utilisés pour la mesure des caractéristiques radiatives de surfaces puisque celles-ci sont susceptibles de changer pour tout autre support.

2.1.3. Objectifs

Les matériaux utilisés pour le revêtement de toitures ou de parois verticales peuvent être étudiés hors du système « bâtiment » par des caractérisations de surfaces en laboratoire (émis-

siométrie, spectrophotométrie) ou par des suivis de température d'échantillons exposés en extérieur. Les mesures de laboratoires pour les caractéristiques radiatives nécessitent un matériel couteux, l'Université d'Athènes nous a permis d'utiliser leur spectrophotomètre pour une mesure de la réflectivité solaire initiale de 10 échantillons de peinture. Pour apprécier les performances thermiques de ces peintures soumises aux conditions climatiques de La Rochelle, nous avons conçu un banc expérimental extérieur qui permet le suivi simultané des températures de 10 échantillons et des densités de flux thermique à sa surface. Ensuite le travail a été focalisé sur une méthode expérimentale permettant d'accéder aux absorptivités GLO et solaire caractéristiques de nos échantillons et ainsi qu'au coefficient de convection surfacique caractéristique du banc. La mesure initiale de la réflectivité en laboratoire va servir de comparaison aux coefficients radiatifs estimés par notre méthode mais également à calibrer le banc en retrouvant ses coefficients de transfert convectif par fermeture du bilan énergétique expérimental. L'objectif de la méthode est d'apprécier les performances et l'évolution des coefficients radiatifs dans le temps lorsque soumis à des conditions climatiques variables, en étudiant les corrélations existantes entre la température surfacique d'un élément horizontal, son absorptivité solaire ainsi que les effets de l'émissivité thermique et de la convection.

2.2. Caractérisation des échantillons par spectrophotoscopie

Cette partie porte sur la caractérisation des réflectivités CLO effectuée pour les échantillons de peinture, appliqués sur des plaques de cuivre présentées en introduction, et dont les caractéristiques sont détaillées dans le paragraphe 2.2.4, ainsi que sur 9 échantillons de revêtements de toitures pour l'étanchéité. Les mesures de réflectivité solaire ont été effectuées à l'Université d'Athènes sur un spectrophotomètre modèle CARY5000. Les mesures commencent nécessairement par une étape de calibration de l'appareil, on enregistre d'abord la réflectivité d'une base, échantillon blanc recouvert uniformément de PTFE (Polytetrafluoroethylene), censée fournir une réflectivité supérieure à 96% dans le spectre 200-2500nm et plus grande que 99% dans la gamme 350-1800nm. La sphère intégrante, elle aussi recouverte du même matériel doit maintenir la mesure de sa réflectivité indéfiniment si celle si n'est pas sujette à de la fumée ou d'autres contaminants. Le disque en PTFE est monté sur le port de réflectivité, un rayon de 1000 W/m² est dirigé vers l'échantillon et le flux réfléchi par sa surface est collecté par la sphère intégrante placée en amont. Afin de bien réaliser les mesures il nous faut aussi une base pour la réflectivité nulle, celle-ci est obtenue par une mesure de

la réflectivité de la sphère intégrante en bloquant le rayonnement direct avant son entrée dans celle-ci. Après la calibration, on monte les échantillons qui nous intéressent sur le même port, leurs réflectivités seront donc mesurées relativement à celle du disque PTFE et à la réflectivité nulle. On appelle cela méthode de substitution. La valeur mesurée dans notre cas est la réflectivité totale composée de la réflectivité diffuse et spéculaire que l'on peut considérer valide sur le domaine spectral 250 – 2500nm.

2.2.1. Présentation brute de la réflectivité des échantillons à une source de 1000 W/m² en fonction de la longueur spectrale.

La figure 24 présente les courbes de réflectivité obtenues dans le domaine 200 – 2500 nm pour des produits ayants un aspect blanc (la référence en PTFE, 2 revêtements d'étanchéités pour toiture de marque SOPREMA, une peinture standard pour façade appliquée sur du cuivre), et la figure 25 pour des produits d'aspect métalliques.

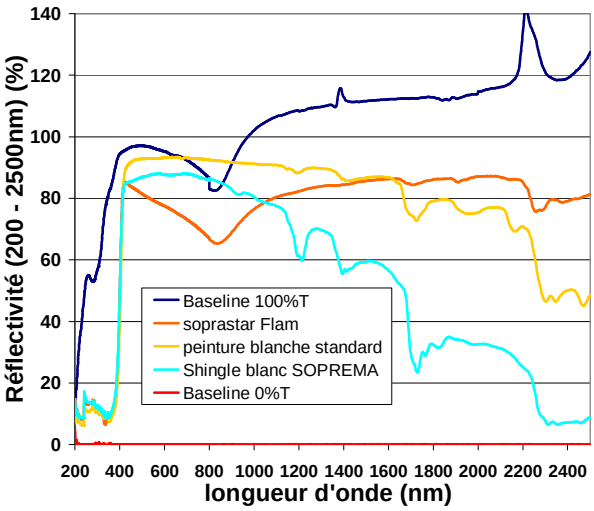


Figure 24 : mesures de la réflectivité spectrale pour différents produits de surface blanche

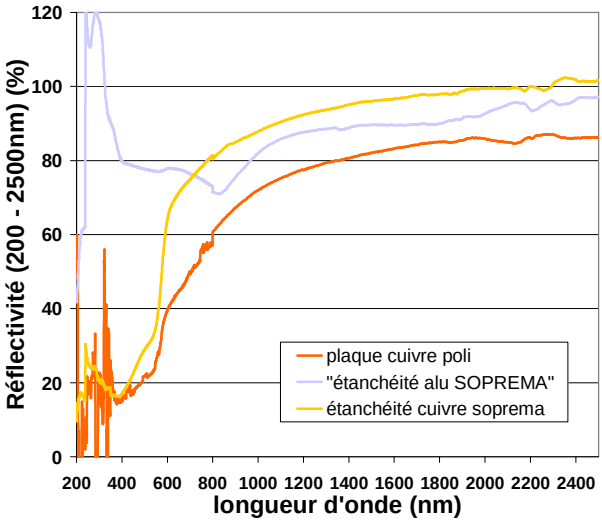


Figure 25 : mesures de réflectivité spectrale pour des surfaces métalliques

On constate que pour certains matériaux, la bande 200-400nm constitue aussi le domaine limite des mesures. Elles sont entachées de bruits et leur interprétation physique n'est guère possible. Par la suite, notre calcul de la réflectivité solaire, sera limité au domaine 280-2500nm. Les mesures supérieures à 100% de réflectivité ont eu lieu principalement avec les 2 échantillons à surface gaufrées, on peut supposer que les irrégularités de surfaces empêchaient

la fermeture totale de la sphère intégrante est par conséquent, la surface d'échantillonnage visée par le rayon se trouve être plus importante menant ainsi à des erreurs sur certaines longueurs d'onde.

2.2.2. Variations des mesures de réflectivité spectrale

La comparaison de la redondance des résultats a été faite suite à la répétition des mesures de réflectivité spectrale pour différents échantillons présentant une rugosité de surface. Cette comparaison montre des variations de 1 à 8%, la valeur la plus importante s'appliquant aux échantillons ayant une surface rugueuse ou exposant des formes particulières. Le résultat de la mesure du spectrophotomètre Cary 5000 est dépendant de la précision du positionnement de l'échantillon étudié mais aussi de la mesure sur la base en PTFE qui peut varier légèrement. Nous détaillons les valeurs recueillies pour les peintures appliquées à un substrat de type feuille de cuivre qui présentent des variations inférieures à 1%.

2.2.3. Méthode de détermination des réflectivités solaires

Le flux solaire terrestre incident réel n'est pas aussi régulier qu'une courbe de Wienn, des absorptions sélectives par les espèces moléculaires présentes dans l'atmosphère interviennent dans des bandes de longueurs d'onde précises, par conséquent il est nécessaire d'évaluer une réflectivité totale pondéré par le flux solaire réel incident en fonction de sa distribution spectrale. Cette mesure de la réflectivité se fait généralement sous différentes sources artificielles et naturelles, avec des distributions spectrales variées. Dans des secteurs tels que l'industrie des cellules photovoltaïques, où l'efficacité des modules dépend fortement de la fréquence du rayonnement incident, la répartition spectrale de l'éclairement solaire incident a dû être normalisée. Pour les modules destinés aux applications terrestres, l'ASTM (American Society for Testing and Materials) avec des partenaires industriels et des laboratoires de recherche ont défini 2 spectres solaires normalisés, que l'on retrouve dans la norme ASTM G173-03 et internationalement connue sous le nom spectre 1.5 AM, qui correspond au spectre de rayonnement solaire après qu'il ait traversé une épaisseur d'air pur correspondant à 1.5 fois l'épaisseur de l'atmosphère, pour un ensemble de conditions atmosphérique très spécifique.

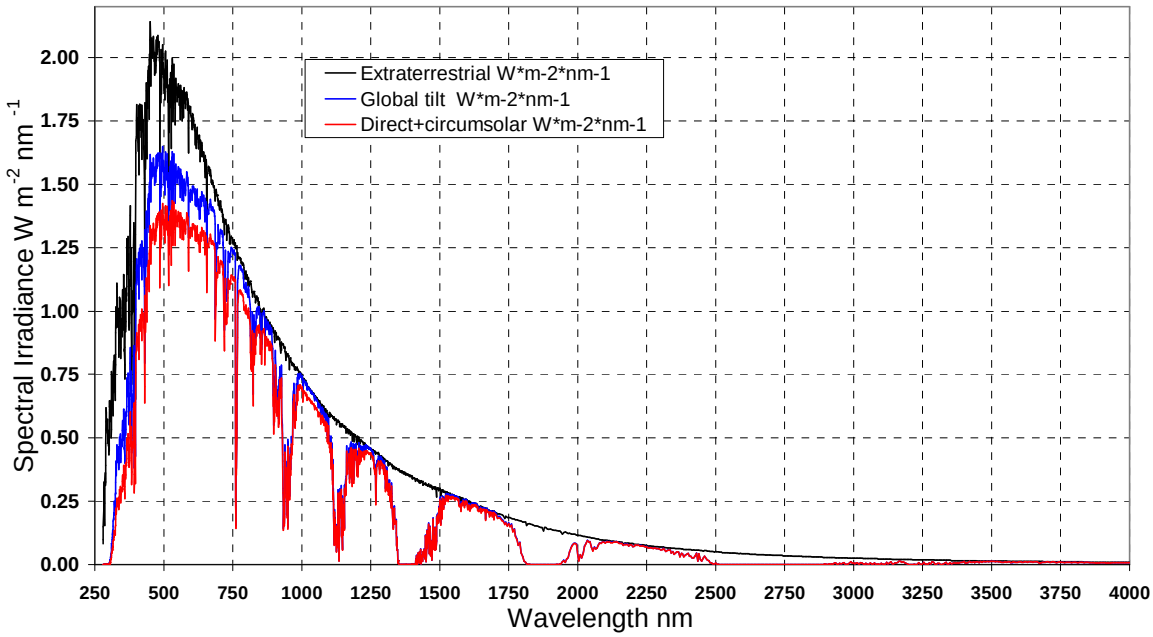


Figure 26: Spectres solaires de référence appartenant à la norme ASTM-173-03

Le document utilisé (http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/) rassemble dans une même feuille Excel, la norme de l'éclairement solaire spectral normal direct, le spectre extraterrestre AM0 avant les multiples absorptions moléculaires réalisées dans l'atmosphère développé par Gueymard (2006) et le spectre qui nous intéresse particulièrement, celui du rayonnement global total sous AM 1,5 (rayonnement hémisphérique dans un champ de 2π Stéradians d'une surface inclinée). La situation définie se présente en pratique lorsque le ciel est très clair et que le Soleil se trouve à une hauteur de 41.8° au-dessus de l'horizon. Cette norme a été élaborée pour satisfaire raisonnablement aux conditions moyennes pour les 48 états contigus des USA sur une période d'un an. L'angle d'inclinaison étant défini par la latitude moyenne approximée des états contigus. La surface de réception est définie dans la norme comme une plaque inclinée à 37° vers l'équateur la normale pointant vers le soleil. Les conditions atmosphériques sont basées sur la variation moyenne de température, pression et masse volumique de l'air ainsi que sa concentration en aérosol et espèces moléculaires spécifiées dans 33 couches atmosphériques différentes. La masse d'air absolue étant de 1,5 et la turbidité atmosphérique d'Angstrom est définie à 0,084 à 50nm, une colonne de vapeur et d'ozone équivalente sont également définis (1,42 et 0,34cm). Dans ces conditions, l'intensité du rayonnement est perturbée par l'absorption d'une partie du rayonnement par l'atmosphère et un facteur de nor-

malisation est alors appliqué pour ramener le spectre à la puissance globale de 1000 W/m² (Flux solaire estimé pour un soleil au zénith par ciel totalement dégagé).

Afin de déterminer la réflectivité solaire sur le spectre 280-2500nm, nous utilisons le spectre solaire standard (normes ASTM) en guise de fonction de pondération.

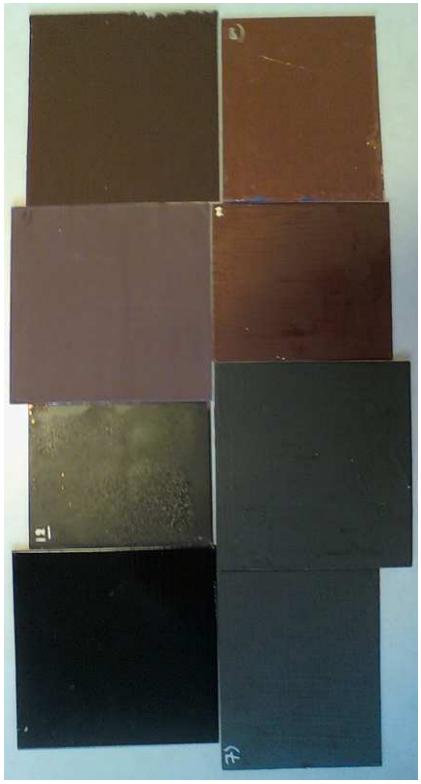
$$RS_{totale} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\lambda,i} \cdot E_s^{\lambda,i} . d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_s^{\lambda,i} . d\lambda}$$ Équation 7

Dans cette formule, ρ est la réflectivité spectrale pour une longueur d'onde λ, et E_s, l'éclairement spectral. La forme du spectre dans le domaine des visibles (0,38 à 0,76 µm) contient des informations pour comparer la concomitance des couleurs entre les différents échantillons. Les mesures effectuées sur le Spectrophotomètre se situent entre 200 et 2500 nm alors que la bande spectrale solaire fournie par la norme standard est située entre 280 et 4000 nm. Néanmoins les mesures en dessous de 300nm sur le spectrophotomètre ne sont pas toujours très fiables, le bruit y est important. Et si une densité de flux solaire au niveau extraterrestre existe dans le domaine des UV (100 – 400 nm), la densité de flux reçue au niveau de la surface terrestre est souvent négligeable jusqu'à 300 nm. Par conséquent nous avons réduit notre spectre de travail pour déterminer la réflectivité solaire de nos échantillons à 280 -2500nm, spectre qui après intégration du flux global reçu sur les longueurs d'onde, s'avère être de 992,6 W/m², soit 99,2% du rayonnement incident total incident contenu sur 280 - 4000 nm (1000,4 W/m²).

2.2.4. Comparaison de la réflectivité entre les produits standards et les produits COOL de même teinte.

Lors des essais en laboratoire nous disposions de 4 échantillons de peintures « cool », 3 échantillons de peintures « classiques » aux tons similaires, 1 noir et 1 blanc « traditionnel ». Les peintures « cool » proviennent du groupe GRBES de l'université d'Athènes (Synnefa et al. 2006), aux pigments originels d'une peinture traditionnelle pour façade ont été ajoutés des pigments hautement réflectifs dans le spectre des proches infrarouges. Nous comparons ces 4 échantillons à 4 autres peintures traditionnelles ayant une tonalité similaire (produit standard du commerce), que nous appellerons peintures « standards». Les peintures cools testées sont

destinées aux façades et toitures des bâtiments urbains de type béton. Les couleurs équivalentes « standards» choisies, non commercialisées en standard en peinture de façade sont destinées aux métaux et peuvent présenter quelques différences physiques, mais sont bien adaptées au substrat utilisé pour nos expériences (cuivre). Leur aspect surfacique est satiné, la réflectivité est donc plus élevée que celles des peintures mates. La figure 27 présente les teintes étudiées, sur un substrat en cuivre, qui n'ont jamais été exposés aux conditions extérieures :



a)

b)

c)

Figure 27: Échantillons de peinture "cool" et "standard" sur substrat de cuivre et d'aluminium (a : marrons, anthracites et noirs, b : blanc et aluminium, c : bleus et verts)

Les 4 couleurs provenant des peintures du commerce utilisées pour les portails et autres ferronneries sont un bleu atlantique satiné, un vert sapin satiné, un marron châtaigne satiné appliqués au pinceau et un noir mat en bombe aérosol. Le revêtement blanc est couramment utilisé pour les façades en bord de mer en Charente maritime. Au premier abord, on peut constater que l'état des surfaces n'est pas le même. Les peintures métalliques présentent une surface très lisse et satinée, cette propriété étant conférée par différents agents chimiques. Cette remarque est importante, car en plus des pigments, l'état de surface influe fortement sur les propriétés radiatives (par exemple pour l'aluminium, la réflectivité d'une plaque polie sera de

0,9, et seulement de 0,2 pour l'aluminium brut). Les moyens d'application utilisés pour les peintures influent sur les reliefs imprimés sur nos surfaces. Les peintures blanche et noire servent de référence, elles représentent a priori le maximum et le minimum atteignable en termes de températures de surface. Le noir est aussi comparé à son équivalent en peinture « cool » : l'anthracite. Les figures qui suivent illustrent l'intérêt du calcul d'une réflectivité pondérée par les diverses absorptions constatées sur le spectre solaire normalisé. Néanmoins les absorptions spectrales réelles de l'éclairement solaire incident varient selon la composition de l'atmosphère et les réflectivités solaires effectives peuvent se révéler un peu différentes de celles mesurées en laboratoire.

Résultats pour les teintes bleues standards / bleues cool

La figure 28 montre les résultats bruts de coefficient de réflectivité des 3 échantillons bleus à une source de 1000W/m². Les trois bleus suivent globalement la même tendance jusqu'à 700 nm, ensuite leurs évolutions divergent. La réflectivité des bleus standards (foncé et éclairci) augmente brusquement à la transition VIS / PIR (780 - 800 nm) suivi d'une légère diminution régulière dans le domaine PIR. L'albédo produit cool, quand à lui, affiche une forte augmentation dès 700 n m, et chute ensuite dans le domaine 1200-1600 nm (forte absorption spectrale des pigments utilisés), avant de remonter à une valeur supérieure aux produits standards.

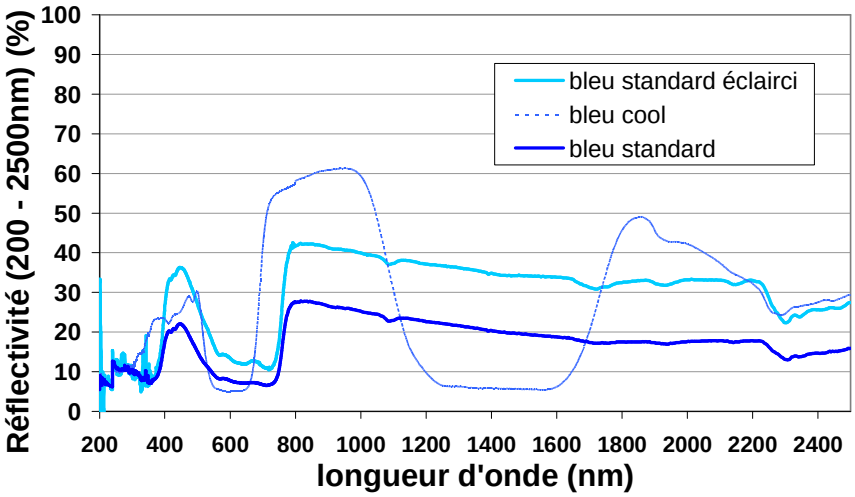


Figure 28 : comparaison de la réflectivité donnée par le spectrophotomètre à 1000W/m² d'une peinture bleu standard, de la même peinture bleu éclaircie avec du blanc et d'une peinture bleu préparée COOL

Si on calcule la réflectivité totale hémisphérique entre 280 et 2500 nm, à partir des mesures brutes données par le spectrophotomètre, pour les échantillons à teinte bleue en intégrant la courbe par la méthode des triangles par exemple, on trouve les valeurs suivantes : 17,3% pour le Bleu standard, 29,3% pour le bleu standard éclairci avec du blanc et 27,2 pour le bleu COOL. La figure 29 quant à elle montre la densité d'éclairement réfléchi pour un éclairement normé de référence, d'où la réflectivité solaire totale sur le spectre 280 - 2500 nm.

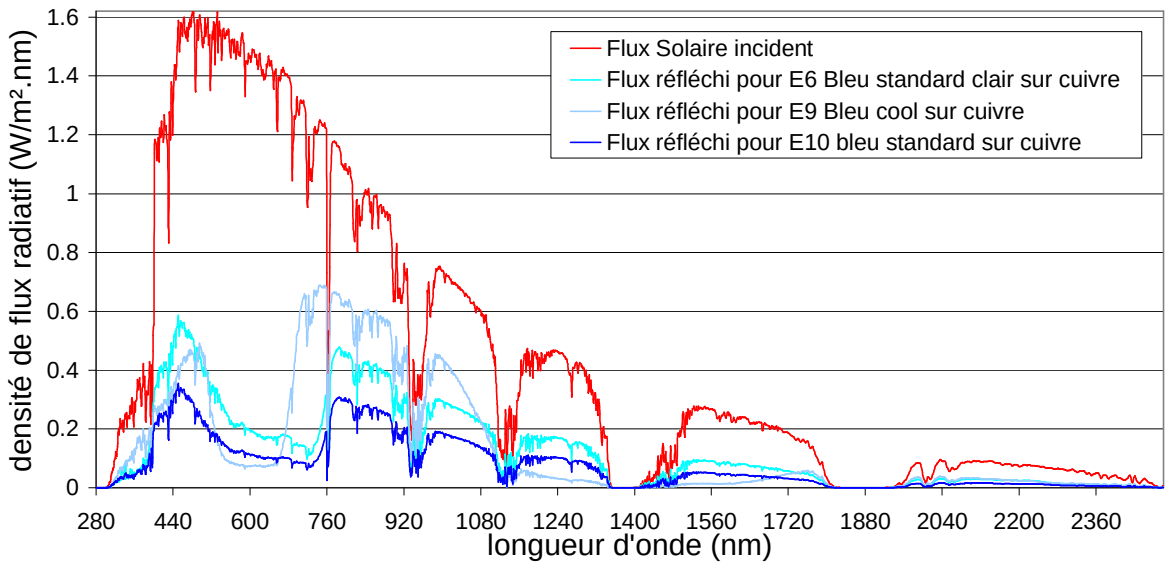


Figure 29: comparaison de la réflectivité des peintures Bleues standard, standard éclairci avec du blanc et COOL

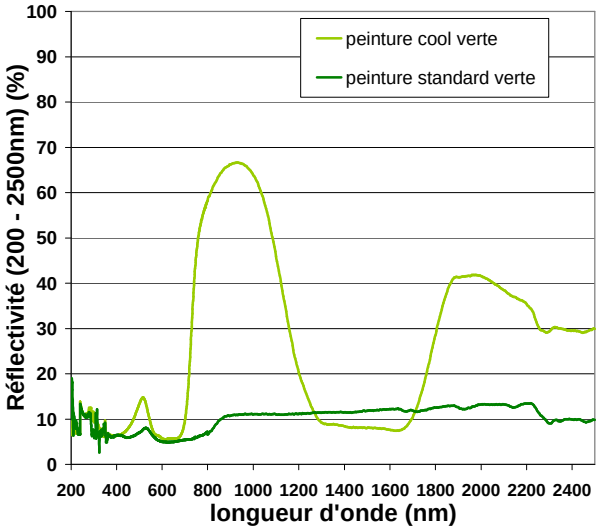
Les valeurs de la réflectivité de nos peintures bleues deviennent alors 16,9% pour le Bleu standard, 27,7% pour le bleu standard éclairci avec du blanc et 29,2% pour le bleu COOL. Les variations obtenues ne sont pas flagrantes mais elles démontrent par exemple que pour le bleu cool, le pic de réflectivité relevé dans la bande de longueur d'onde 1600-2300nm par le spectrophotomètre n'a que très peu d'effet sur l'augmentation de la réflectivité solaire effective, puisque cette bande spectrale contient seulement 7% de l'énergie totale incidente.

Résultats pour les teintes vertes et marrons

Pour les produits de teintes verte et marron, la différence entre les résultats obtenus par l'intégration sur données brutes et la pondération sur le spectre solaire sont considérables. On remarque sur les résultats bruts du spectrophotomètre (Figure 30) que dans le domaine du visible, le pic caractéristique des couleurs vertes dans les longueurs d'ondes 450 – 600 nm est plus élevé pour le produit cool, donc présente un aspect plus clair que le produit standard. La

peinture vert cool présente ensuite le même aspect que le bleu cool précédent, sa réflectivité est importante dans le domaine 700 – 1200 nm, chute fortement entre 1200 – 1700 nm avant de remonter. En revanche on observe une réflectivité PIR pratiquement constante pour le produit standard.

teinte verte



teinte marron

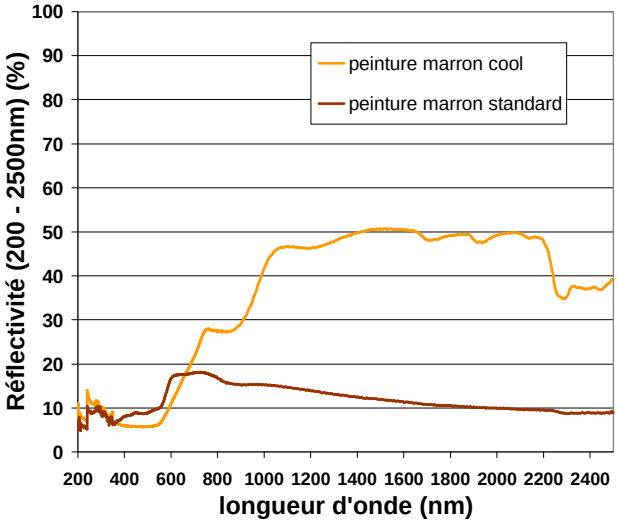


Figure 30 : comparaison de la réflectivité spectrale à une source de 1000W/m² d'une peinture standard et d'une teinte équivalente préparée COOL pour des teintes verte et marron

Le cas des marrons standard et cool s'apparente à un cas d'école, leur réflectivité brute dans les longueurs d'ondes visibles est relativement similaire (13,3 et 12,9 %) alors que dans le spectre des proches infrarouges, leurs valeurs peuvent être moyenné à 11,8 et 44,5%. On peut supposer que dans ce cas précis l'ajout des pigments hautement réfléchissant dans les infrarouges apportent une réelle plus value au produit pour des performances de rafraîchissement passif.

La figure 31 montre la part du flux solaire réellement réfléchie par les différentes peintures.

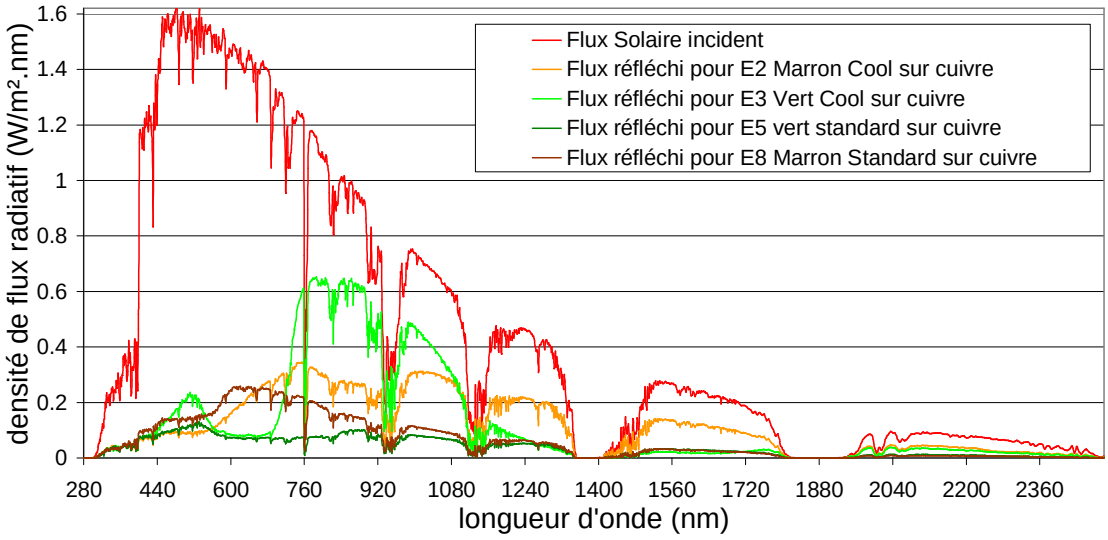


Figure 31: densité de flux réfléchie par les peintures cool et standard de teintes verte et marron par rapport à la densité de flux incident en fonction de la longueur spectrale

L'étude de ce type de peintures COOL montre que leur conception entraîne une augmentation de la réflectivité totale de 10,7% dans le cas des produits marron et de 17,4% dans le cas des produits verts.

Résultats pour l'aluminium et le cuivre

Le substrat de nos échantillons est une plaque de cuivre et comme il a été vu dans l'introduction bibliographique de ce chapitre, certaines peintures peuvent avoir des propriétés radiatives de surface influencées par la nature de leur substrat. Pour ces échantillons métalliques, les données brutes de réflectivité fournies par le spectrophotomètre, certaines mesures étaient supérieures à 100% de réflexion du flux incident. Ce phénomène survient en particulier aux extrémités de la bande spectrale du spectrophotomètre, lorsque l'échantillon de référence ne présente par 99% de réflectivité à une longueur d'onde spécifique et que la réflectivité de l'échantillon testé lui est supérieure, ces mesures ont toutes étaient ramenées à un indice de 100%. Les densités de flux radiatif réfléchi par trois échantillons sont présentées à la figure 32. La plaque de cuivre polie oxydée est en fait une chute des supports préparés pour recueillir nos échantillons de peinture, celle-ci à uniquement subi une légère oxydation par son exposition de quelques mois à l'ambiance intérieure. Les 2 revêtements d'étanchéités SOPREMA sont des produits bitumineux gaufrés recouverts d'une feuille d'aluminium ou de cuivre.

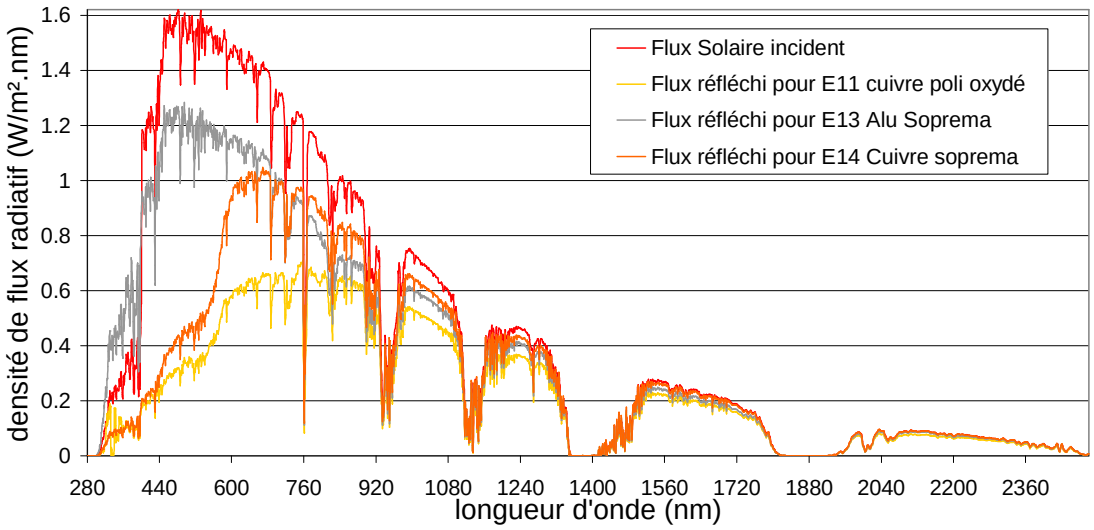


Figure 32: densité de flux réfléchie par les membranes bitumineuses SOPREMA recouvertes de feuilles de cuivre et d'aluminium gaufrés et par une plaque de cuivre lisse oxydée

On remarque qu'au dessus d'une longueur d'onde de 1100nm, la réflectivité des produits métalliques est particulièrement haute, pratiquement égale à 1. D'après les mesures de laboratoire, ces deux produits SOPREMA sont susceptibles d'être utilisés pour des applications de rafraîchissement des toitures, le produit en aluminium a une réflectivité totale de 80,1% et le cuivre est situé à 65,8%. L'expérience in situ a montré que le revêtement de cuivre était rapidement soumis à l'encrassement et à l'oxydation diminuant ainsi fortement ses capacités à réfléchir l'éclairement solaire. Néanmoins nous n'avons pas évalué le coefficient de réflectivité après usure due à une longue exposition aux intempéries. Le substrat lisse en cuivre oxydé à une couleur et une réflectivité CLO affaiblie par rapport au produit SOPREMA neuf (50,3%).

Résultats pour les produits blancs

Les produits blancs sont évidemment ceux qui obtiennent les meilleures performances. Sur le graphe ci-dessous, nous avons représenté ensemble la peinture blanche standard spécial façade achetée à un revendeur local, les 2 revêtements de toiture SOPREMA, le Soprastar® ayant une certification Energy star® pour ses performances en termes de réduction de la température de surface, et l'échantillon de PTFE.

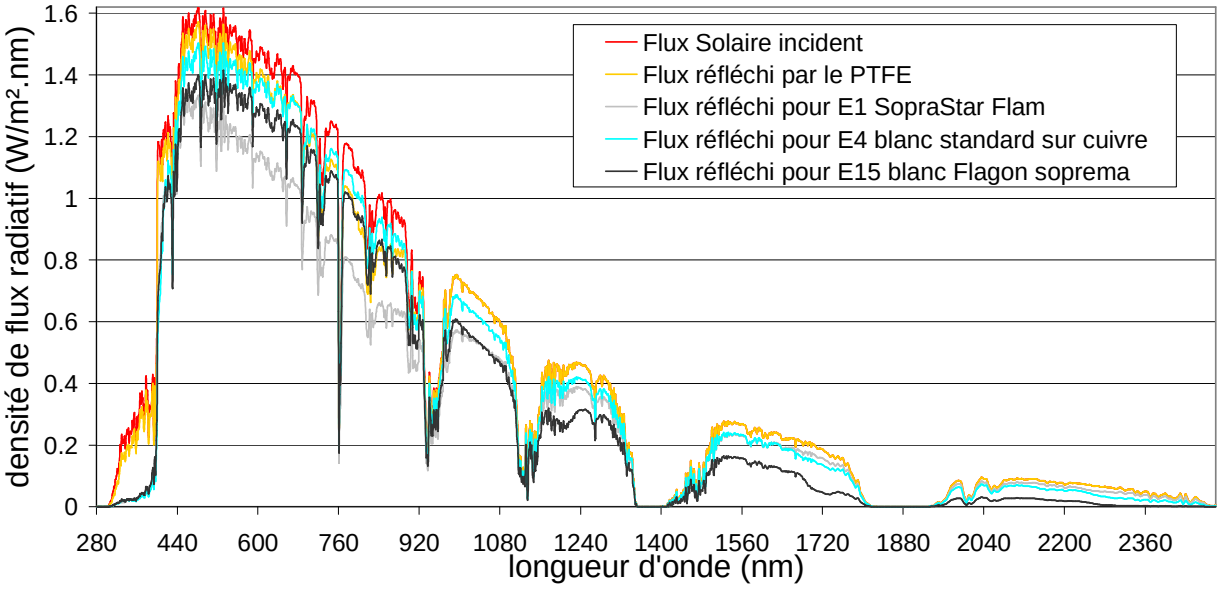


Figure 33: densité de flux solaire réfléchi par les revêtements blancs testés

Le PTFE est par définition le plus réfléchissant, avec une réflectivité supérieure à 0,9 sur toute la bande spectrale considérée. Les autres produits ont une réflectivité relativement basse dans le domaine des ultraviolets, puis différent par leur comportement entre les longueurs d'ondes visibles et proches infrarouges. La peinture pour façade garde une réflectivité supérieure à 0,82 sur ces 2 bandes spectrales, en revanche le FLAGON TPO™ a une réflectivité visible importante et présente une chute progressive de la réflectivité dans les PIR (<0,7) contrairement au Soprastar® qui voit son albédo augmenter dans ce même domaine (>0,75).

La réflectivité solaire de l'ensemble des peintures testées sur plaque de cuivre, sur revêtements bitumineux pour toiture et sur les produits manufacturés Soprema sont récapitulés dans le tableau 3. Les réflectivités intégrées sur les spectres intermédiaires des ultraviolets (UV), des visibles (VIS) et des proches infrarouges (PIR) sont aussi mentionnés.

Tableau 3 : tableau récapitulatif des réflectivités spectrales mesurées des 20 revêtements testés

N°	**Couleur et substrat**	**Réflectivité solaire spectrale, ρ_λ**			
		UV 0,28 - 0,38 µm	**VIS 0,38 - 0,78 µm**	**PIR 0,78 - 2,5 µm**	**Totale 0,28 - 2,5 µm**
0	PTFE	0,831	0,946	0.956	0.946
1	SOPRASTAR FLAM	0.099	0.762	0.769	0.744
2	Marron COOL sur cuivre	0.072	0.123	0.401	0.241
3	Vert COOL sur cuivre	0.069	0.127	0.426	0.254
4	Blanc Classique sur cuivre	0.095	0.900	0.879	0.865
5	Vert Classique sur cuivre	0.065	0.06	0.107	0.08
6	Bleu Classique éclairci sur cuivre	0.096	0.205	0.379	0.277
7	Anthracite COOL sur cuivre	0.08	0.102	0.413	0.235
8	Marron Classique sur cuivre	0.07	0.132	0.146	0.134
9	Bleu COOL sur cuivre	0.197	0.223	0.383	0.292
10	Bleu Classique sur cuivre	0.083	0.121	0.234	0.169
11	Cuivre Oxydé sur cuivre	0.193	0.337	0.735	0.503
12	Noir Classique sur cuivre	0.091	0.081	0.045	0.05

Le spectrophotomètre utilisé ne permet pas d'étudier la sensibilité directionnelle de la réflectivité, mais sauf cas exceptionnel, on peut assumer les hypothèses classiques, les échantillons polis donnent lieu à une réflexion spéculaire ou de type « miroir » (cuivre, alu, peintures brillantes). Les échantillons rugueux et mat de type « poudre compactée » donnent lieu à une réflexion hémisphérique et les peintures, plastiques… ont des caractéristiques de réflectivité directionnelle entre les deux. La figure 34 permet une meilleure comparaison des résultats :

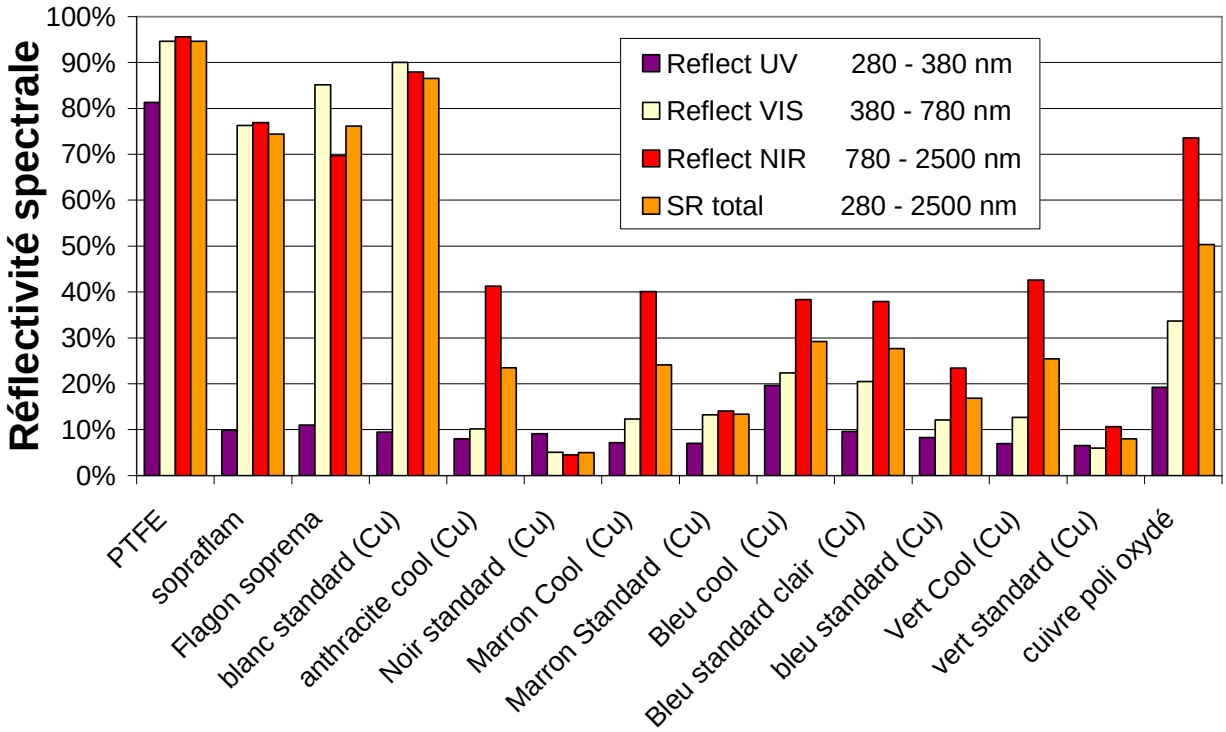


Figure 34: comparaison de la réflectivité solaire totale des échantillons, et pour les 3 grands domaines spectraux (UV, VIS et NIR)

Les produits cool voient en effet leur réflectivité totale augmentée par les pigments présents dans le domaine des proches infrarouges. Ils peinent néanmoins à atteindre la moitié des performances maximales obtenues par des produits blancs ou métalliques. La comparaison des paires standard/cool semble prometteuse puisque la réflectivité totale est plus que doublée sur les mesures effectuées au spectrophotomètre. Il convient de préciser que les peintures cools dont nous disposions étaient des échantillons artisanaux, non optimisés, et pour lesquels nous n'avions pas de produits « classiques » aux tons parfaitement homologues.

2.3. Caractérisation des échantillons par émissiométrie

L'émissivité de nos échantillons a été déterminée avec un émissiométre de modèle AE[1] (Figure 35). Cet émissiométre est un instrument comparatif qui demande une pré-calibration avec 2 matériaux de référence dont l'émissivité est connue et fournie. Les standards de référence sont un disque d'aluminium d'émissivité 0,06 et un disque recouvert de peinture noire

[1] Fabriqué par Devices & Services Co (D&S)

mate d'émissivité 0,88. Le détecteur est pourvu d'une résistance de chauffage qui lui permet d'atteindre une température de 82°C. Il est placé en contact avec la face supérieure des disques de référence ou de l'échantillon à mesurer, eux même disposé sur un dissipateur à ailettes, afin de maintenir une température d'équilibre du système et évitant ainsi d'avoir à chauffer l'échantillon test. Le capteur/ détecteur est en fait une thermopile différentielle composée de surfaces mixtes présentant des hautes et basses émissivités. La différence de température est de 0°C si l'échantillon testé est tout à fait réfléchissant (basse émissivité) et elle est plus élevée pour les échantillons d'aspect plus mat. La tension récupérée en sortie sur le voltmètre est linéaire avec l'émissivité avec une précision de ±0,01 sur cette émissivité.

Figure 35: Émissiomètre Modèle AE avec son voltmètre Digital

De part les précédentes caractéristiques de l'appareillage, on peut réaliser les mesures dans une pièce à température ambiante. Après l'étape de calibration, la mesure s'effectue en plaçant l'échantillon test et l'échantillon de référence à haute émissivité sur le dissipateur. Le dissipateur maintient une température constante, on peut alors mesurer la tension pour les 2 échantillons. Le détecteur doit être laissé en contact sur chaque plaque entre 60 et 90 secondes afin que la lecture se stabilise. L'émissivité de l'échantillon test peut alors être calculée à partir des tensions mesurées:

$$\varepsilon_{échantillon} = V_{échantillon} \cdot \frac{\varepsilon_{alu}}{V_{alu}}$$ Équation 8

ε_{alu} est l'émissivité du matériel de référence à haute émissivité (0,88), $V_{échantillon}$ et V_{alu} étant les 2 tensions mesurées lorsque le détecteur est disposé sur chaque échantillon.

2.3.1. Incertitudes sur la mesure

Kollie et al. (1990) rapportent une reproduction des mesures avec l'émissiométre D&S de ±0,008 pour une incertitude de ±0,014. Ils ont aussi montré que l'instrument mesurait essentiellement l'émissivité hémisphérique totale et non l'émissivité normale. L'élévation en température de l'échantillon à caractériser lors de son contact avec le détecteur est liée à sa conductivité thermique et à son épaisseur. Si la surface à caractériser et celle de référence ne sont pas à la même température lorsque la lecture faite par le détecteur atteint une valeur fixe, on introduit une erreur dans la mesure. En supposant que le régime permanent est atteint, l'erreur peut être estimée. Le détecteur est une thermopile différentielle qui par sa configuration ne peut réagir qu'aux échanges de chaleur radiatifs entre la surface de l'échantillon et la surface de la thermopile face à face. La grandeur de sortie du détecteur peut être exprimée par :

$$D = K.\varepsilon\left(T_d^4 - T_s^4\right)$$ Équation 9

$$\Delta\varepsilon \cong \frac{4.\varepsilon.T_a^3}{\left(T_d^4 - T_a^4\right)}.\frac{x}{k}.(150\varepsilon + 120)$$ Équation 10

$$\Delta\varepsilon \cong 0.856.\frac{x\varepsilon}{k}.(1.25\varepsilon + 1)$$

Avec *x*, l'épaisseur du substrat et *k*, la conductivité thermique du substrat.

2.3.2. Résultats des mesures

Nous avons utilisé des échantillons de 8 x 8 cm² pour les peintures sur cuivre à tester. Les essais ont été répétés plusieurs fois et leur moyenne a été utilisée comme valeur de référence de l'émissivité GLO. Le tableau 4 récapitule la valeur de l'émissivité pour chaque essai sur les 9 échantillons qui ont été soumis au spectrophotomètre plus 4 échantillons supplémentaires.

Tableau 4 : émissivité GLO des échantillons à notre disposition

Matériaux	Essai NKUA	Essai LR 1	Essai LR 2	Essai LR 3	Essai LR4	Essai LR4	Moyenne
(1) Noir Standard	0.89	0.89	0.89				0.890 ±0,014
(2) Marron COOL	0.86	0.87	0.88	0.86			0.868 ±0,014
(3) Vert COOL	0.87	0.87	0.875	0.88	0.88		0.875 ±0,014

(4) Blanc Standard	0.86	0.88	0.88	0.9	0.9	0.895	0.886 ±0,014
(5) Vert Standard	0.87	0.89	0.87	0.89	0.88	0.885	0.881 ±0,014
(6) Bleu Clair Standard	0.87	0.85	0.87	0.87	0.88	0.88	0.870 ±0,014
(7) Anthracite COOL	0.86	0.87	0.87	0.87	0.87		0.868 ±0,014
(8) Marron Standard	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89		0.890 ±0,014
(9) Bleu COOL	0.84	0.85	0.84	0.86	0.83	0.82	0.840 ±0,014
(10) Bleu Standard	0.86	0.88	0.88				0.873 ±0,014

(11) Marron ABOLIN	-	0.84	0.845	0.86			0.848 ±0,014
(12) Marron CASTO	-	0.89	0.89	0.9			0.893 ±0,014
(13) Aluminium Spray	-	0.37	0.405				0.388 ±0,014
(14) Noir spray R9011	-	0.89	0.88				0.885 ±0,014

L'ensemble des mesures réalisées ci-dessus permettront de calibrer notre banc expérimental extérieur de mesure présenté dans la suite.

2.4. Banc expérimental extérieur

Ce banc expérimental (XP1) est destiné à la caractérisation de la surface de l'élément paroi hors du système bâtiment. Il nous permet de caractériser les échanges thermiques à l'interface surface/environnement extérieur (utilisables pour un code numérique) et à constater les performances réelles de produits « cools » et d'estimer la dégradation des propriétés radiatives au cours du temps.

2.4.1. Protocole expérimental du banc extérieur

Le banc XP1 est composé de différents appareils de mesures météorologiques et thermiques reliés à une station de mesures[2] qui rendent possible la mesure des différentes composantes du bilan énergétique à la surface de 10 disques de cuivre similaires peint avec 10 échantillons de peintures différents. Le dispositif (Figure 37) permet l'estimation du bilan énergétique à la

[2] CR1000 de Campbell Scientific®

surface de feuilles de cuivres isolées avec du Kapton© et peintes avec des échantillons de peintures de notre choix. En fait, deux feuilles de Kapton© recouvertes d'une mince pellicule de cuivre épaisses de 0,0025 mm sont prédécoupées en disque de 15cm de diamètre avant d'être collées sur un thermocouple de type K (température de surface). La conductivité thermique élevée du cuivre ajoutée à la faible épaisseur du disque permet de supposer que la température mesurée est équivalente à la température de surface réelle.

Figure 36 : photographies du montage réalisé en toiture de l'université de La Rochelle
À gauche : 4 paires d'échantillons de couleurs identiques (Cool/standard) et 1 blanc
À droite : le radiomètre, l'anémomètre-girouette et la sonde humidité température de l'air

Le support a été réalisé en superposant 3 matériaux d'isolation (10mm de Komacell© / 80mm de polystyrène expansé extrudé / 10mm de Komacell©), le tout maintenu par un cadre en aluminium. La face arrière de nos échantillons de cuivre reposant sur cette isolation et la très faible épaisseur de cuivre (25 µm) nous permet de faire l'hypothèse d'un flux conduit négligeable devant toutes les autres composantes du bilan énergétique surfacique. Chaque disque de cuivre a été peint avec les échantillons à disposition puis fixé au support lisse dont les bords ont été étanchéifiés pour éviter les infiltrations d'eau ou les échanges convectifs via la face intérieure. Concernant la tenue et la dégradation des peintures dans le temps on observe un avantage aux produits « classiques », conçus pour les supports métalliques, lié à leur propriété d'adhésion et de résistance à l'expansion thermique. Le banc et les matériaux sont exposés aux fluctuations météorologiques sur la toiture terrasse d'un bâtiment de l'université de La Rochelle (h=14m), les bâtiments alentours de hauteur équivalente n'obstruent pas le champ de vision des échantillons et des appareils mesurant les flux radiatifs incidents, on peut ainsi considérer que le rayonnement de grandes longueurs d'onde incident est uniquement dû

à l'atmosphère. La figure ci-dessous présente la disposition de notre matériel expérimental nécessaire à la mesure de notre bilan thermique.

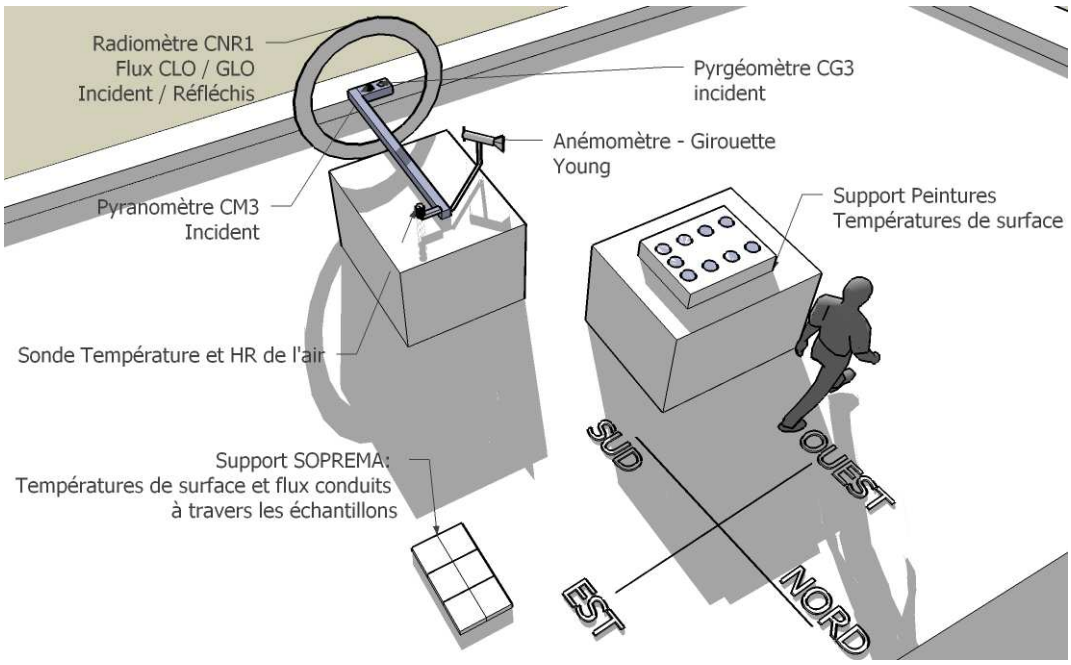


Figure 37: disposition du matériel expérimental du banc XP1

Les grandeurs radiatives incidentes de grandes et courtes longueurs d'ondes sont mesurées avec un radiomètre[3] regroupant un pyranomètre CM3 et un pyrgéomètre CG3. Les propriétés de l'air ambiant circulant au dessus des surfaces exposées nécessaires à calculer les échanges convectifs sont mesurées par un Anémomètre-girouette et une sonde Température / Humidité Relative. L'équation de bilan de surface s'écrit alors de la manière suivante:

$$\alpha_{sol} \cdot E_{sol} + \varepsilon_{GLO}\left(E_{GLO} - \sigma \cdot T_S^4\right) + h_C \cdot \left(T_{air} - T_S\right) = -\varphi_{Cond} \qquad \text{Équation 11}$$

L'émissivité GLO, ε_{GLO} est connue (mesure présentée précédemment), de plus des mesures effectuées suite à l'exposition des disques à l'extérieur n'ont pas révélé de modification. L'éclairement solaire, le rayonnement atmosphérique, la température de surface et la température de l'air sont mesurés. L'absorptivité CLO de la surface, α_{sol}, et le coefficient de convection h_c restent à déterminer, ce dernier pourrait se calculer grâce aux équations semi-empiriques utilisées pour les plaques planes. L'ensemble des données physiques mesurées pour les différentes composantes du bilan thermique doivent nous permettre de constater les

[3] CNR1 de Kipp & Zonen©

performances réelles de chaque échantillon sous le climat Rochelais et nous permettre d'ajuster précisément le bilan radiatif et convectif de surface au fil du temps. Les précisions sur les mesures effectuées, décrites ci-dessus, sont résumées dans le tableau 5.

Tableau 5: précision des mesures

Variable	**Type de capteur**	**Précision de la mesure**
Température de surface échantillons de cuivre, T_{sc} (°C)	Mesurex type K	±0.3°C calibré
Température de surface échantillons SOPREMA, T_{sr} (°C)	Mesurex type K	±0.3°C calibré
Température de l'air extérieur, T_a (°C)	Vaisala HMP50C	±0.5°C
Humidité relative de l'air, *HR* (%)	Vaisala HMP50C Précision entre 0 – 90% Précision entre 90 – 98%	 ±3% ±5%
Vitesse du vent, ω (m/s)	Anémomètre YOUNG 05103 Seuil de démarrage : 1.0 m/s	±0.3 m/s
Direction du vent, γ (°)	Girouette YOUNG 05103, Seuil de démarrage pour 10° de déplacement : 1.1 m/s	±3°
Flux solaire radiatif, E_{sol} (W/m²)	CNR1 KIPP & ZONEN, pyranomètre CM3	±3%
Flux GLO radiatif atmosphérique, φ_{ciel} (W/m²)	CNR1 KIPP & ZONEN, pyrgéomètre CG3	±3%

Notre centrale de mesure fonctionne en 8 entrées différentielles (DF), auxquelles se rajoutent deux multiplexeurs comportant chacun 16 voies de mesures différentielles pour augmenter le nombre de voies. La résolution des mesures pour la gamme de tension mesurée par nos capteurs est de 0,333µV en mode unipolaire pour une plage de mesures s'étendant entre +/-2,5mV soit 333µV pour +/-2500mV. Ces caractéristiques appliquées à notre dispositif permettent une résolution de 3,3 W/m² pour les mesures de flux radiatifs et de 0,01°C pour les températures.

2.4.2. Traitement des données : élimination des problèmes

Neuf échantillons ont été testés en continu sur le banc du 18 juin 2008 au 7 avril 2009, avant d'être rénovés pour certains et d'autres remplacés (en particulier avec l'ajout d'une peinture aluminium et d'un disque duo noir / aluminium). Les 2 capteurs CG3 du radiomètre CNR1

(pyrgéomètres) effectuent la mesure du rayonnement grande longueur d'onde (GLO) émis par la voûte céleste et l'environnement compris entre des longueurs d'onde de 4,5 à 42 µm (des problèmes de mesures et leur résolution sont détaillés en ANNEXE 1). Afin de s'affranchir de toutes erreurs protocolaires en plus des erreurs systématiques, nous allons baser la suite du travail sur la période allant du 7 avril au 27 octobre 2009, où l'ensemble de notre appareillage expérimental a fonctionné correctement. Dans un premier temps, comme notre équation de bilan énergétique de surface (Équation 11) ne prend pas en compte les termes d'évaporation ou de condensation, il est nécessaire d'éliminer l'ensemble des données où de tels épisodes sont susceptibles d'intervenir.

Élimination des jours de pluie

La mesure de pluviométrie présentant de nombreuses erreurs, nous avons classé en journées de pluie potentielle, l'ensemble des jours où l'ensoleillement incident mesurés et inférieurs à 80% de l'ensoleillement modélisé par un modèle de ciel clair. L'évaluation de la clarté du ciel se fait grâce à un modèle simplifié de l'ensoleillement global reçu en un site pour une latitude, une longitude et une épaisseur atmosphérique données. Nous calculons ensuite le ratio de l'énergie incidente journalière mesurée sur celle calculée. Arbitrairement nous avons fixé à 0,8 la valeur du ratio désignant une journée de ciel clair. Pour la détermination des ciels clairs, les valeurs des mesures expérimentales supérieures aux valeurs calculées sont remises (fort rayonnement diffus) à la valeur calculée, de cette manière la somme des pics d'éclairement dus au rayonnement solaire diffus ne reflète pas un excès de clarté du ciel.

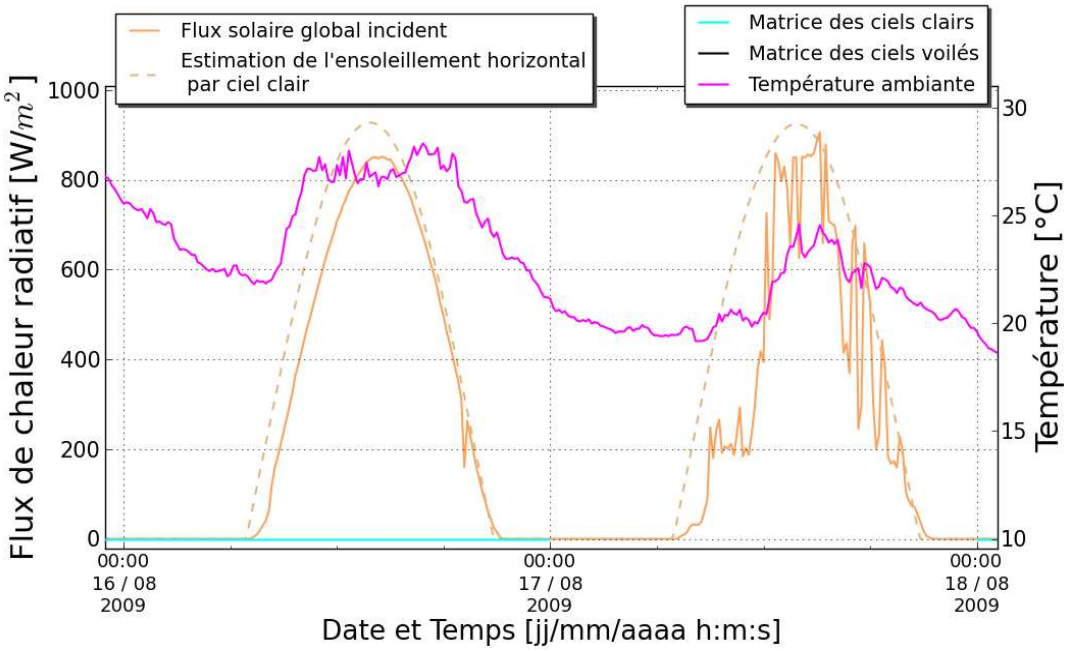


Figure 38 : Reconnaissance des ciels clairs par ratio de l'éclairement solaire mesuré sur le l'éclairement solaire calculé

On observe certaines imprécisions, ces anomalies peuvent être dues à la présence de nuage et à la présence de réflexions diffuses mais aussi aux périodes « lever et coucher du soleil » sensibles à l'imprécision du calcul et du matériel de mesure. Notre calcul de l'ensoleillement n'est pas parfait car la valeur de la masse atmosphérique traversée est seulement fonction de l'angle solaire alors que celle-ci est normalement aussi dépendante des conditions de pressions, humidité température et composition de l'atmosphère. Néanmoins la précision est suffisante pour la ségrégation des épisodes de ciels clairs. Après visualisation des résultats, il s'avère que certaines journées sont estampillées ciels clairs car les pics et les creux sur le flux solaire, dus aux passages nuageux et au terme d'ensoleillement diffus, se compensent. Il sera nécessaire par la suite de fixer une valeur d'écart type minimale pour éliminer les journées caractérisées par des passages nuageux fréquents dans un ciel clairs.

Élimination des cas de condensation

Pour les mêmes raisons, nous avons éliminé les mesures où un risque de condensation est calculé. En supposant que de tels épisodes interviennent lorsque la température des disques, T_s, devient inférieure à la température de rosée de l'air calculée, T_{dp} ambiant. Nous avons ensuite

fait l'hypothèse que le volume de condensat au cours du temps était proportionnel à T_s-T_{dp} (Figure 39).

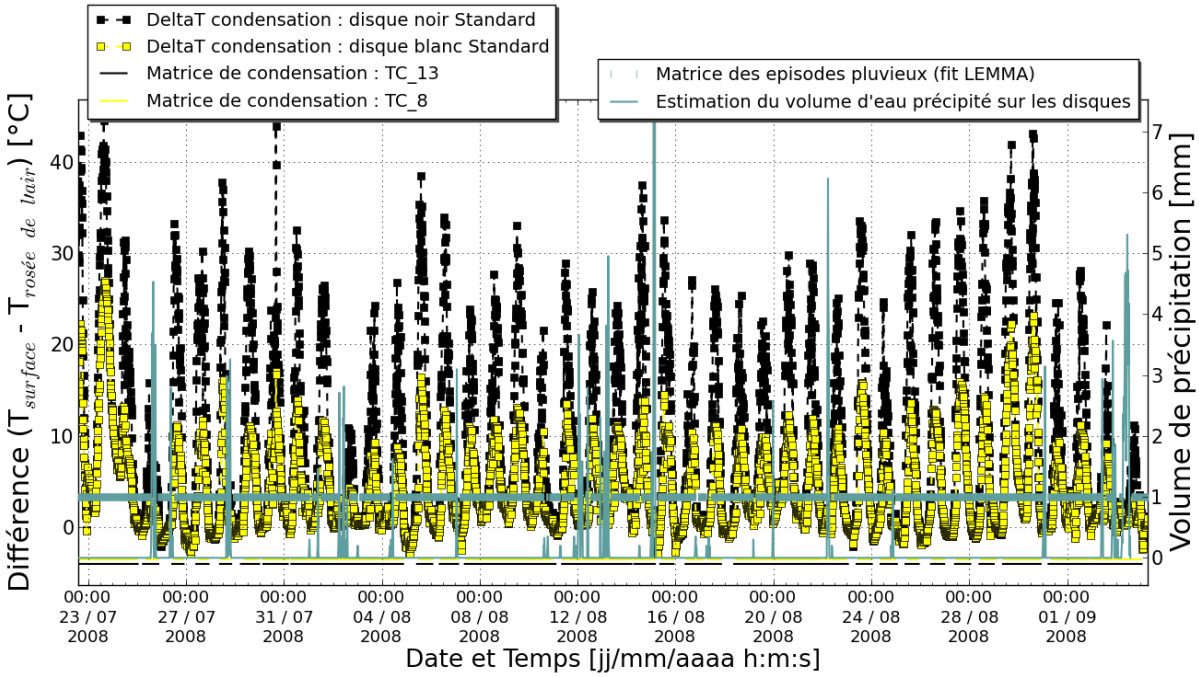


Figure 39 : Épisodes de condensation et de précipitations

Cette situation est décrite par l'algorithme suivant (Clear et al. 2001) :

a.) Tant qu'il n'y a pas de risque de condensation, on fixe la valeur d'un potentiel de condensat, S_0 à 0.

b.) Pour un pas de temps i où la différence de température évaluée T_s - T_{dp} < 0, on estime le condensat $S_i = S_{i-1} + f(T_s - T_{dp})$.

c.) On exclue des points de mesures l'ensemble des valeurs de S inférieur à 0. Ce nettoyage peut être visualisé sur les droites discontinues tracées en bas de la figure 39, où les passages à vide sont les périodes éliminées en jaune pour la peinture blanche et en noir pour la peinture noire.

Élimination des vitesses de vents anormales

Notre anémomètre girouette présente les inconvénients classiques du système potentiométrique. Dans le cas d'absence de vent la girouette est immobile, mais dans une position quel-

conque, et le système d'acquisition identifiera cette direction comme une direction de vent. Et on ne peut discriminer parfaitement ce cas en utilisant l'information vitesse du vent, car l'anémomètre présente un seuil en dessous duquel il ne mesure plus correctement non plus la vitesse du vent. Ce seuil vaut 1m/s pour notre matériel, mais il est aussi spécifié que la précision du changement de direction, pour un changement supérieur à 10°, n'est valable que pour des vitesses supérieures à 1,5m/s. Normalement, les séries de données de vitesse du vent sur des temps courts montrent une bonne corrélation entre elles. Pour mettre en pratique cette hypothèse, nous avons tracé les mesures de vitesse du vent enregistrées au pas de temps i en fonction de celles mesurées au pas de temps précédent et dans cette série, et arbitrairement nous avons décidé d'éliminer les mesures prenant la valeur 0 à l'intérieur d'une série ayant des valeurs supérieures à 3 m/s.

2.4.3. Évaluation des performances thermiques des peintures

L'étude de l'évolution en parallèle de 10 températures de surface de nos échantillons de peintures est plus discriminante lors des journées ensoleillées. On peut distinguer un écart de température entre les 9 plaques variant entre 0 et 5°C pour le groupe peinture noire, peintures traditionnelles et cool. La peinture aluminium demeure plus fraîche mais largement supérieure à la température de l'air. La différence de température maximale entre le noir et l'aluminium est d'environ 7°C au midi solaire. La figure 40 montre une journée où le flux solaire incident est bien régulier, on peut donc supposer que les fluctuations des températures sont dues au rafraîchissement par convection qui est fonction de la vitesse du vent.

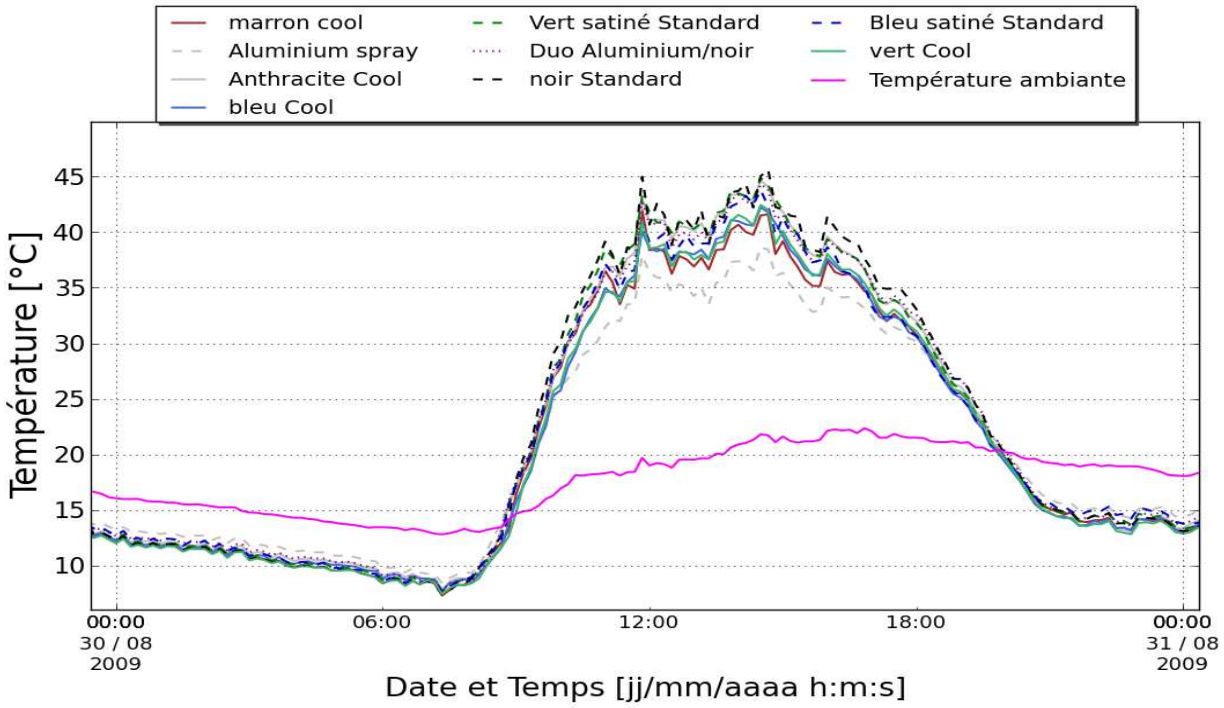


Figure 40 : Évolution de la température des 10 échantillons de peinture pour la journée du 30 août 2009

On peut néanmoins déjà faire une première approximation de la performance de nos peintures. Pour une journée ensoleillée, les peintures cool et leurs homologues standards affichent une différence de température variant de 0,5 à 3°C. L'évolution des températures de surface apparait assez aléatoire et les valeurs des coefficients optiques étant assez proches, pour apprécier les performances des peintures cool par rapport à leurs homologues standards, on trace leur densité de probabilité d'occurrence de température en fréquences normalisées.

Le graphique ci-dessous représente cette densité de probabilité pour les températures diurnes des 9 peintures initiales rafraîchies sur 6 mois. L'élimination des périodes de condensation ou d'évaporation expliquée précédemment a été appliquée aux données affichées ci-dessous. Ici pour 17381 points de mesures, 4961 ont été conservés pour la période diurne. Dans la légende on peut lire l'espérance mathématique (μ), représentant la valeur moyenne prise par la distribution normalisée et l'écart type (σ) de chaque distribution de température.

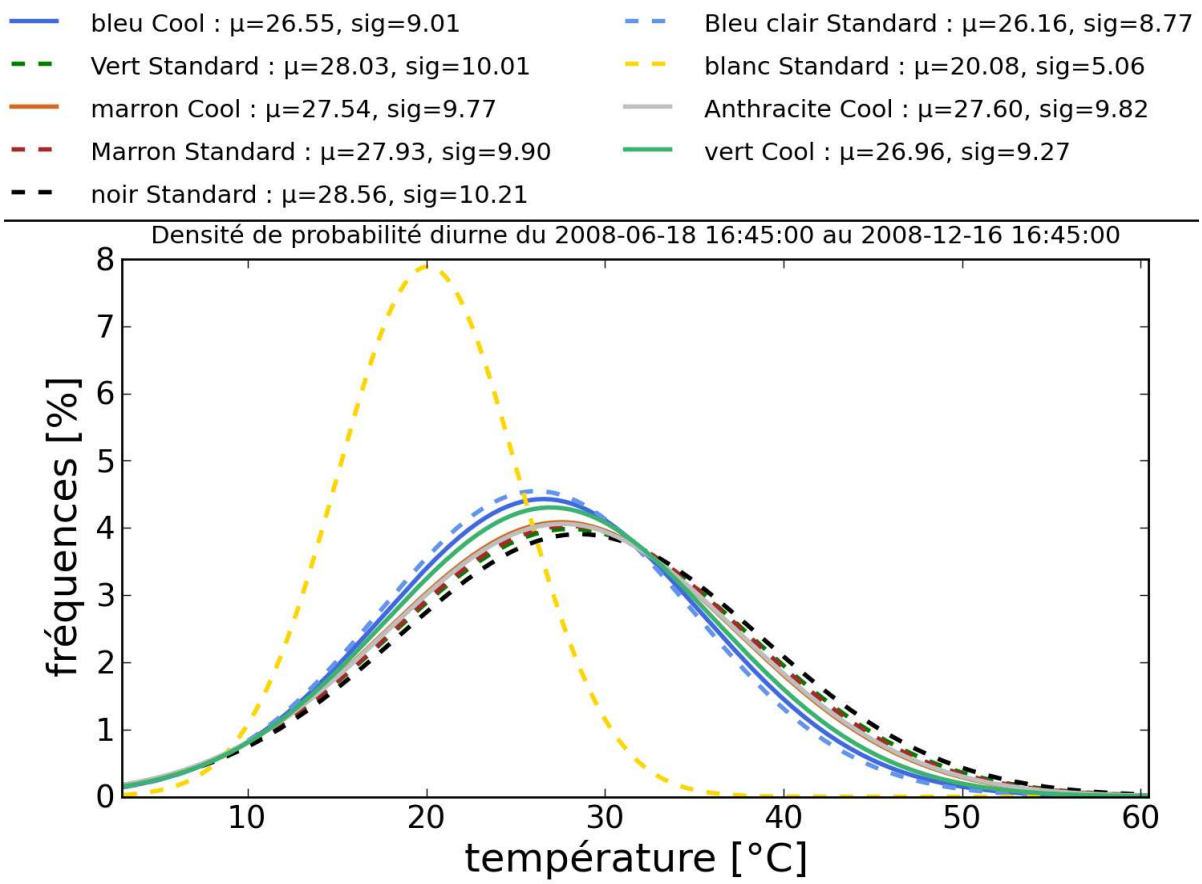


Figure 41 : Densité de probabilité de températures diurnes pour dix échantillons en fréquences normalisées pour 6 mois en 2008

La température de l'échantillon blanc est fortement démarquée des autres distributions, rappelons que sa réflectivité solaire mesurée en laboratoire était de 0,86, avec une température moyenne de 20,1°C et une très faible dispersion (σ = 5,0°C), il représente l'échantillon le plus frais. Les autres échantillons sont assez regroupés, leurs températures moyennes varient entre 26,2 et 28.6°C et leurs écarts types de 8,8 à 10,2°C. La comparaison des performances des paires cool / standards est mieux illustrée par la figure 42. Elle représente une période de mesure différente où le bleu cool et le bleu standard avait même teinte. La courbe de fréquence cumulée est représentée à partir de 7464 mesures diurnes, le couple marron cool/standard n'étaient pas en exposition sur cette période.

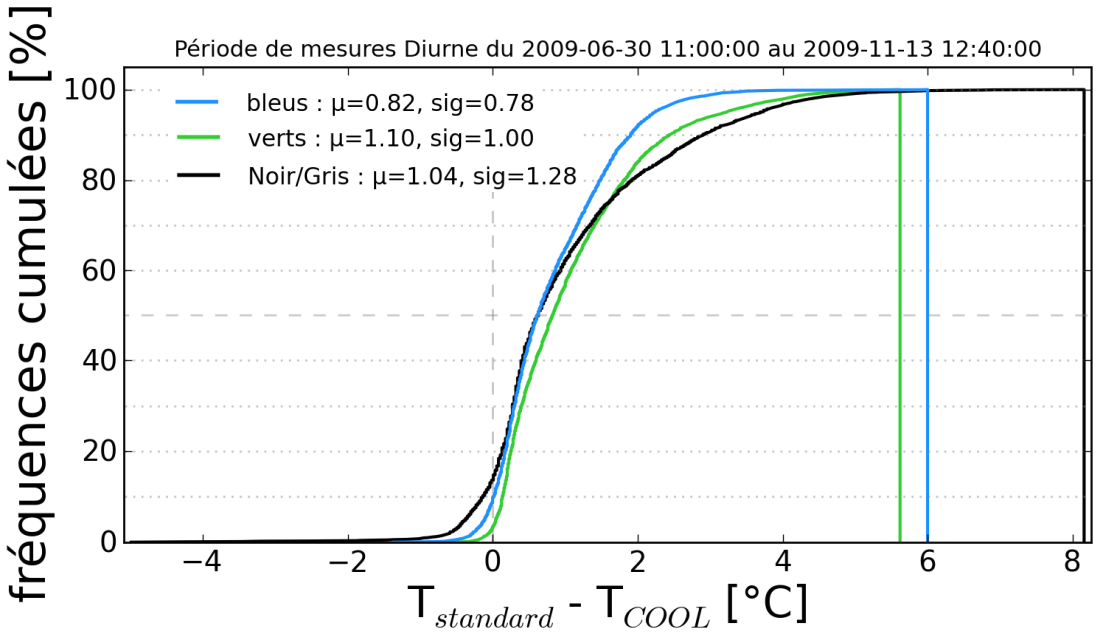


Figure 42 : Probabilité d'occurrence d'une différence de température entre les paires d'échantillons standards et cool

On constate pour les trois couples qu'en moyenne (μ), la température de surface des peintures cool est plus fraîche que celle des échantillons standards d'environ 1°C sur la période diurne (~7600 données). On s'aperçoit aussi que sur cette période, pendant 4, 10 et 15% du temps respectivement pour le vert, le bleu et le noir/gris, l'échantillon standard est plus frais que l'échantillon cool de moins d'1°C. L'échantillon bleu cool est plus frais pendant 80% du temps de 0 à 2°C et entre 2 et 6°C pour les 10% du temps restant. Si sa réflectivité solaire initiale est plus élevée de 12,3%, on peut éventuellement expliquer la période plus chaude par son émissivité GLO plus faible de 3,5% que celle du produit standard. Pour le vert cool, la tendance est similaire avec plus de 20% du temps où la surface est entre 2 et 5,7°C plus fraîche que le vert standard. Et enfin le duo anthracite cool / noir standard montre la différence extrême la plus élevée avec 20% du temps où le produit cool est plus frais de 2 à 8,1°C. Sur une autre période, nous avons remarqué que le marron cool est statistiquement plus frais que son homologue d'environ 1,2 °C en moyenne. Dans ces conditions, les peintures cool tiennent leurs promesses même si les différences observées dans ces conditions particulières (par rapport à une surface extérieure de bâtiment) ne sont pas élevées.

Les résultats provenant du graphe de densité de probabilités normalisées des températures nocturnes est difficile à déchiffrer car la différence de température entre les disques est mi-

nime et les courbes se superposent. Pour la période d'exposition du 1er juillet au 13 novembre 2009, deux échantillons de type aluminium ont été ajoutés (un disque peint complètement et un peint en parts noir/alu), ce qui laisse entrevoir des différences nocturnes plus marquées que lors des précédents essais où toutes les émissivités étaient globalement identiques. Pour bien illustrer les différences nocturnes, nous avons comparé la différence de température nocturne avec le disque le plus chaud, c'est-à-dire celui peint en aluminium, qui a l'émissivité GLO mesurée la plus élevée. La figure 43 illustre la densité de probabilité des différences de températures nocturnes des échantillons avec le disque aluminium (ε_{GLO} = 0,36) en fréquences cumulées brutes pour 107 jours sur notre banc d'essai.

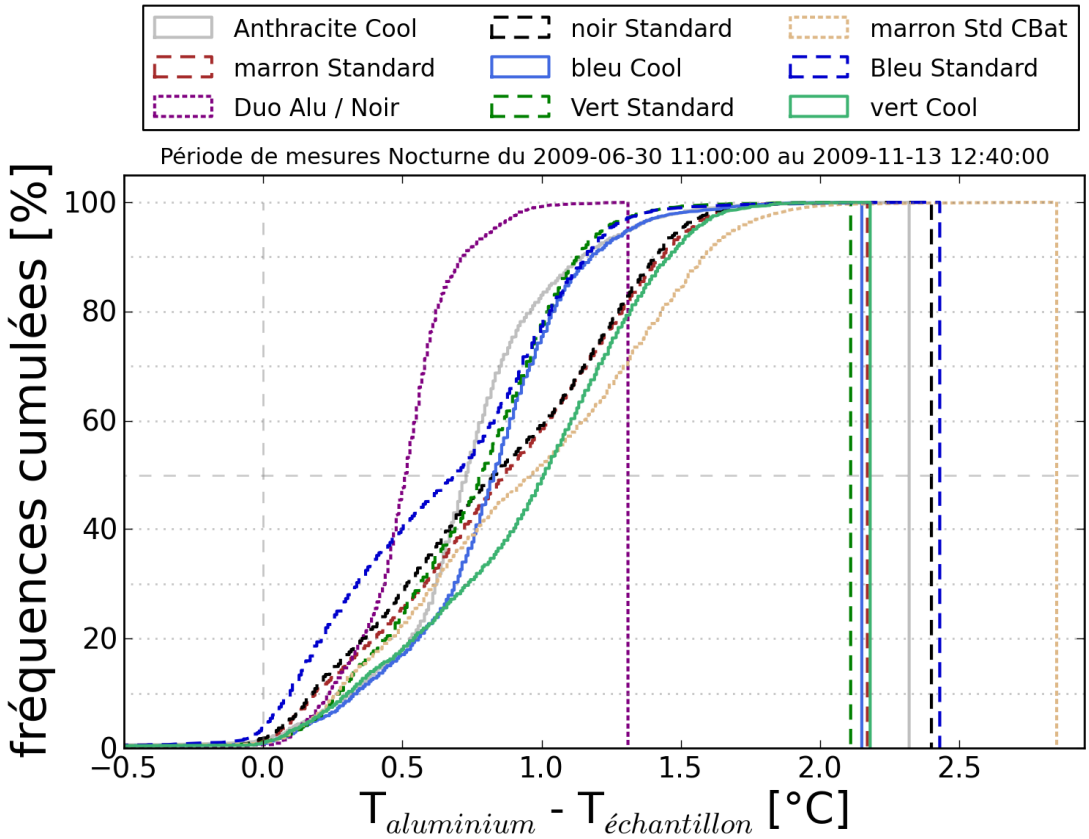


Figure 43 : densité de probabilité d'occurrence d'une différence de température nocturne pour 9 échantillons par rapport à un échantillon référence du 1er juillet au 13 novembre 2009 en fréquences cumulées

La droite verticale ponctuant chaque série indique la valeur maximale de cette différence de température entre la surface aluminium et l'échantillon. Elle peut être trompeuse car l'occurrence nocturne de ces maximums peut s'avérer très faible. Ici, on peut néanmoins dé-

duire de droite à gauche l'ordre de la surface la plus fraîche et donc la plus émissive, à la surface la plus chaude durant la nuit. On remarque que les produits cools et standards sont relativement regroupés avec une différence de température moyenne s'étendant de 0,77 à 1,16°C entre le marron standard Climabat qui a la plus forte émissivité GLO des produits mats et le bleu cool. L'écart type de ces occurrences est très faible et varie de 0,25 à 0,45°C. La courbe un peu démarquée des autres en violet, représente la différence de température du disque aluminium avec un disque peint en duo d'égales surface aluminium et noires. La différence de température moyenne est de 0,5°C avec un écart type de 0,15°C. La différence de température entre les peintures métalliques est souvent inférieure à la précision des thermocouples calibrés, il faut rester mesuré quant à la signification de ces mesures.

En accord avec la littérature, deux mois après leur restauration, les émissivités GLO des peintures étudiées ont été encore mesurées et ont peu évolué. Les photographies ci-dessous montrent l'évolution de certains échantillons ou simplement leur état final.

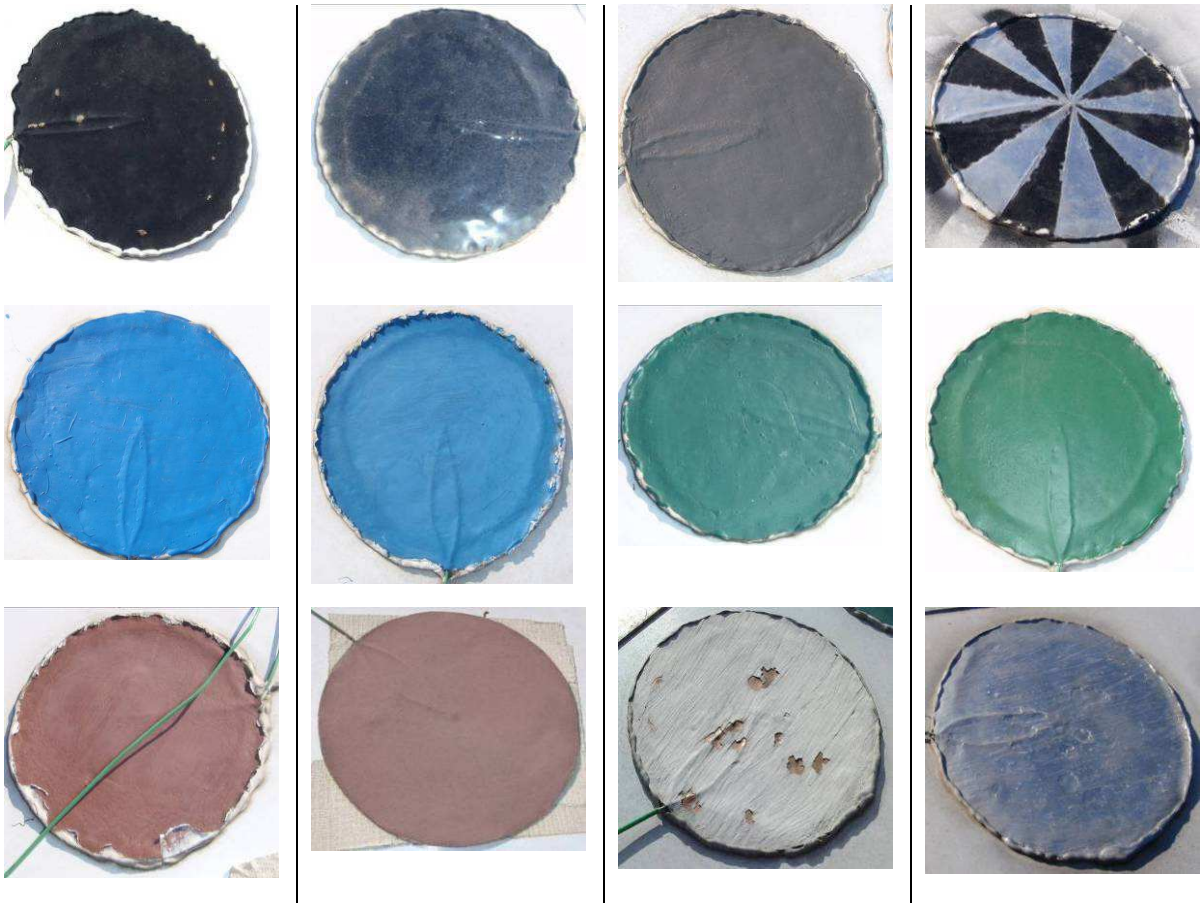


Figure 44 : Aspects des produits cools et standards

De gauche à droite et haut en bas, on a le noir a l'état initial, le noir standard après 3 mois d'exposition , l'anthracite cool après 3 mois, le duo aluminium/noir, le bleu cool, le bleu standard, le vert cool, le vert standard, l'aluminium, le marron cool, et le marron standard après 3 mois, le blanc après 6 mois d'exposition. On remarque que le noir (premier en haut à gauche) et le blanc exposé lors de la première campagne se sont beaucoup détériorés, leur surface s'est écaillée. On distingue l'encrassement accumulé sous forme de tâches blanchâtres sur le second noir et l'aluminium. Malgré son mauvais état, l'échantillon blanc est resté le plus frais tout au long de sa période de mesure. Pour connaitre les performances énergétiques de ces peintures sur le long terme il faut caractériser l'évolution de leurs coefficients radiatifs par le bilan énergétique à leurs surfaces, méthode que nous développons dans les paragraphes suivants.

2.5. Estimation des coefficients du bilan énergétique de surface

Sur notre banc expérimental, les inconnues de notre bilan énergétiques sont les coefficients de convection et les propriétés radiatives des échantillons de peintures après exposition aux intempéries. Nous allons donc présenter la méthode qui nous permet d'obtenir ces coefficients en considérant que leur évolution sur les 6 mois étudiés est suffisamment faible pour ne retenir qu'une seule valeur. Pour cet exercice nous utilisons les données enregistrées les plus abouties en termes de justesse et de bon fonctionnement des appareils de mesures (5 mois d'exposition). Du 1er juillet au 6 octobre 2009, les valeurs brutes étaient au nombre de 13958 par échantillon de surface, soit 97 jours et un pas de temps de 10 minutes. Après élimination des données soumises à la condensation (772 mesures pour l'échantillon aluminium, 1432 pour le noir), 84 valeurs supprimées pour précipitations. Une fois ces valeurs supprimées nous réduisons les périodes étudiées à celles des ciels clairs qui représentent 43 jours sur les 97. Cette réduction est liée à la connaissance partielle des hauteurs pluviométriques ainsi qu'au manque de connaissances lié aux effets de réflectivité directionnelle lors des journées nuageuses. Le coefficient de convection fait parti des variables inconnues du bilan thermique, nos recherches sur le phénomène de convection à travers cette expérience ont pour seul objectif d'être suffisamment précis pour être utilisés pour l'estimation des coefficients optiques.

2.5.1. Observations et analyse du terme convectif

L'équation de bilan énergétique surfacique (Équation 11) peut être utilisée pour retrouver le coefficient convectif de chaque disque du banc d'essai.

$$h_c = \frac{\alpha \cdot E_{sol} + \varepsilon \cdot \left(E_{atm} - \sigma (T_S)^4\right) + \varphi_{Cond}}{\left(T_S - T_{air}\right)}$$ Équation 12

Les termes partiellement connus de notre équation sont les coefficients radiatifs, nous les connaissons pour des peintures non exposées, sur un substrat similaire et pour un éclairement normalisé et isotrope. Le flux de conduction a d'abord été considéré comme nul. De cette manière on peut obtenir, de manière expérimentale, le coefficient d'échange surfacique que l'on cherche. Il est composé de 2 termes distincts, un lié à la convection naturelle, h_n, et l'autre représentant le poids de la convection forcée, h_f.

$$h_c = h_{conv,naturelle} + h_{conv,\,forcée} = f\left(h_n, h_f\right)$$ Équation 13

D'après la taille de nos échantillons et les moyennes de vitesse du vent enregistrées au banc de mesures (2,2m/s), le terme lié à la convection naturelle devrait être négligeables devant la convection forcée. La figure 45 montre l'évolution de données nettoyées du flux de chaleur par convection *(h_c* x *ΔT)* en fonction de *ΔT* pour 2 disques différents durant 3 mois. Les caractéristiques radiatives utilisées pour résoudre l'équation 12 sont celles déterminées par émissiométrie et spectrophotométrie. Comme on peut s'y attendre, le graphique indique que le flux convectif augmente avec la différence de température pour des ΔT supérieur à 0.

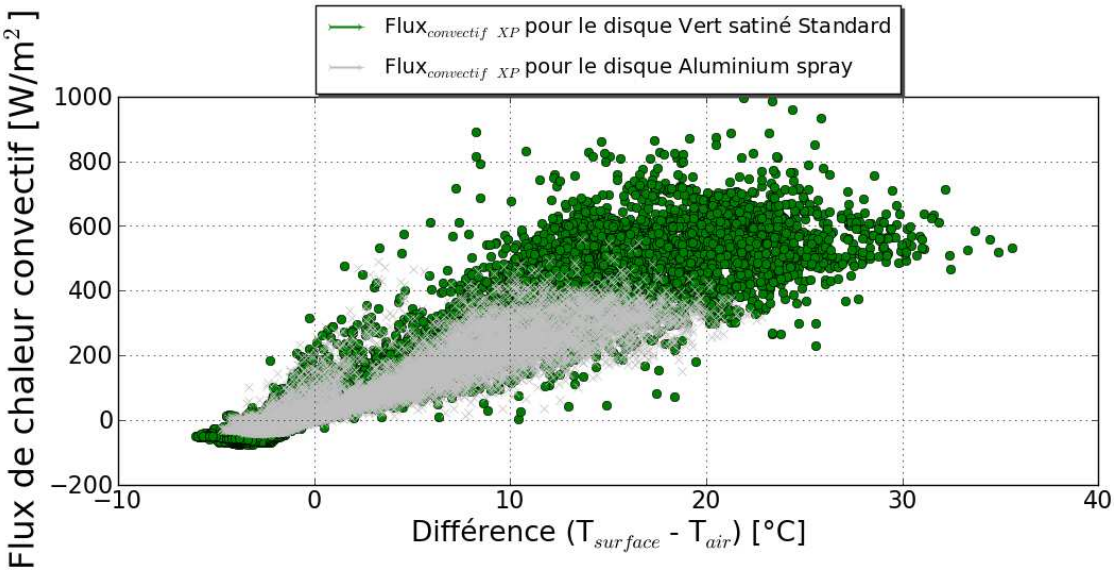


Figure 45 : Flux de chaleur convectif déduit d'après les données brutes pour 2 peintures pour la période de juillet à octobre 2009.

Dans cette figure, on peut s'apercevoir qu'un certain nombre de points présentent un *(h_c* x *ΔT)* de signe opposé au gradient de température, *ΔT*. Dans un premier temps, il est fort possible que cette erreur provienne de l'incertitude sur les propriétés radiatives de notre modèle.

D'autres conditions expérimentales fixées peuvent expliquer cette observation antiphysique :

- L'hypothèse qui néglige le flux de chaleur échangé par conduction entre le disque de cuivre et le support isolant devant les autres flux perdus par le disque
- L'utilisation d'une température d'air de référence mesurée sous abris à quelques mètres du support différente des conditions au dessus du disque
- L'incertitude relative dans le calcul du h_c qui augmente pour les *ΔT* proches de 0.

Le terme de conduction qui était supposé nul au départ a été calculé et corrigé par un modèle de facteurs de réponses surface à surface (modèle numérique explicité au chapitre 4). En supposant que la face supérieure du support isolant était à la température des disques de cuivre et que la face inférieure non exposée aux rayonnements venant du ciel était à température de l'air. La figure 46 montre l'ensemble des flux énergétique s'équilibrant à la surface du disque noir.

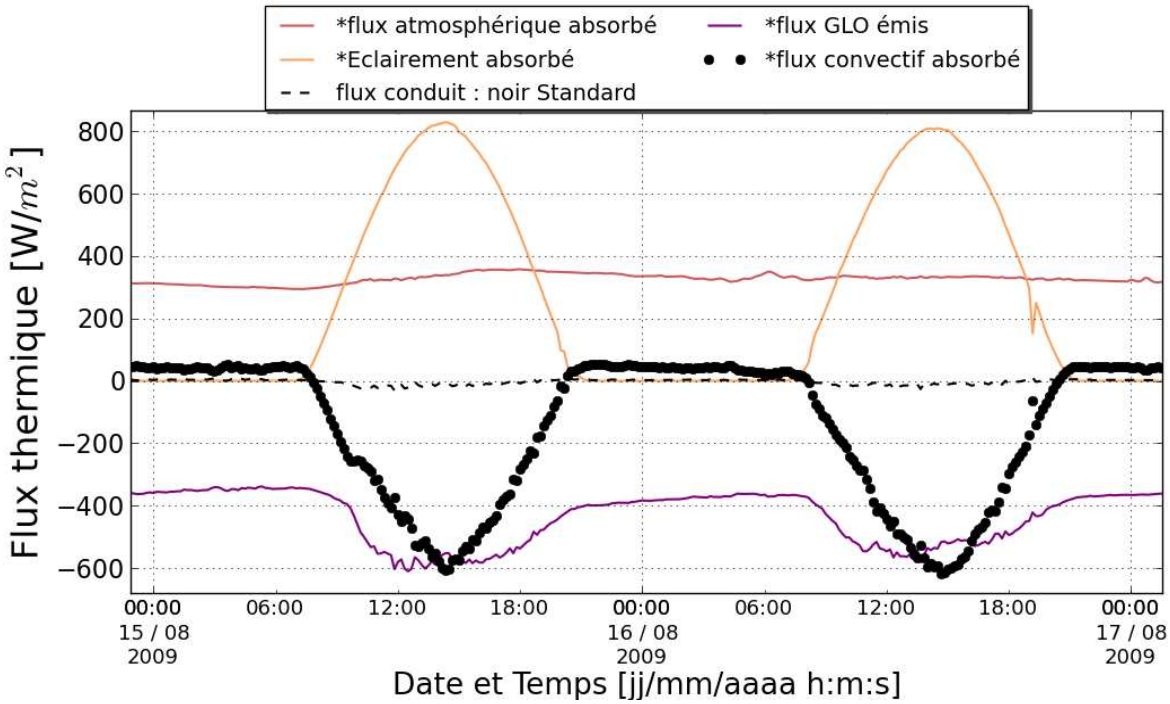


Figure 46 : Densité de flux aux surfaces du disque noir

Le flux conduit atteint des maximas à 18 W/m² lors des pointes d'ensoleillement pour l'échantillon le plus absorbant mais reste faible face à la densité de flux convectée par l'air et aux termes de rayonnement GLO et CLO. Nous supposons que le coefficient d'échange surfacique par convection est le même sur l'ensemble du support, ce qui peut se justifier au vu de la Figure 47 qui montre l'évolution dans le temps du coefficient d'échange surfacique de l'ensemble des disques, avec ses incertitudes de mesures hautes et basses associées en pois jaunes et oranges. Ces coefficients h_c calculés par fermeture du bilan énergétique à la surface des disques fluctuent à l'intérieur de nos incertitudes expérimentales. L'incertitude absolue de chaque coefficient h_c, soit la variance u_c^2, a été calculée à l'aide de la formule suivante valable pour les grandeurs d'entrées indépendantes les unes des autres :

$$u_C^2 = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$ Équation 14

Où $\partial f / \partial f x_i$ est la dérivé de notre fonction (Équation 12) par l'un de ses termes variables, et $u(x_i)$ est l'incertitude associé à cette variable. Celle-ci est indiquée dans le tableau 5 pour les

températures et les flux radiatifs, elle a été fixée à ±0.03 pour l'émissivité GLO mesurée et les réflectivités CLO, et ±10% du flux calculé pour la conduction.

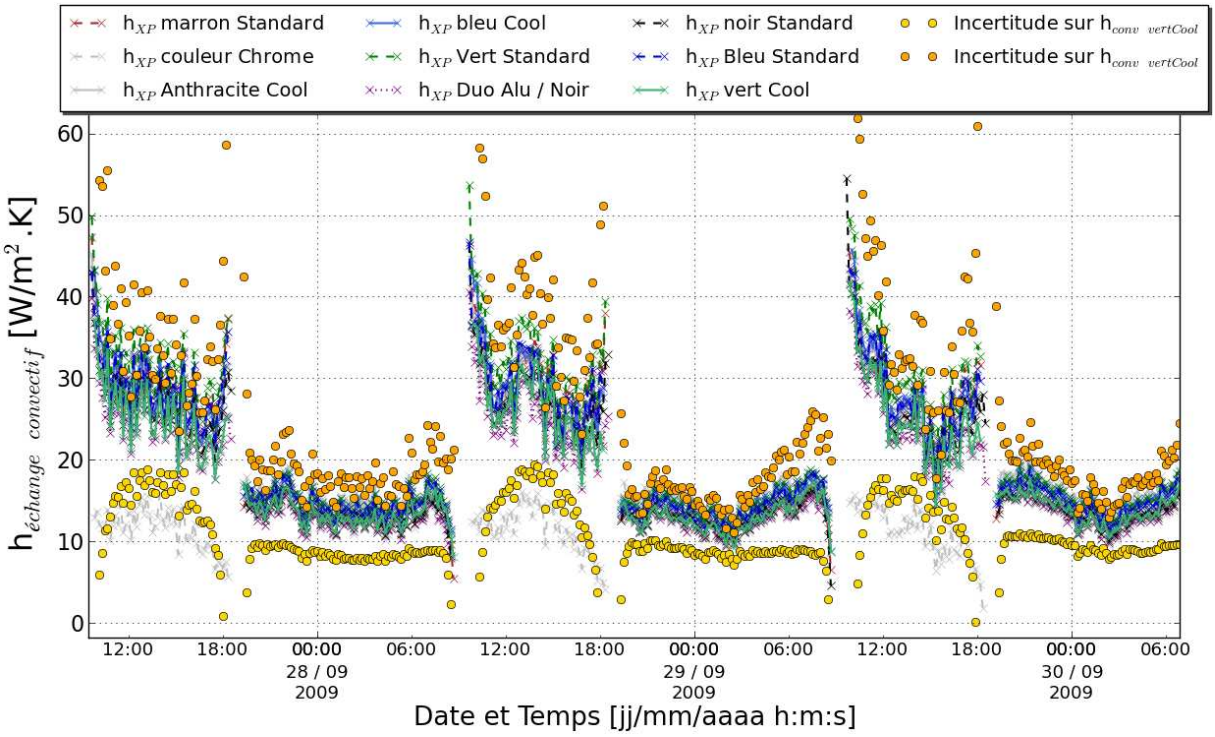


Figure 47 : Incertitudes sur le coefficient d'échange convectif déterminé par bouclage du bilan énergétique à la surface des échantillons

On constate que les valeurs h_c calculée entrent toutes dans la gamme d'incertitude. Le coefficient de convection pour l'échantillon de peinture aérosol aluminium fait par contre exception, son émissivité GLO à été mesurée (0,37) et son albédo a été estimé (0,75). Durant la journée, celui-ci est très proche de 0. Une hypothèse qui pourrait expliquer ce phénomène serait que l'émissivité GLO déterminée pour cette surface, est mesurée pour une seule température (pas de régulation de température sur l'émissiométre utilisé) et pourrait être en fait sélective en fonction de la longueur d'onde. Les coefficients de convection déterminés expérimentalement sont valables dans une incertitude de +/- 3 à 10 W/m².K pour les plus faibles valeurs, durant la nuit où l'incertitude sur l'éclairement solaire est nulle et de +/- 12 à 26 W/m².K durant la journée. L'incertitude expérimentale en fonction du ΔT est présentée dans la figure 48.

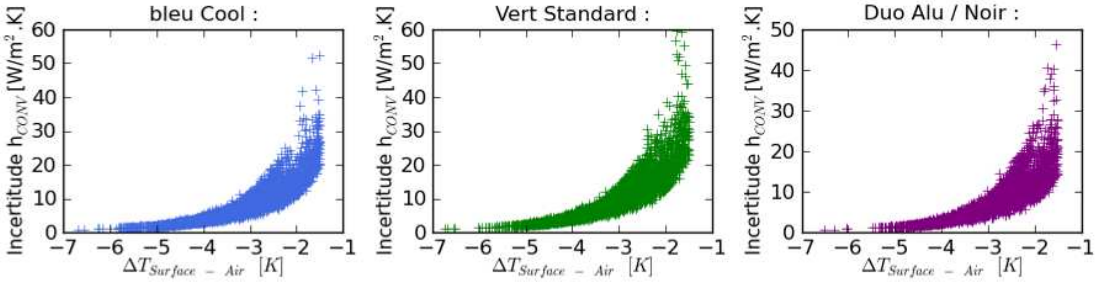


Figure 48 : Incertitude absolue calculée pour le coefficient de convection en fonction du *ΔT* pour 3 disques

L'erreur devient très grande lorsque l'écart de température entre la surface et l'air s'approche de zéro, c'est-à-dire lorsque le flux convectif est très faible. Cette tendance est confirmée par le graphique ci-dessous, nous avons éliminé les points physiquement aberrants ainsi que les points où la valeur absolue de *ΔT* était inférieure à 1°C.

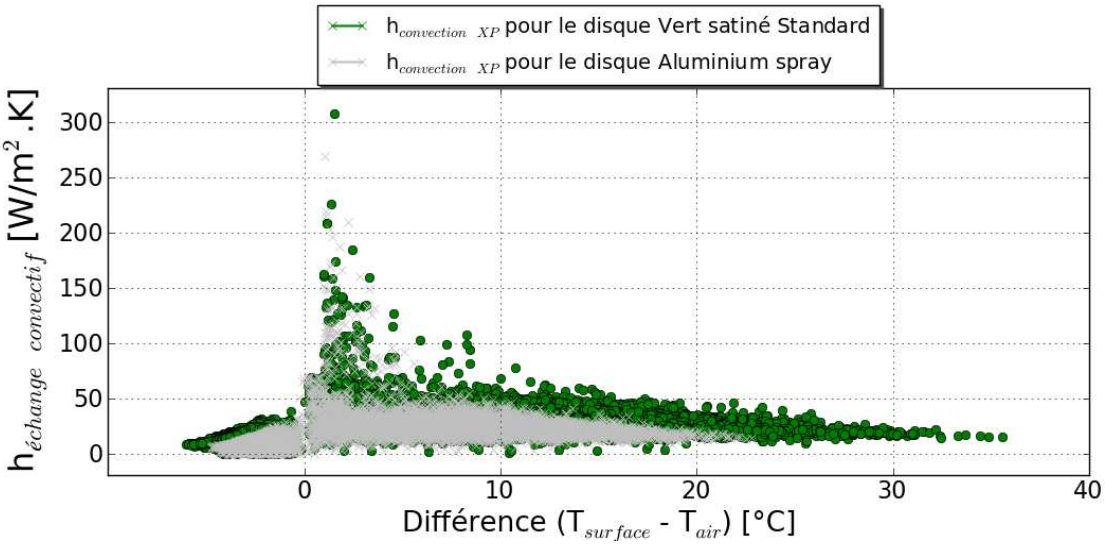


Figure 49 : coefficient d'échange convectif expérimental fonction de la différence de température

On s'aperçoit que *ΔT* n'a que peu d'influence sur les coefficients de convection calculés et que la perte de précision augmente en s'approchant de 0. Cette faible influence valide l'hypothèse que la part de convection naturelle dans l'échange convectif entre la plaque et l'air ambiant est certainement très faible de part les dimensions des disques et l'ensemble des turbulences aérodynamiques présentes en toiture. Pour chaque disque, les données relatives

aux bilans de surface ont été triées selon des catégories de vitesse de vent (tous les 0,5 m/s) et la régression linéaire des flux convectif expérimentaux pour chaque disque en fonction de la différence de température entre leur surface et l'air ambiant ont été déterminées (Figure 50). Et finalement, un coefficient de convection h_c pour l'ensemble du support a été déterminé en moyennant les valeurs des coefficients des régressions linéaires indépendantes pour chaque catégorie de vent.

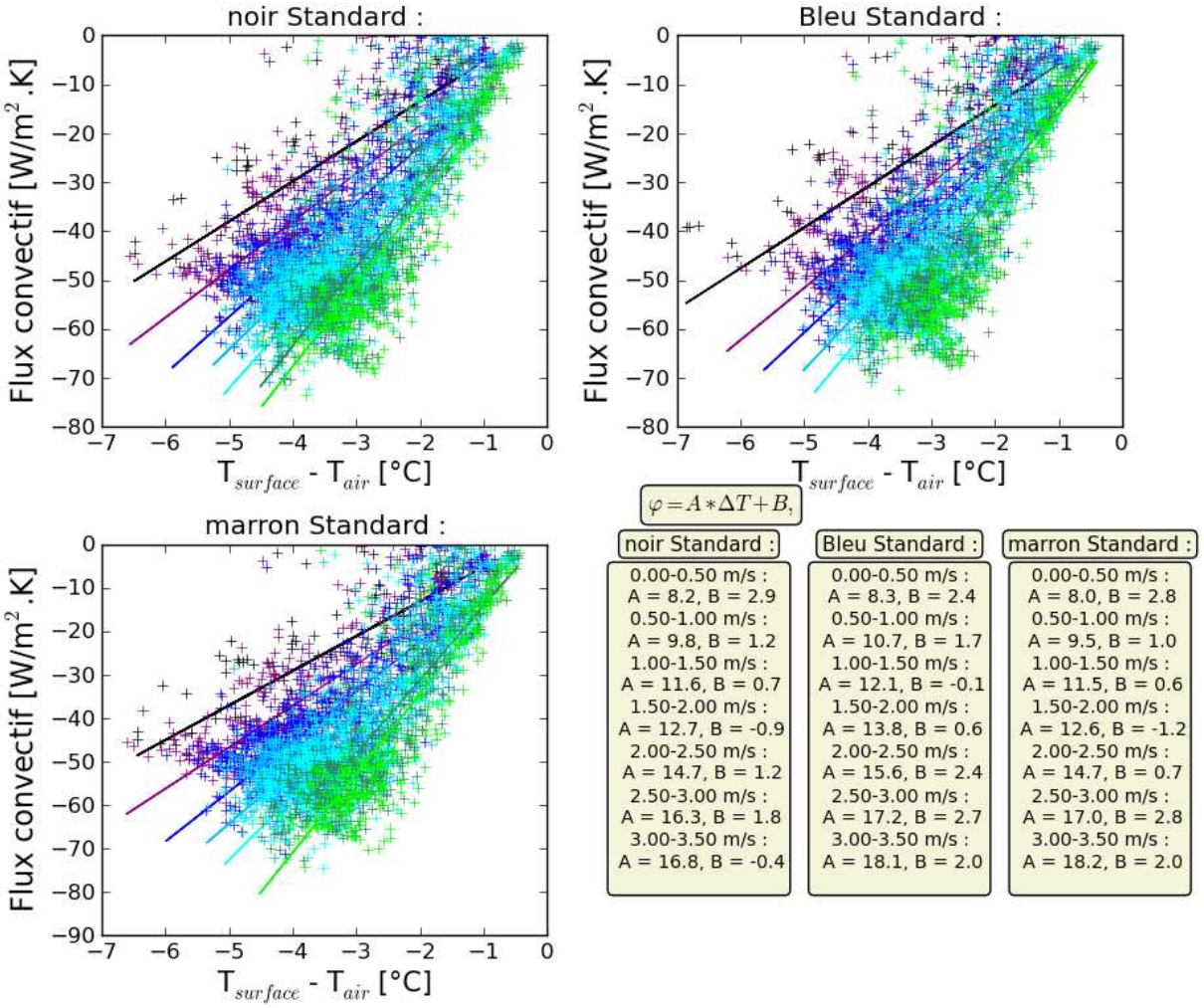


Figure 50 : Multiples régressions linéaires pour le flux convectif en fonction de ΔT pour 7 catégories de vent (0 à 3.5 m/s tous les 0.5 m/s) et 3 disques

Les pentes des régressions linéaires correspondent au h_c nocturne (A dans la légende de la Figure 50), et sont moins soumises à l'incertitude que les h_c diurnes, le coefficient constant de

la régression linéaire (B) indique que l'erreur liée à la fermeture de l'équation de bilan est faible, les régressions passent pratiquement par 0.

La Figure 51 montre que la dépendance du coefficient d'échange convectif à la vitesse du vent a une tendance logarithmique, mais que l'on peut la considérer comme pratiquement linéaire.

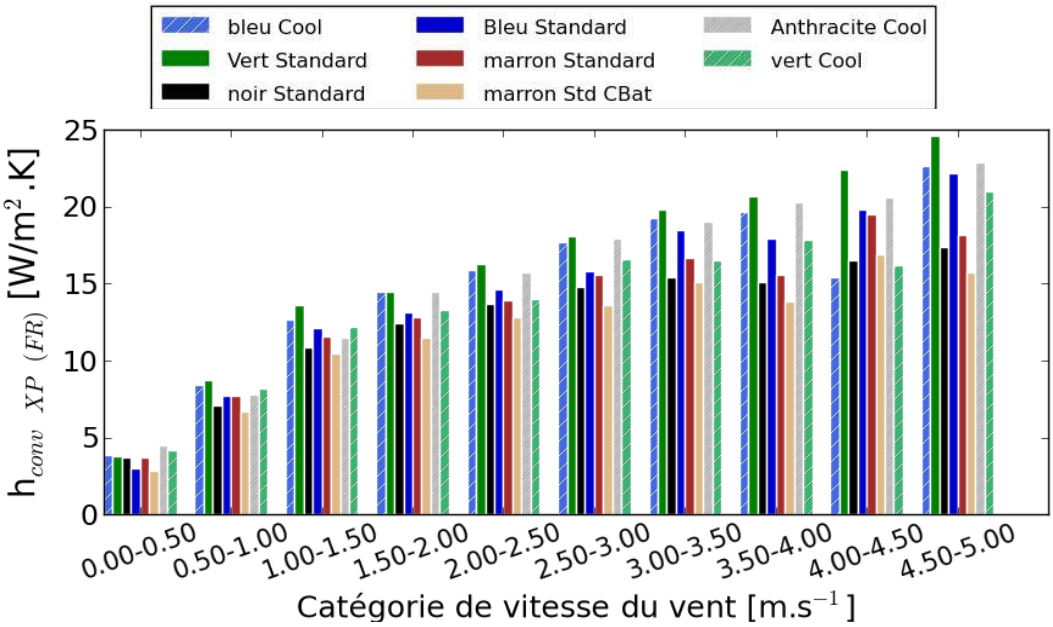


Figure 51 : Valeurs de h_c obtenues par régressions linéaires pour chaque disque et par catégories de vitesses de vent

La moyenne des coefficients obtenus par régression peut ensuite être ajustée en fonction de la vitesse du vent. Deux solutions s'offrent à nous, un profil logarithmique du type des équations semi-empiriques évoquant le coefficient convectif en fonction du Reynolds (Figure 52) :

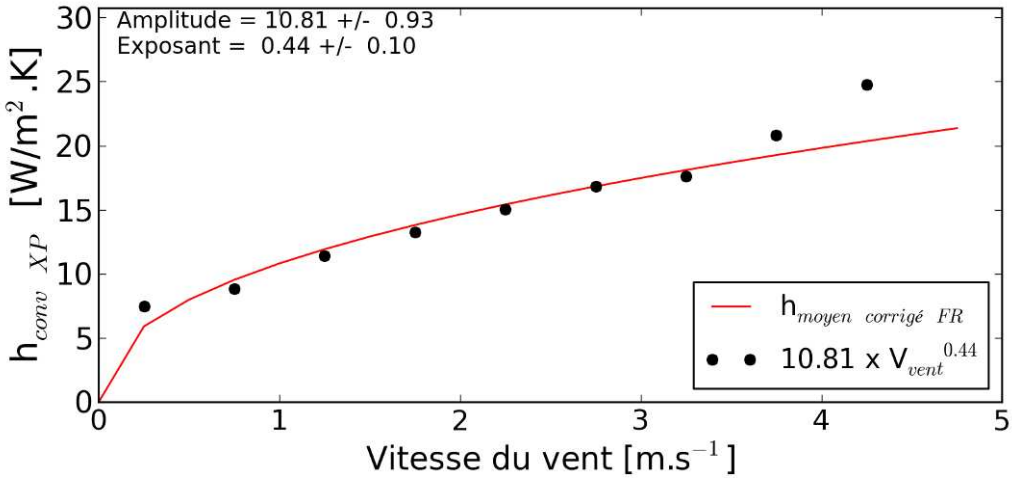


Figure 52 : profil logarithmique de h_c en fonction de la vitesse du vent obtenu expérimentalement

Dans des conditions d'écoulement turbulent comme sur une toiture terrasse, on s'attend à voir un palier de stabilisation passé une certaine vitesse de vent. Dans notre cas, le palier ne semble pas atteint, néanmoins l'incertitude sur le h_c augmente avec la vitesse du vent et le nombre de points de mesure diminue, par conséquent les valeurs calculées pour des vents supérieurs à 4,5 m/s peuvent être fortement entachées d'erreur. Si on n'observe pas de palier, le coefficient d'échange convectif en fonction de la vitesse du vent peut être représenté par une simple régression linéaire (Figure 53).

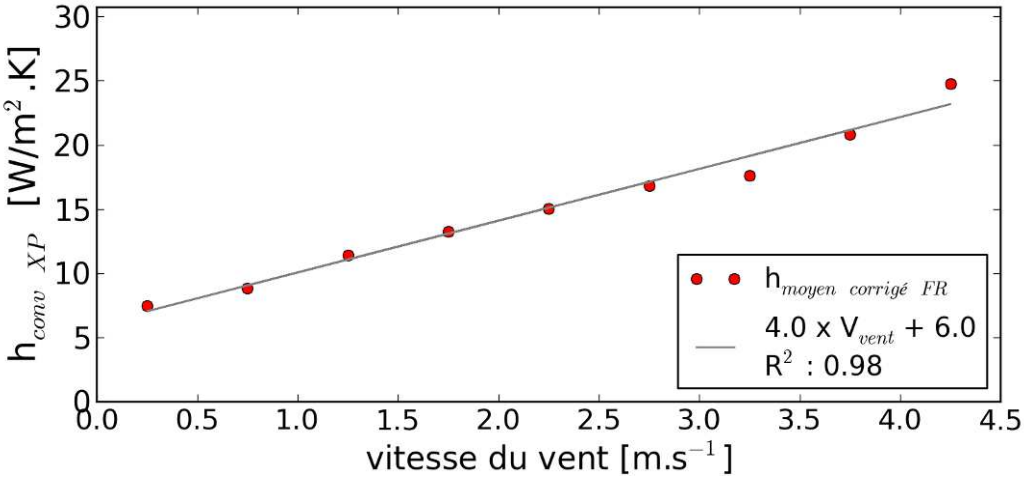


Figure 53 : Régression linéaire de h_c en fonction de la vitesse du vent obtenue expérimentalement

Finalement on supposera dans la suite que ces coefficients de convection surfacique sont identiques pour l'ensemble du support et des 10 disques et la valeur des émissivités GLO étant connue, nous allons déterminer suite à l'exposition au climat extérieur réel la valeur des absorptivités solaires de nos disques avec un coefficient de convection global déterminé simultanément.

2.5.2. Détermination expérimentale des absorptivités solaires en connaissant le coefficient de convection *h* global.

On se propose ici de retrouver à partir des mesures l'absorptivité CLO. Pour cet exercice, les données du bilan thermique de chaque échantillon de peinture, avec sa valeur mesurée de l'émissivité GLO fixée ainsi qu'un profil de coefficient de convection dépendant de la vitesse du vent appliqué à l'identique sur l'ensemble des disques vont être ajustées par minimisation de l'équation de bilan thermique. L'équation utilisée pour cet ajustement est la suivante :

$$\alpha.E_{sol} = \varepsilon \cdot \left(\sigma(273+T_S)^4 - E_{atm}\right) - h_c \cdot (T_{air} - T_S) \qquad \text{Équation 15}$$

Pour ce faire on se limite à des mesures diurnes. La minimisation consiste à calculer le coefficient pour que la somme de la différence des deux membres de l'équation 15 au carré soit réduite au minimum pour chaque point de mesure. La fonction d'erreur utilisée est la suivante :

$$erreur = \sum_i \left(\sum_j \left(\alpha_i.E_{sol}(j) - Y_{fit}(j)\right)^2 \right) \qquad \text{Équation 16}$$

Avec *i* le nombre de coefficient d'absorptivité à ajuster et *j* le nombre de données expérimentales utilisées. Les mesures expérimentales à ajuster sont triées pour des périodes sèches et pour des valeurs absolues de la différence de température entre la surface et l'air extérieur mesurées supérieures à 1°C (afin de réduire l'incertitude sur notre calcul). La figure 54 présente le résultat obtenu sur un ajustement des données mesurées entre le 6 juin et le 13 novembre, ce qui représente 19000 données réduites à 4200 après nettoyage. Les nuages de croix rouges sont les couples de mesures avec en abscisse le rayonnement solaire incident et en ordonnée le membre de droite de l'équation 15, c'est-à-dire la part absorbée de l'éclairement. La droite est la régression linéaire passant par zéro obtenue par l'ajustement.

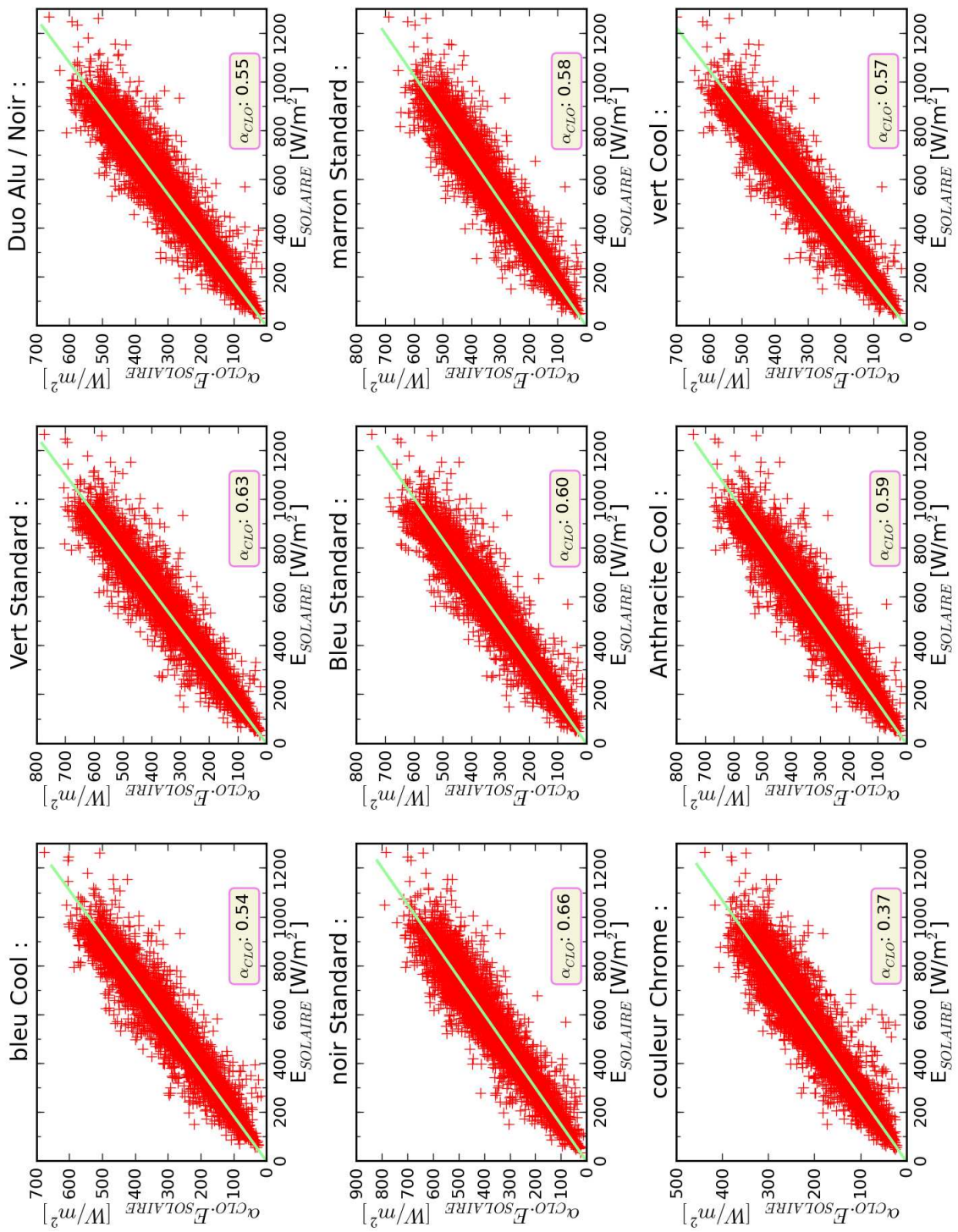


Figure 54 : Résultats de l'ajustement simultané de 9 absorptivités solaires avec un h_c linéaire en fonction de la vitesse du vent

L'exercice a été réalisé avec le profil linéaire et le profil logarithmique pour le coefficient de convection surfacique. Les 2 cas donnent sensiblement les mêmes valeurs. Les coefficients d'absorption CLO retrouvés sont beaucoup moins élevés que ceux mesuré en laboratoire. Cette différence est illustrée dans la figure 55, les étoiles sont les produits cool et les ronds les produits standards, chacun arborant sa couleur respective.

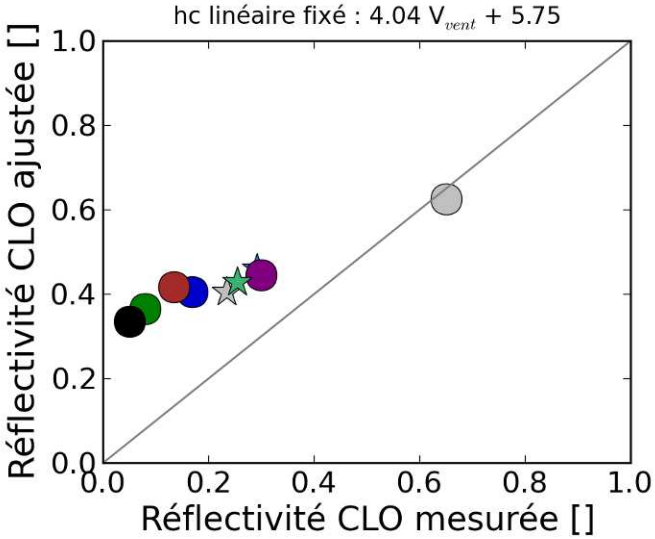


Figure 55 : Comparaison de la réflectivité mesurée et de la réflectivité obtenue par ajustement avec une loi de variation de h_c linéaire en fonction du vent

La valeur conférée en réflectivité mesurée pour le disque aluminium (gris) et le disque duo alu/noir (violet) sont des estimations, par conséquent leur position n'est pas significative. En revanche les autres disques voient leur albédo augmenter de 20 à 30% en comparaison avec les mesures en laboratoire. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que les peintures standards utilisées se sont rapidement éclaircies (domaine des visibles) au contact de l'environnement extérieur (air marin, vent, ensoleillement). En ce qui concerne les peintures COOL, les changements peu visibles à l'œil nu et les différences d'albédos mesurés/calculés sont également plus faibles que celles observées pour les produits standards.

La valeur de l'incertitude sur l'absorptivité CLO ainsi obtenue peut être calculée d'après la formule :

$$\alpha = \frac{\varepsilon \cdot \left(\sigma(273+T_S)^4 - E_{atm}\right) - h_c \cdot (T_{air} - T_S)}{E_{sol}}$$ Équation 17

En utilisant l'équation 14, on peut obtenir l'incertitude de notre absorptivité expérimentale avant l'ajustement par minimisation pour chaque pas de temps. La valeur d'incertitude de h_c est celle calculée par l'incertitude précédente. Nous ne pouvons pas connaitre l'incertitude après minimisation, car il faudrait connaitre l'algorithme de calcul de la fonction de minimisation utilisée (Fonction Python, scipy.optimize.fmin, utilise la méthode de Nelder-Mead qui est un algorithme d'optimisation non-linéaire, publiée par Nelder et Mead en 1965). Avant minimisation, l'incertitude est maximale pour les valeurs proches de 0 et lorsque la température de l'air est supérieure à la température des surfaces, cette caractéristique n'est pas entièrement liée au ΔT mais plutôt aux faibles valeurs d'éclairement. Pour le reste de la journée, l'incertitude sur l'absorptivité varie entre 0,05 et 0,2 avec des valeurs pics maximales les journées où l'ensoleillement est épisodique, avec un ciel couvert et des pics importants liés à la composante diffuse de l'ensoleillement.

2.5.3. Ajustement simultané des coefficients radiatifs et convectifs

En spécifiant la forme mathématique du h_c en fonction de la vitesse du vent et en introduisant cette vitesse à l'intérieur du bilan thermique, il est possible d'ajuster l'absorptivité et le coefficient d'échange surfacique en même temps pour l'ensemble des disques. Nous focaliserons notre méthode sur l'ajustement de l'absorptivité CLO. Donc de la même manière, on peut utiliser la fonction d'ajustement suivante :

$$h_c(V_{vent}) \cdot \frac{(T_{air} - T_S)}{E_{sol}} + \alpha = \varepsilon \cdot \frac{\left(\sigma(T_S)^4 - E_{atm}\right) + \varphi_{cond}}{E_{sol}} \qquad \text{Équation 18}$$

Le but étant de trouver quelles valeurs du paramètre expérimental variable à gauche de l'équation 18 (forme linéaire), et de ses coefficients h_c et α, vont donner le meilleur ajustement par minimisation sur les termes mesurés exprimé par l'expression $f(\varepsilon)$ dans le membre de droite. Afin de satisfaire aux hypothèses impliquées par ce dispositif expérimental, une sélection drastique des données exploitables a été menée, qui résume le nombre de mesures analysées à environ 4000 mesures par disques. La figure 56 illustre les résultats de l'ajustement des coefficients d'absorptivité CLO et du h_c en profil logarithmique pour tous les disques en même temps dans le même cas que l'équation 18.

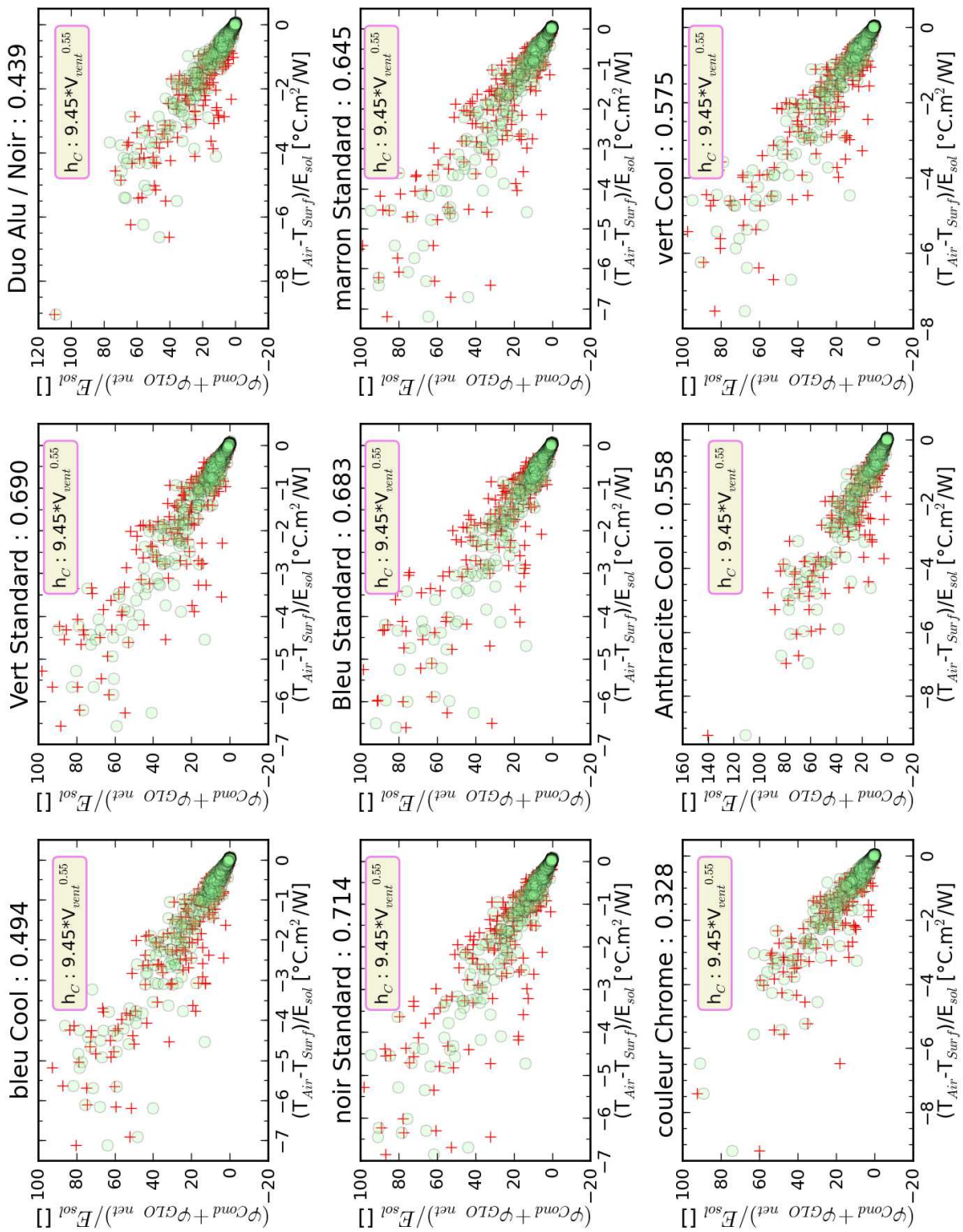


Figure 56 : Ajustement des coefficients d'absorptivité CLO et du h_{conv} global logarithmique en fonction de la vitesse du vent pour tous les disques

L'axe des abscisses représente le ratio de la différence de température $T_{air} - T_s$ par l'éclairement incident CLO alors que l'axe des ordonnées représente le ratio entre l'inverse du

flux radiatif GLO absorbé par le disque sur l'éclairement incident CLO. On peut observer des valeurs déviantes lorsque la somme du flux perdu par conduction et échanges radiatif infrarouge s'approche de 0. Les absorptivités obtenues suite à l'optimisation sont encore un peu faibles et de la même manière, on peut représenter l'évolution de leurs réflectivités par rapport à la valeur initiale mesurée par spectrophotométrie (Figure 57).

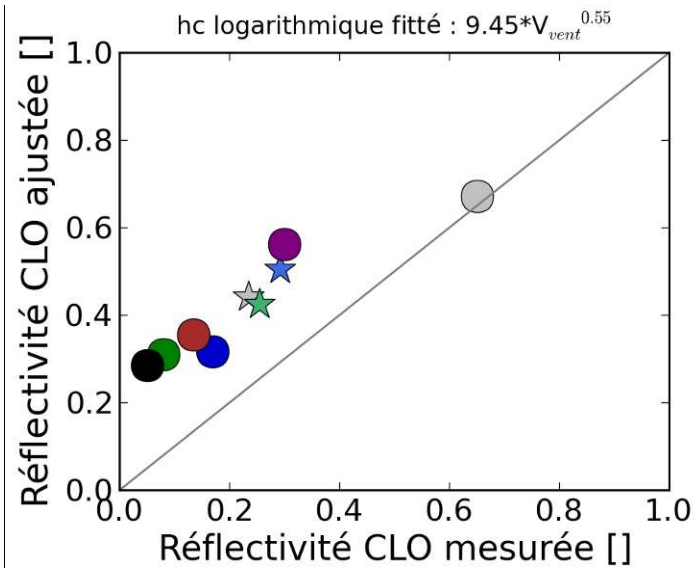


Figure 57 : Valeurs des réflectivités retrouvées par ajustement comparées à celle mesurées en laboratoires

Similairement à l'ajustement précédent, les coefficients d'absorptivité CLO retrouvés sont relativement faibles par rapport à ceux mesurés en laboratoire. Cette différence peut provenir de l'étalonnage des thermocouples au départ, ainsi que des répercussions de la mise en œuvre du banc. La différence entre le spectre solaire normalisé utilisé pour la mesure en laboratoire et le spectre solaire réel à La Rochelle peut également participer au biais. L'émissivité GLO attribuée à chaque échantillon n'est valable que pour la température de fonctionnement de l'émissiomètre, il se peut que cette valeur ne soit pas représentative de l'ensemble des variations de température de nos surfaces. Et la dernière hypothèse est la source d'erreur que peut représenter notre mesure de la température de l'air. Celle-ci est mesurée sous abri à environ 1 mètre au dessus du banc expérimental et n'est peut être pas représentative de l'écoulement libre au dessus du banc.

2.6. Conclusions et Perspectives

Un banc d'essai expérimental a été développé permettant la comparaison des bilans énergétiques de surface de 10 revêtements différents. Chaque échantillon de peinture est caractérisé par une réflectivité solaire et une émissivité GLO qui ont pu être calculés par la fermeture expérimentale simultanée des bilans énergétiques. Cette opération a été rendu possible par l'utilisation de méthodes d'ajustement et par l'hypothèse d'un coefficient d'échange de chaleur par convection commun aux 10 éléments situés sur une plaque plane et variable en fonction de la vitesse du vent. Pour réaliser les ajustements, les 15000 points de mesures brutes ont été « nettoyés » d'après la méthode décrite permettant un ajustement sur 7000 à 8000 points pour retrouver simultanément la valeur du coefficient commun d'échange par convection et les réflectivités solaire des 10 échantillons.

Cette méthode peut être appliquée à n'importe quel climat et permet d'obtenir un coefficient de réflectivité solaire effectif sur une période de mesure selon les fluctuations temporelle de l'éclairement solaire. Par réflectivité solaire effective, nous entendons un coefficient qui prend en compte la variation périodique de la réflectivité sous un climat donné fonction des angles d'incidence de l'éclairement (réflectivité hémisphérique) et des particularités de l'énergie contenue dans le spectre solaire incident.

Les valeurs d'absorptivité solaire ainsi calculées ont pu être comparées aux résultats d'une étude spectrophotométrique préalable donnant la valeur de la réflectivité solaire à une source normalisée. Une atténuation de l'ensemble des absorptivités solaires a été remarquée mais la méthode expérimentale a permis de retrouver qualitativement les différences qui existaient entre les propriétés radiatives de chaque surface. A charge de cette atténuation, on s'est aperçu de manière visuelle que certains des revêtements utilisés se sont éclaircis durant la période d'exposition. Les formules empiriques liant le coefficient de convection de notre banc à la vitesse du vent par fermeture du bilan nocturne ou par minimisation simultanée sont conformes à la littérature.

L'incertitude sur le calcul de l'absorptivité solaire a été minimisée (comprise entre 0,05 et 0,25) par élimination des données avec un trop faible écart de température ΔT (air/surface) qui entraînent une forte erreur sur le terme convectif du bilan.

Des perspectives pour améliorer la détermination expérimentale du coefficient h_c pour l'ensemble des disques situés sur le banc ont été abordées (présenté en ANNEXE IV) en complément de cette étude principale sur l'absorptivité solaire, α.

Cette première étude a donné des résultats intéressants sur les performances des peintures cool face à leurs homologues standards avec des écarts pouvant varier de 2 à 8°C pendant 10 à 20% du temps d'exposition. Seulement, cet ordre de grandeur sur un élément de surface horizontal non couplé au fonctionnement d'un bâtiment n'est pas suffisant pour en tirer des conclusions sur son effet sur la demande énergétique et la température d'ICU. Le chapitre suivant traite de l'influence des propriétés radiatives des façades sur un environnement urbain confiné.

3. Performances thermiques des peintures sur une maquette de scène urbaine

Les peintures cool ont été développées pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain au sein des environnements bâtis. L'évaluation du potentiel thermique d'échantillons de peintures cool par rapport à leur équivalent standard a été réalisée dans le chapitre 2 sur des éléments plans indépendants d'un système bâtiment. Pour apprécier leurs performances en fonctionnement réel, nous avons développé le banc expérimental CLIMABAT constitué de maquettes instrumentées à échelle réduite d'une scène urbaine simplifiée. Les règles de similitudes physiques entre la maquette et la scène à échelle réelle équivalente permettent d'envisager un effet de confinement thermoaéraulique similaire.

Cette scène urbaine constituée de 4 rues canyons parallèles avec des points de mesures de températures d'air et de surface permet d'accueillir 3 configurations de propriétés surfaciques différentes à l'intérieur des canyons afin d'effectuer des comparaisons sur leurs performances énergétiques relatives. Dans un premier temps, on montrera que les mesures enregistrées sur ces maquettes permettent de faire progresser la connaissance des phénomènes physiques liés au traitement énergétique d'ensembles urbains par revêtement cool.

Ces expérimentations permettront également de valider les modèles d'interactions entre bâtiments et microclimats urbains qui seront développés au chapitre suivant. Par rapport à la réalisation d'une campagne de mesures expérimentales dans des rues canyons réelles, cette plateforme de rues canyons à l'échelle réduite dans un environnement contrôlé s'avère très intéressante quant au contrôle des variables d'entrées de la scène choisie. En effet on élimine les aléas et perturbations humaines de notre scène de mesure et les matériaux constituant chaque élément de la scène sont bien connus. De plus les mesures sur de longues périodes (plusieurs mois successifs) ou la modification des paramètres de la scène urbaine sont rendues possible par la maîtrise totale de celle-ci.

3.1. Développement de la maquette in-situ CLIMABAT

La recherche de l'influence des proportions et des paramètres géométriques d'une scène urbaine ont été étudiés par différentes équipes in situ mais aussi par la conception et l'instrumentation de modèles physiques à échelle réduite. Le paragraphe suivant rend compte de certaines de ses expériences et de leurs résultats.

3.1.1. État de l'art : simulation in situ et maquettes

L'établissement de structures urbaines sur une surface naturelle, tels les bâtiments et les routes, influence fortement le microclimat local. Le développement d'une interaction entre les bâtiments et l'environnement est complexe car elle intègre de nombreux détails tels que la forme du terrain, la turbulence de l'écoulement et les interactions entre les différents modes de transfert de chaleur. Les données acquises lors de campagnes expérimentales sur différentes structures et régions urbaines sont rares (Bourbia et al. 2004 ; Niachou et al.; Niachou et al. ;Ali-Toudert et al. 2007), difficiles d'accès, et par le caractère particulier des structures étudiées, ne nous donnent pas d'explications transposables aux procédés physiques régissant le microclimat urbain en général. La réduction à l'échelle des modèles physiques fournit une alternative intéressante pour l'étude des climats urbains tout en permettant la simplification des caractéristiques des villes réelles.

Swaid (1993) a mené une campagne expérimentale nocturne sur un modèle réduit de canyon ajustable à différentes valeurs du rapport d'aspect entre la hauteur et la largeur de la rue, H/W. Le modèle réduit était fait de plaques en polystyrène afin de supprimer la composante de conduction du bilan énergétique. Les mesures réalisées lui ont permis d'affirmer que la température moyenne de la chaussée du canyon est toujours supérieure à celle des façades, ce phénomène étant interprété comme directement lié à la réduction du facteur de vue du ciel. Il a également mis en valeur la reproduction des configurations d'écoulements rasants lié à la géométrie du canyon en cas de vents dominants perpendiculaires à son axe pour des ratios longueur sur hauteur de 4. Nous avons décidé arbitrairement de conserver ce ratio pour nos maquettes. D'autres modèles réduits ont été développés pour différentes applications. Inagaki et al. (2008) a profité du modèle réduit COSMO (Comprehensive Outdoor Scale MOdel), une plateforme de 50 x 100 m² où sont répartis régulièrement 500 cubes de bétons de 1,5m de côté et 10cm d'épaisseur pour étudier la structure turbulente et la stratification des écoulements de la

couche limite atmosphérique au dessus d'une zone urbaine. La similitude principale à achever dans ce cas là est la distance entre le profil de vitesse de l'écoulement pleinement développé et la rugosité urbaine. Leurs résultats démontrent que dans ce cas là, la similarité des écoulements est robuste pour les contraintes de Reynolds normales aux parois qui sont indépendantes de la rugosité du site et des conditions de la couche atmosphérique supérieure et en revanche les profils de vitesse horizontaux ne sont pas reproductibles en raison de l'influence de cette couche supérieure sur la turbulence de la sous-couche de canopée. Pearlmutter et al. (2007) ont suivi pratiquement le même protocole expérimental en disposant des briques de bétons pleines sur un espace plat du désert du Negev en Israël, mais en faisant varier l'alignement des rues ainsi créées (Figure 58). Ce modèle réduit a permis la validation d'un code de simulation numérique du confort thermique des espaces urbains dans les espaces arides.

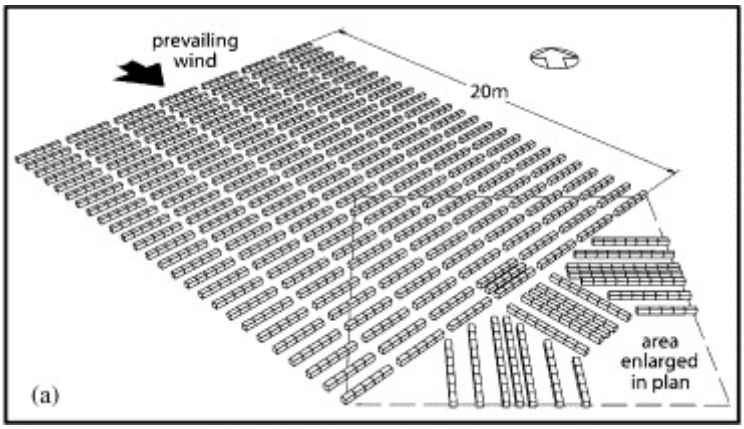


Figure 58: Configuration globale du modèle réduit pour obtenir une similarité de rugosité en amont des vents dominants (Pearlmutter et al. 2007)

Les résultats obtenus ont permis d'identifier les indices de conforts relatifs à l'orientation et au ratio géométrique des canyons urbains selon les effets du rayonnement solaire et de la convection liée aux vents dominants.

Les exigences de similitude entre la maquette et le modèle reproduit sont nombreuses et il est difficile de toutes les satisfaire. Néanmoins, les modèles réduits sont utiles pour la reproduction systématique des relations entre l'agencement d'une scène urbaine et les phénomènes physiques interagissant sous et au-dessus de la canopée urbaine. De ce fait, la mesure des composantes des mécanismes de transfert de masse et de chaleur sur la scène construite nous

permettra de d'obtenir des valeurs paramétriques et des indications quand à la reproduction des principaux phénomènes physiques responsables de l'îlot urbain et ainsi permettre l'optimisation des codes de calculs numériques. Connaissant les expériences déjà menées, nous nous proposons de réaliser une maquette de rues canyons plus axée sur le comportement de l'ambiance du bâtiment en réponse à un environnement bâti. Le ratio géométrique de l'espacement des rues par rapport à la hauteur des bâtiments W/H devra être inférieur à 1, de cette manière nous maximisons les apports solaires dus aux inter-réflexions entre les façades du canyon. De plus, nous assurons théoriquement une circulation d'air en vortex à l'intérieur du canyon avec un écoulement de canopée dit rasant pour des vents perpendiculaires à l'axe de la rue (Oke 1988). Cette configuration donnerait un aspect des plus favorables au développement du phénomène d'ICU sur la scène réduite.

3.1.2. Aspect et Géométrie

La plateforme est constituée de 5 bâtiments et donc de 4 rues canyons, à l'échelle 1/10ème. Le plan de la plateforme, développé d'ouest en est, est constitué de la façon suivante :

- Une rue témoin avec façades intérieures et toitures peintes avec une couleur standard,
- Une rue peinte avec le revêtement de surface Cool[4], les deux façades extérieures et les toitures sont traitées avec le revêtement standard,
- Une rue asymétrique avec la façade et toiture du bâtiment ouest peintes, la façade du bâtiment situé à l'extrémité est de couleur standard.

[4] Peinture fournie par l'entreprise ABOLIN

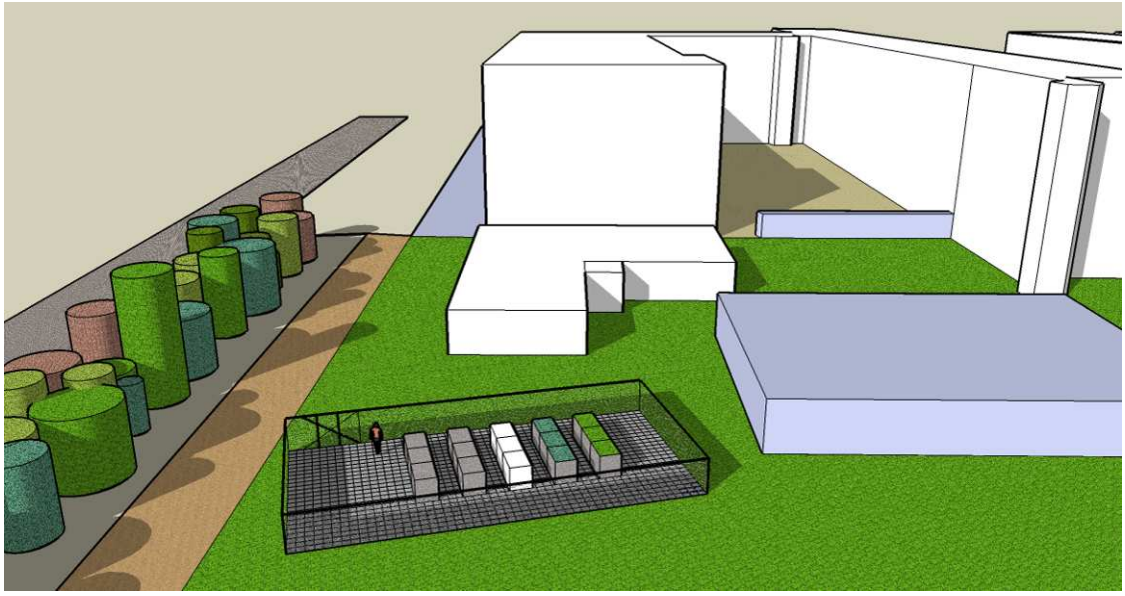


Figure 59 : schéma de la plateforme d'expérience dans son environnement réel

La dernière rue correspond à une expérience en cours d'élaboration, les toitures devant être par la suite recouvertes d'éléments végétalisés de nature différentes. Ses façades et ses toitures ont aussi été peintes avec la couleur standard. Afin de refléter fidèlement un cadre urbain réel, la conception de modèles réduits exigent à la fois des similitudes physiques et géométriques avec la réalité. Pour la similitude géométrique, nous avons choisi une simple répétition de rues canyons, de ratio W/H égal à 1, formées de « bâtiments » rectangulaires sans vitrage. Les détails d'architecture n'étant pas reproduits et les vitrages omis, nous occultons l'une des sources de chaleur principale responsables de l'élévation des températures dans les bâtiments, les apports solaires par les vitrages. En revanche, la faible épaisseur des parois non isolées compense en partie cette différence avec des bâtiments réels.

3.1.3. Analogie des échanges radiatifs

Pour les échanges radiatifs, on peut considérer que tant que l'on utilise des matériaux de construction réels (cuves de bétons) sous des conditions aux limites réelles (terrain dallé avec masques lointains), la similitude est respectée, car les dimensions linéaires de notre modèle à échelle réduite seront toujours beaucoup plus grandes que les longueurs d'onde considérées (0.3 à 100µm). Pour la similitude des échanges de courtes longueurs d'ondes, l'albédo des surfaces et le flux solaire incident sont importants mais aussi le respect du cycle journalier.

Concernant les échanges dans les infrarouges lointains, on doit conserver une émissivité dans les IR proches des surfaces urbaines réelles, un flux atmosphérique incident réel et s'assurer d'observer des températures de surfaces courantes. Nos maquettes étant exposées sur un site extérieur, les conditions de concordance des ratios géométriques, de cycle diurne journalier devraient être remplies avec une variation d'amplitude possible des températures de surface observées ; elles peuvent être modifiées par l'interaction des autres modes de transferts thermiques tels que les transferts turbulents avec l'air et la conduction à travers les bâtiments ou tout élément de la scène considérée et donc être différentes de celles d'une scène urbaine à taille réelle.

3.1.4. Similitudes thermoaérauliques

L'obtention d'une similitude d'écoulement aéraulique n'est pas réalisée ici. Les deux critères de similitudes principaux issus de l'adimensionnement des équations d'écoulement et de transfert de chaleur aux parois sont le nombre de Reynolds, faisant état de la diffusion de la quantité de mouvement en relation avec les forces de viscosité et le nombre de Péclet faisant état de la diffusion thermique. Tous deux dépendent d'une longueur caractéristique « du plan à l'origine » (Padet 1997), en général, la hauteur des bâtiments, et de la vitesse de l'écoulement non perturbé, la similitude de la maquette n'est donc pas réalisable sans augmenter la vitesse de l'air. Pour les écoulements neutres stratifiés, l'indépendance au nombre de Reynolds est requise en terme d'équation normalisée de Navier-Stokes. Généralement, le nombre de Reynolds « critique », au dessus duquel les caractéristiques de l'écoulement turbulent autour des bâtiments devient indépendant du nombre de Reynolds a pu être étudié en utilisant des veines d'essais aérauliques mais ne peut être atteint en environnement extérieur. Néanmoins, il faut faire des choix et généralement lorsque l'on considère l'aspect thermique, on s'intéresse de près aux phénomènes de parois, c'est-à-dire à la contrainte de surface, et au flux de chaleur échangé. L'introduction des équations de flux adimensionnées fait apparaitre un critère local relatif au flux de chaleur, le nombre de Stanton local qui peut s'écrire :

$$St_L = \frac{h_L}{\rho.Cp.U_\infty}$$ Équation 19

Ici, la similitude entre la maquette et le prototype est respectée puisque la masse volumique, la chaleur massique c_p et la vitesse de l'écoulement non perturbé sont égales et que le coefficient

local de convection varie peu. Pour les écoulements liés à la convection naturelle, sans effet d'entraînements liés aux vents, les échanges convectifs liés à la poussée thermique sont dépendant du ratio superficie de la surface considérée sur son périmètre (Longueur caractéristique utilisée pour le nombre de Grashof). Le nombre de Richardson et de Froude sont aussi des paramètres pour garantir la similitude des écoulements thermiquement stratifiés.

$$Ri = \frac{g.\beta.\Delta T_0.L_{C,0}}{(V_0)^2}$$ Équation 20

g [m/s²] est l'accélération de pesanteur, β [K^{-1}], le coefficient de dilatation de l'air, ΔT_0 [K], la différence de température entre la surface et l'air de référence, Lc_0 [m], la longueur caractéristique de référence et V_0 [m/s], la vitesse fonction de la hauteur au abord des parois verticales.

Si les écoulements liés à ce phénomène sont moins importants, en revanche la similarité thermique est conservée, puisque l'ordre de grandeur des vitesses de déplacement d'air aux abords des surfaces est conservé. En étudiant l'aspect aéraulique entraîné par la forme complexe qu'est la rue canyon, des études ont montré des tendances relatives à la capture des polluants (Huang et al.; Klein et al. 2007) ou bien à la compréhension des dimensions et caractéristiques nécessaires au développement du phénomène d'îlot de chaleur urbain. Dans le premier cas, l'étude a surtout pour but de réaliser des similitudes au niveau de la couche limite de vitesse créée pour des profils d'écoulement non perturbés frappant l'obstacle. Pour les autres, l'étude du profil de couche limite thermique sur la rue canyon est aussi indispensable. Le deuxième cas d'étude, a pour but de mettre en évidence des coefficients de transfert de chaleur par convection à l'échelle de l'obstacle tout entier, qui sont généralement ensuite modélisés par des réseaux de résistances entre les surfaces et un point spécifié dans le volume d'air (Masson 2000 et Oliveira Panão et al.). Notre approche étant plus spécifique au bâtiment, nous cherchons à conserver la valeur des coefficients convectifs locaux (Kanda et al. 2005), par conséquent la taille des modèles réduits importe peu.

3.1.5. Analogie d'inertie des structures et de conduction de la chaleur

L'obtention d'une similitude d'inertie thermique est souvent considérée comme la plus problématique (Kanda 2006). Étant donné que nous respectons le cycle jour / nuit, l'idéal serait d'avoir une analogie de la constante de temps thermique entre la maquette et le prototype d'un

bâtiment réel qui dépend principalement des parois. La constante de temps τ [s] d'une paroi est la durée qui lui est nécessaire pour passer d'un état stable à un autre sous l'effet d'un changement instantané de la température (régime transitoire). Ce temps de réaction est proportionnel au carré de l'épaisseur et inversement proportionnel à la diffusivité thermique.

$$\tau = e^2 / a \qquad \text{Équation 21}$$

Où e [m] est l'épaisseur de la paroi a [m²/s] est la diffusivité thermique. Les similitudes de transferts thermiques au niveau des parois sont exprimées par deux nombres sans dimensions : le nombre de Biot et le nombre de Fourier. Le nombre de Biot exprime le ratio entre le flux perdu à la paroi et le flux conduit dans la paroi.

$$Bi = \frac{h.e}{\lambda} \qquad \text{Équation 22}$$

Où e [m] est l'épaisseur de la paroi h [W/m².K] le coefficient de transfert global à la paroi et λ [W/m.K], la conductivité thermique. Le nombre de Fourier exprime la part du flux conduit vers l'extérieur sur le flux stocké par le matériau d'origine doit être le même dans le modèle et dans la réalité. Ce nombre de Fourier est donné par :

$$Fo = \frac{a.t}{e^2} \qquad \text{Équation 23}$$

Avec a, la diffusivité thermique du matériau observé, t, le temps en seconde, et e est en fait la longueur caractéristique calculée d'après le rapport caractéristique *Vol / S* de la surface exposée sur le volume du corps. Chaque bâtiment est modélisé par 3 cuves de récupération d'eaux pluviales accolées, conçues en béton moulé, et notre sol a été réalisé en dalles de béton pressées. Nous conservons donc la diffusivité thermique des structures entre la maquette et le modèle réel puisque ce sont des matériaux couramment employé pour la construction.

Pour vérifier si les nombres de Fourier et de Biot de nos maquettes sont représentatifs d'un bâtiment à échelle réelle, nous avons simulé et comparé un élément représentatif de bâtiment de la maquette ainsi qu'un bâtiment réaliste à structure légère à l'échelle 1 avec le logiciel de thermique du bâtiment TRNSYS. La maquette a été modélisée avec les caractéristiques du béton présentées en 3.3.2, avec un débit d'infiltration de 0,2 Vol/h. L'enveloppe du bâtiment réel a été modélisée par des parpaings creux de 20cm, une dalle en plafond et en plancher de 12cm de béton armé, des vitrages à l'est et à l'ouest représentant 1/6ème de la surface habitable

(3 étages) et un débit d'infiltration de 0,6 vol/h. La figure 60 présente les résultats obtenus pour les températures de façade pour les deux échelles étudiées.

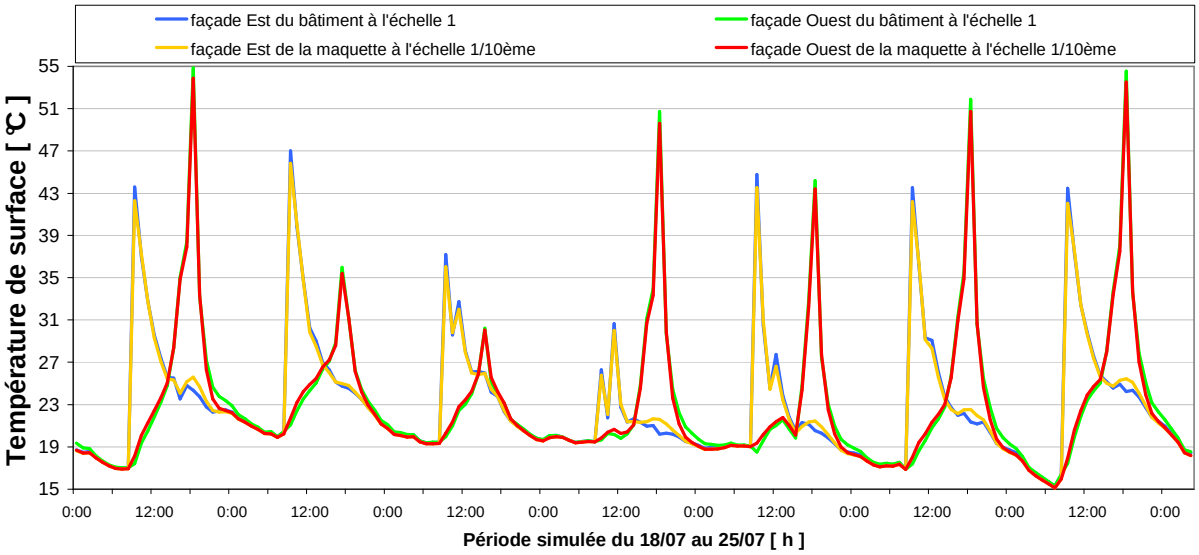


Figure 60 : Températures de façades pour un bâtiment réel et la maquette à l'échelle 1/10ème simulées avec TRNSYS

Les températures de surfaces des façades pour les deux échelles sont très semblables. Les différences maximums et minimums n'excède pas 1,5°C pour les deux façades et une différence moyenne de -0,21°C à l'est et -0,02°C à l'ouest. La température de surface en toiture et du plancher ont aussi été comparées avec des différences semblables pour la toiture et plus haute pour le plancher à cause des apports solaires par les vitrages dans le cas du bâtiment réel.

La figure 61 montre l'effet comparé sur la température de l'air intérieur des deux configurations.

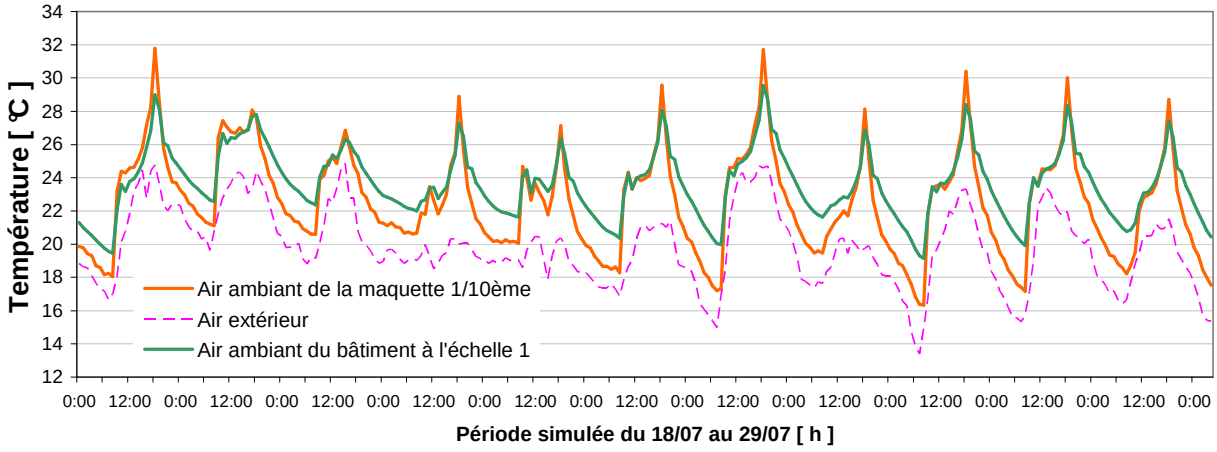


Figure 61 : Températures d'air intérieur pour un bâtiment réel et la maquette à l'échelle 1/10ème simulées avec TRNSYS

La différence de température est plus marquée sur l'air intérieur. L'air intérieur de la maquette est jusqu'à 2,8°C plus chaud mais en moyenne, il est 1°C plus frais que pour le bâtiment réel, qui peut être jusqu'à 2,9°C plus chaud. Les maximas diurnes sont en phase, en revanche, pendant la nuit l'évolution des deux températures diverge de part une masse thermique plus importante pour le bâtiment réel.

Ces différences sont faibles et les cycles jour/nuits correctement reproduits. On peut en conclure que la maquette reproduira assez bien le comportement d'un bâtiment réel, notamment au niveau des températures de surface en façade. Cette analyse des transferts thermiques à travers les similitudes thermiques et thermoaérauliques permet d'envisager avec ce modèle réduit l'étude de l'interaction bâtiment/ microclimat à l'échelle de la rue. Un élément propice au développement d'un phénomène de confinement thermique est la concordance de températures élevées et de vitesses de vents faibles à l'intérieur de l'espace urbain. Ces conditions peuvent être envisagées de par l'influence de l'environnement proche de la plateforme présenté ci-après.

3.2. Interaction du modèle réduit avec son environnement

La Rochelle est une ville en bord de mer où les vents d'ouest soufflent fréquemment. La structure des bâtiments dans la partie dense du centre ville a été conçue avec des pierres blanches provenant des carrières alentours. Le type d'urbanisme, la proximité de la mer et le climat local sont peu enclins à produire des conditions d'îlot de chaleur urbain remarquables à l'échelle d'une grande ville. Néanmoins nous avons choisi de mettre en place des maquettes de rues canyons instrumentées en appareils de mesures pour notre étude sur les modifications locales des conditions thermoaérauliques pour des constructions denses. Les conditions essentielles pour recréer les caractéristiques nécessaires à la formation de d'îlot de chaleur localement sont de maximiser les apports solaires tout en réduisant l'exposition aux vents dominants.

3.2.1. Effets des vents dominants

Nous avons décidé d'orienter nos rues dans l'axe Sud Nord afin de conserver l'intérieur des rues à l'abri des vents d'ouest. De plus une haie d'arbres et arbustes fait office de protection à l'ouest (visible sur la figure 75) et les bâtiments alentours sont suffisamment éloignés pour garantir au minimum 6 heures d'ensoleillement direct par jour pendant toute l'année. Évidemment, la proximité relative des bâtiments laisse présager un comportement aéraulique perturbé et turbulent. Dans le cadre d'un projet recherche avec des étudiants en deuxième année de master, nous avons cherché à estimer le comportement thermoaéraulique de l'écoulement dans nos rangées de rues canyons pour une configuration moyenne. Pour ce, nous avons choisi d'utiliser le logiciel de simulation du couplage climat-environnement ENVI-met (Bruse et al. 1998). Ce logiciel résout les équations de transfert de masse de Navier-Stokes en condition non-hydrostatique et incompressible, au sein d'un maillage large ainsi que les transferts de chaleur et d'humidité. La fermeture de la turbulence est basée sur un modèle k-ε standard (1,5). Les surfaces délimitées par les mailles se voient attribuer des coefficients relatifs à leurs paramètres radiatifs, thermiques et d'humidité puis on fixe des conditions aux limites et une configuration de l'étude. Une première simulation est effectuée sur terrain nu, c'est-à-dire sans la présence de l'environnement réel de nos maquettes. La configuration étant la suivante :

- Un vent dominant d'orientation ouest et de vitesse 4m/s et un fichier d'entrée des températures de l'air à la station météorologique la plus proche.

- Une durée de simulation de 16h au 21/06/2008 (5h à 21h)
- Pas de calcul variable de 2 à 10s et enregistrement des résultats toutes les heures
- Un coefficient de rugosité du terrain fixé arbitrairement à 0,5.

Les résultats ont été approfondis pour une capture d'écran instantanée faite à 14h sur une coupe en x/y à z=0,4m c'est-à-dire au premier tiers de la hauteur totale de nos maquettes.

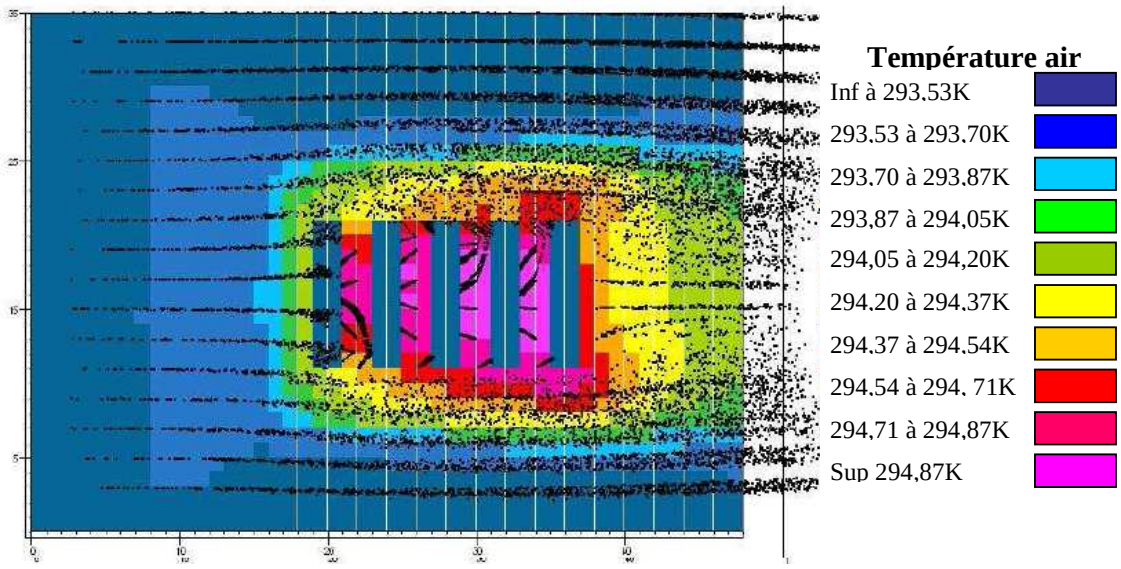


Figure 62: Prédiction des températures d'air autour de Climabat constitué de 4 rues canyons, à 14h et pour un plan en X, Y situé à Y=0.4m (Réalisé avec Envi-Met, Bruse et al. 1998)

Cette simulation prédit une température de l'air, dans les canyons, supérieure de 1 à 1,5°C, pour une vitesse des vents à l'intérieur des canyons particulièrement réduite (<0,3m/s) alors que les vitesses à l'extérieur de nos rues présentent des valeurs supérieure à 2,2m/s. Une seconde simulation est alors menée dans l'environnement protégé par les structures alentours et la haie arborée, tous étant simulés par des murs, et les caractéristiques de l'asphalte sont attribuées au sol de notre plateforme. La figure 63 illustre la nouvelle répartition des champs de température entrainée par l'intégration de l'environnement immédiat de la plateforme à la simulation. Cette configuration ne présente pas d'évolution tangible de l'intensité d'îlot de chaleur de notre scène urbaine, mais le phénomène s'étend de manière significative. En effet les arbres et les bâtiments protègent les maquettes des rues des effets directs du vent, et la scène urbaine se retrouve dans le sillon turbulent de l'obstacle, dissipant ainsi les champs de températures et diminuant les gradients existants au niveau des rues dans le schéma précédent.

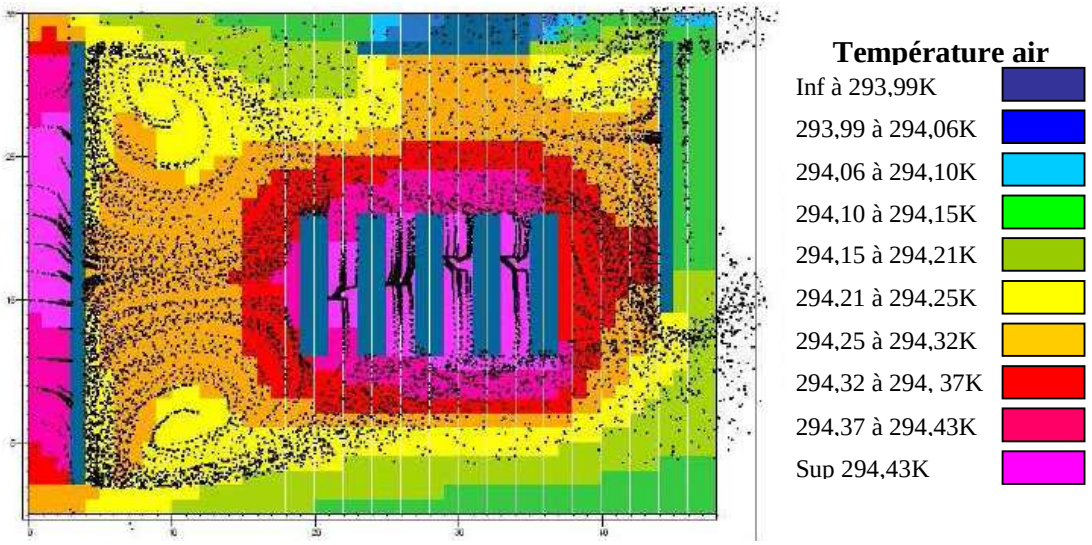


Figure 63 : Prédiction des champs de températures perturbés par l'environnement réel autour de la plateforme, à 14h pour un plan X, Y situé à Y=0.4m (Envi-Met, Bruse et al. 1998)

La vitesse du vent à 0,4 m de hauteur au sein de la rue canyon reste la même. Seules les vitesses de l'écoulement au dessus de notre canopée urbaine diminuent, On peut ainsi espérer la formation d'un panache caractéristique au dessus de la plateforme les jours de vent faible.

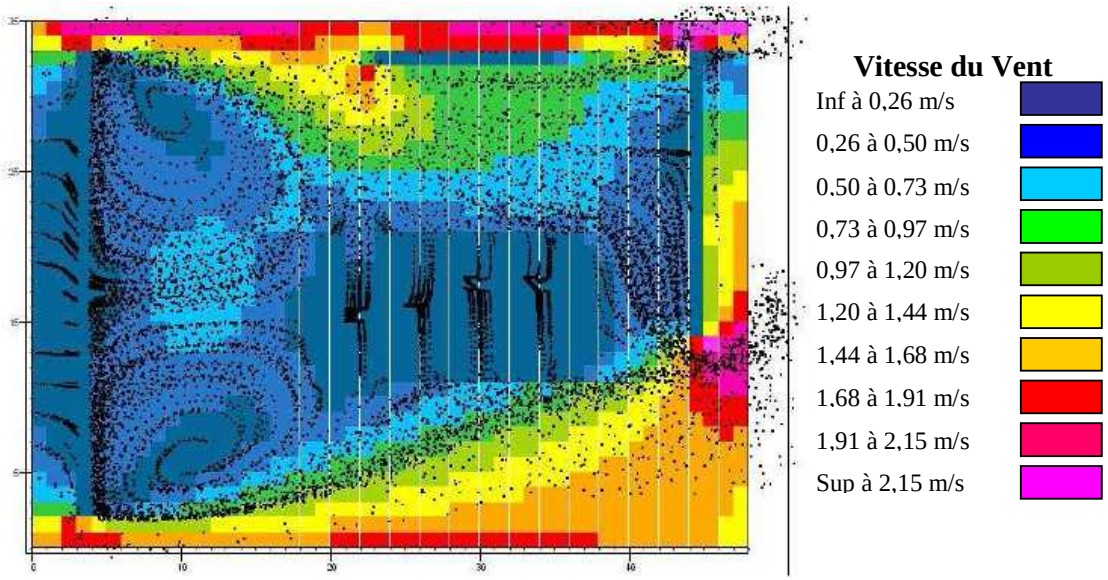


Figure 64 : Champs de vitesse perturbés par l'environnement réel autour de la plateforme, à 14h et pour un plan en X, Y situé à Y=0.4m (Réalisé avec Envi-Met, Bruse et al. 1998)

Cette étude présente des résultats permettant d'envisager l'étude du confinement thermoaéraulique suivant cette définition de l'environnement de notre plateforme. L'emplacement a été choisi pour sa protection aux brises de mer, cet effet de barrière semble être rempli par la haie d'arbres néanmoins la condition de porosité de la haie n'a pas été réellement exploitée.

3.2.2. Effets des masques lointains

Notre plateforme expérimentale n'est pas directement équipée de capteurs de flux solaires. En revanche, pour avoir un aperçu de la distribution journalière et saisonnière de cette grandeur physique sur les surfaces de la scène urbaine réduite nous avons effectué des simulations sur le logiciel SOLENE distribué par le CERMA[5]. La définition de l'environnement proche de la scène urbaine et des maquettes a été réalisée (Figure 65) a partir d'un plan de masse et des coordonnées topographiques mesurées pour la plateforme avant d'être maillé dans SOLENE.

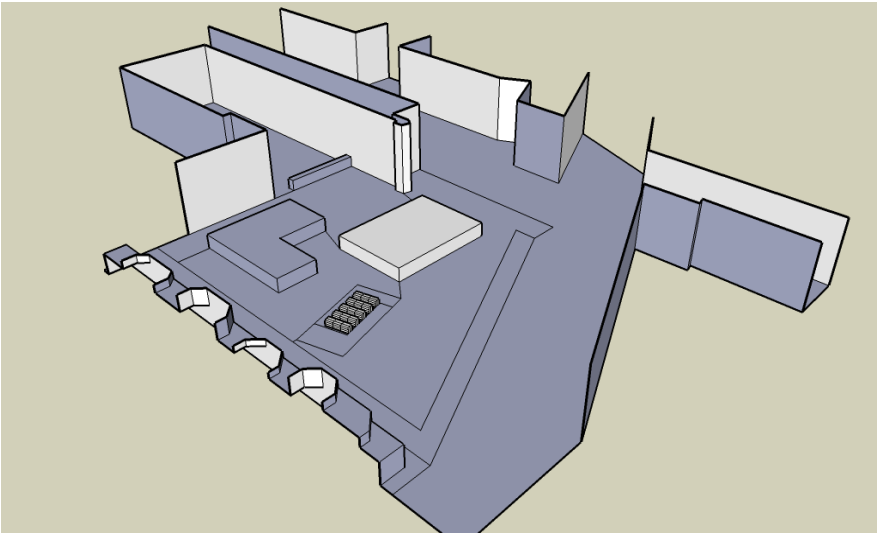


Figure 65: Modélisation de la scène urbaine environnant la plateforme de simulation afin d'effectuer la simulation de l'ensoleillement sous SOLENE

Les surfaces des bâtiments ont été découpées selon un schéma spécifique afin d'obtenir des flux de chaleur représentatifs des emplacements où les températures de surface sont mesurées (Figure 66) :

[5] Centre de recherche méthodologique d'architecture de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes

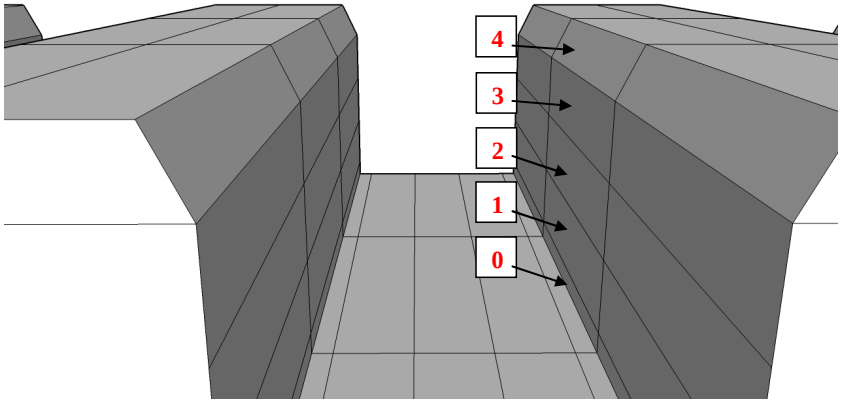


Figure 66 : Découpage des rues en facette pour les besoins de la simulation d'ensoleillement

Les façades du module central de chaque bâtiment ont été découpées en 5 surfaces distinctes, une facette 0, de 9cm de haut, puis 3 facettes (1, 2 ,3) de 32 cm pour la partie verticale (aux centres desquelles sont situés les thermocouples sur le banc expérimental), puis une facette 4 de 23cm représente la face inclinée et enfin une pour la toiture horizontale de 93 cm de large. La figure 67 illustre la densité d'énergie solaire absorbée après réflexion par les différentes facettes de la scène urbaine réduite entièrement revêtue de la peinture standard au 15 août.

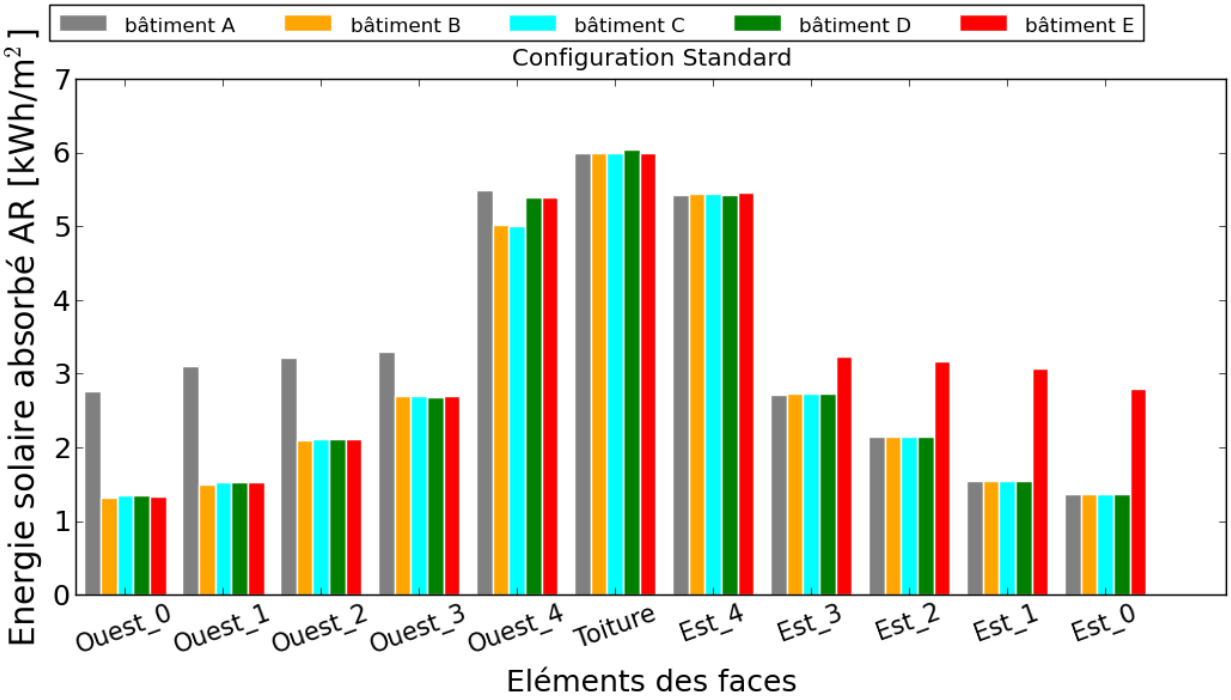


Figure 67 : Énergie solaire journalière absorbée après inter-réflexions par les différentes facettes de la cuve centrale pour les 5 bâtiments de la scène urbaine réduite pour le 15 aout

La façade orientée ouest du bâtiment A fait face à un espace ouvert flanqué d'une haie d'arbre en masque lointain. La façade orientée est du bâtiment E fait face à un autre espace ouvert avec une façade métallique peinte de baraquement préfabriqué en masque lointain. Ces masques lointains expliquent également la légère différence de flux absorbés au niveau des facettes 4 et de la toiture selon les bâtiments. Si l'on considère le bâtiment A comme notre bâtiment témoin, la densité surfacique d'énergie journalière absorbée par toute l'enveloppe est inférieure de 371 Wh/m².jour pour le bâtiment B, de 364 Wh/m².jour pour le bâtiment C et 335 Wh/m².jour pour le bâtiment D. La figure 68 représente les mêmes énergies absorbées par mètre carré de facette avec la configuration d'étude regroupant la rue témoin, la rue cool et la rue asymétrique. Les réflectivités solaires utilisées sont celles mesurées au paragraphe 3.3.1, pour le produit standard (0,16), et pour le produit cool (0,38), et des albédos estimés pour les dalles de la plateforme (0,25) et les surfaces de l'environnement proche (pelouse, bâtiments préfabriqués, bitume, bâtiment en béton peint).

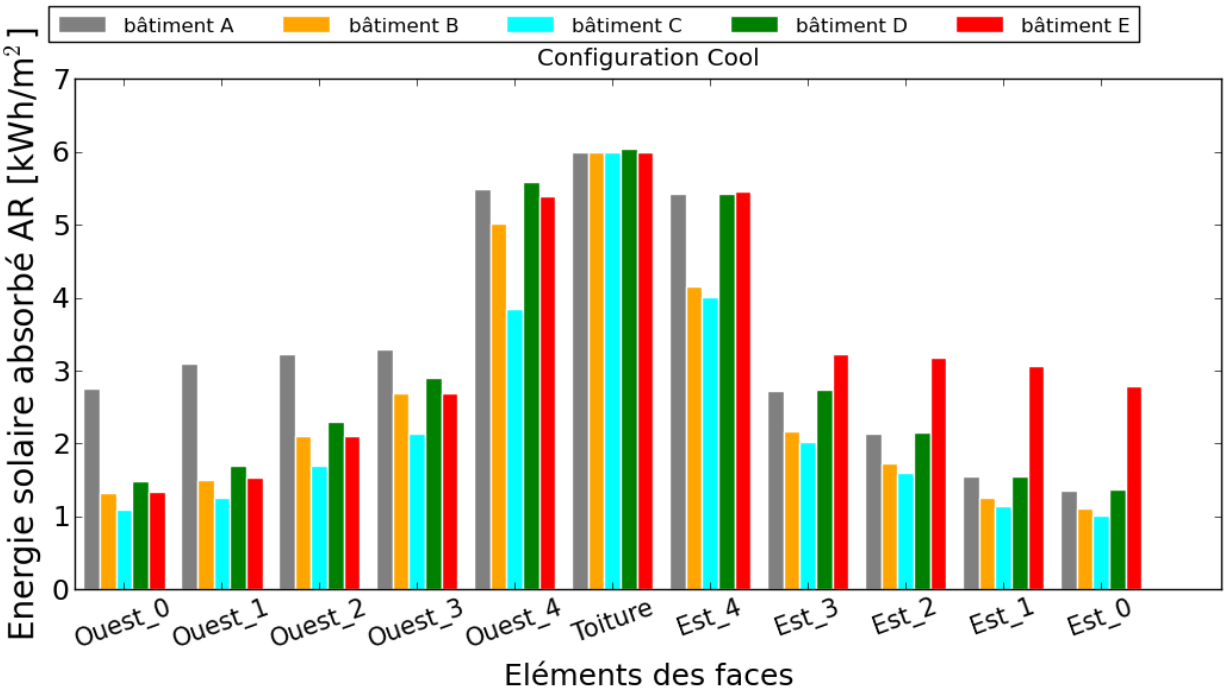


Figure 68 : Énergie solaire journalière absorbée par les différentes facettes constituant la scène urbaine par bâtiment pour le 15 aout 2009 pour la configuration cool / standard

Dans ce cas précis, l'énergie solaire surfacique journalière absorbée par le bâtiment A est inférieure de 570 Wh/m².jour pour le bâtiment B, de 800 Wh/m².jour pour le bâtiment C et de 266 Wh/m².jour pour le bâtiment D. Pendant l'hiver, la différence est moins importante allant

de 178 à 91 Wh/m².jour. Pour cette même journée, si on compare l'énergie solaire absorbée par m² de surface pour les 4 bâtiments pour les 3 configurations mises en œuvre par rapport à l'état initial, le bâtiment A en absorbe 5,6% moins, le bâtiment B 12,4% moins et 2% de plus pour le bâtiment D. Les facettes les plus hautes étant les plus sollicitées par cette réduction. Si les positions des masques lointains et du banc expérimental ont été bien estimées et si l'on suppose que la distribution des températures de surfaces diurnes sur la scène urbaine est principalement influencée par le flux solaire absorbé, la température des bâtiments devrait être du plus élevé au plus frais, A, D, B puis C.

3.3. Protocole expérimental

La mise en œuvre des maquettes et l'installation des instruments de mesure sur la plateforme ont été réalisées dans un souci de durabilité du dispositif de mesure face au vieillissement et aux intempéries. L'ensemble des caractéristiques du banc a été répertorié pour faciliter l'interprétation des mesures et les interventions de maintenance.

3.3.1. Mesures des réflectivités solaires et émissivités infrarouges des peintures marrons standard et cool

Les mesures de réflectivité solaire ont été menées par le GBES à l'université d'Athènes[6] , sur 2 échantillons des peintures marron utilisées pour couvrir les maquettes. Les échantillons ont été appliqués en deux couches sur un substrat de type plaque d'aluminium et n'ont jamais été exposés au climat extérieur et n'ont donc pas subi de perte de réflectivité relative à l'usure et l'encrassement. La figure 69 présente les réflectivités solaires spectrales mesurées pour trois échantillons. Le protocole de mesure est décrit dans la Norme ASTM E903-967 avec un spectrophotomètre UV / VIS / PIR à sphère intégrante et une surface de réflectivité référence de type PTFE.

---

[6] Group Building Environmental Studies, National and Kapodistrian University of Athens, Greece

[7] ASTM E 903 -Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmission of Materials Using Integrating Spheres

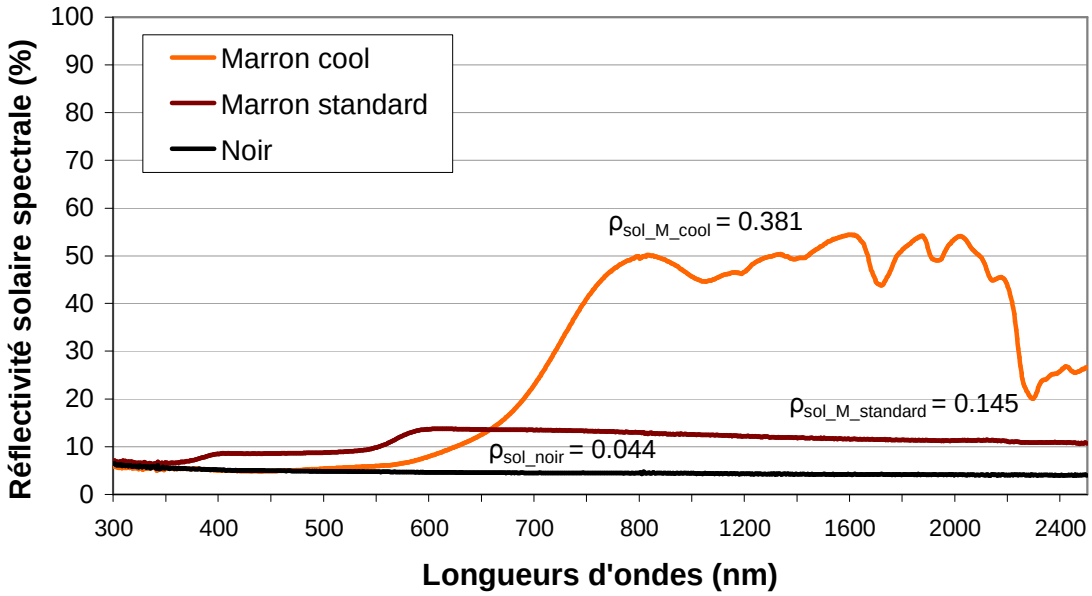


Figure 69 : Réflectivité spectrale pondérée par le spectre solaire pour 3 échantillons de peinture (Marron standard, marron cool et noir)

On remarque que dans le spectre visible (380–760µm), les réflectivités des deux produits diffèrent. Le marron cool d'abord similaire à une surface peinte en noir jusqu'à 500µm voit sa réflectivité spectrale s'élever rapidement au-delà de 600µm. D'un autre coté, le marron standard est plus clair dans le spectre 300-660µm mais sa réflectivité à ensuite tendance à décroitre sur la fin du spectre visible et dans le domaine des proches infrarouges. Les deux produits marron ne s'accordent pas complètement sur leur aspect visuel. Les réflectivités solaires sur le spectre 300-2500µm sont alors calculées à 0,381 et 0,115 pour le produit cool et le produit standard respectivement. Les émissivités GLO ont été mesurées dans le chapitre précédent et sont de 0,85 et 0,89 respectivement.

3.3.2. Caractéristiques thermiques des matériaux du banc

Le schéma technique des cuves de récupération d'eaux pluviales utilisées pour modéliser nos bâtiment est présenté en figure 70.

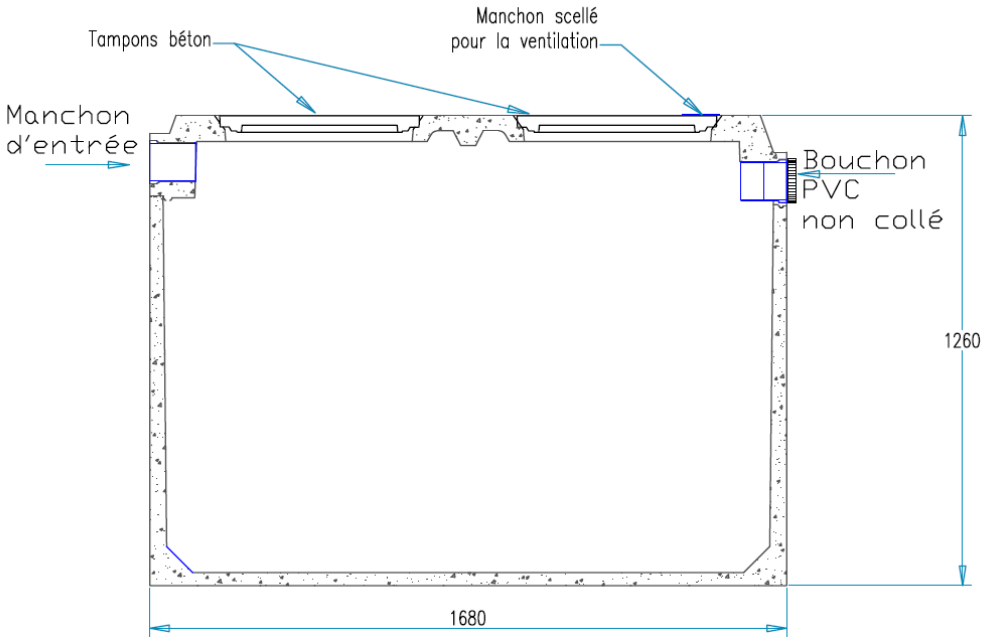


Figure 70: cuve de récupération d'eau pluviale utilisée pour simuler un bâtiment

Les capacités thermiques des murs, toitures et des fondations de nos bâtiments sont relativement faibles, avec des parois en béton de 4 à 4,5 cm d'épaisseur, si l'on suppose une échelle de 1/10ème, l'enveloppe du bâtiment peut être considérée comme l'équivalent d'un bâtiment à structure légère de type bureau pour 3 étages et un rez-de-chaussée. Pour la chaussée, sa constitution est équivalente à une aire piétonne légère, avec des dalles en béton gravillonné de 4 cm d'épaisseur posées sur un lit de sable et graviers de 80cm au dessus du sol naturel de l'emplacement. Pour limiter les infiltrations d'eau, les cuves ont été colmatées, rendant à l'occasion les infiltrations d'air relativement faibles. La masse volumique et la conductivité thermique de nos matériaux ont été mesurées. La première par une simple méthode de pesée et de déplacement de liquide, sans prendre en compte le terme lié à la porosité des matériaux, la seconde a été menée avec un analyseur de conductivité thermique de marque C-Therm avec un capteur de température Ci T133. Les dalles sont constituées de deux matériaux un substrat et un enduit gravillonné, elles ont donc été découpées pour obtenir les caractéristique propres aux deux matériaux. La capacité thermique est mesurée en renseignant la masse volumique dans l'analyseur, celui-ci mesurant l'effusivité thermique du matériau et sa conductivité, il peut la calculer indirectement par la relation suivante :

$$Cp = e^2 / \lambda.\rho$$ Équation 24

Les résultats sont résumés dans le tableau 6

Tableau 6 : Caractéristiques thermiques des matériaux utilisés

Matériaux	**Masse volumique (kg/m^3)**	**Conductivité thermique (W/m.K)**	**Capacité thermique (J/kg.K)**
Béton Cuves (+ paillasse de fer)	2150	2.26 – 2.47	908 - 920
Mortier Dalles (substrat)	2780	1.90 - 2.19	690 - 700
Béton gravillonné (enduit)	2290	3.55 – 3.61	924 - 928

Les résultats obtenus par mesure à l'analyseur de conductivité thermique peuvent s'avérer relativement instables en raison de la taille réduite, de la porosité et de la forte hétérogénéité de nos échantillons. Les surfaces des échantillons ont été polies, la porosité des céramiques nécessite néanmoins l'utilisation d'un agent de contact pour créer une liaison matérielle avec le capteur (eau) et ne pas mesurer la conductivité de l'air. Il est possible que cet agent s'évapore ou pénètre les pores du matériau durant la durée de la mesure et pour cette raison la conductivité thermique mesurée, et renseignée dans le tableau, est comprise entre deux bornes. Pour améliorer la précision des résultats, les propriétés des bétons et des gravillons devraient être mesurés séparément si possible ou alors avec une méthode moyenne en utilisant plusieurs capteurs.

3.3.3. Aspects techniques de la mise en œuvre

Quatre vingt cinq thermocouples (62 de surfaces et 23 sur l'air) ont été reliés à un système d'acquisition[8] dérivé sur 3 multiplexeurs. Chaque multiplexeur a été équipé d'une sonde platine pour évaluer la température de référence des jonctions des thermocouples type K. L'ensemble a été étalonné dans un bain thermostaté à grande précision (±0.01°C). La centrale est installée dans l'une des cuves non instrumentée dans un boitier étanche. Les cuves ont été

[8] Modèle CR1000 de marque Campbell Scientific

imperméabilisées par deux sous-couches de peinture hydropliolithe®[9] avant d'être percées et lapidés pour permettre l'installation des thermocouples. Les câbles de thermocouples sont acheminés vers leur emplacement de mesure dans des gaines protectrices sous-terraines. Les thermocouples de surfaces ont été disposés parallèlement à la surface des cuves après une entrée par l'intérieur puis recouvert d'une fine couche de béton à prise rapide poncée après séchage pour gommer les aspérités (Figure 71).

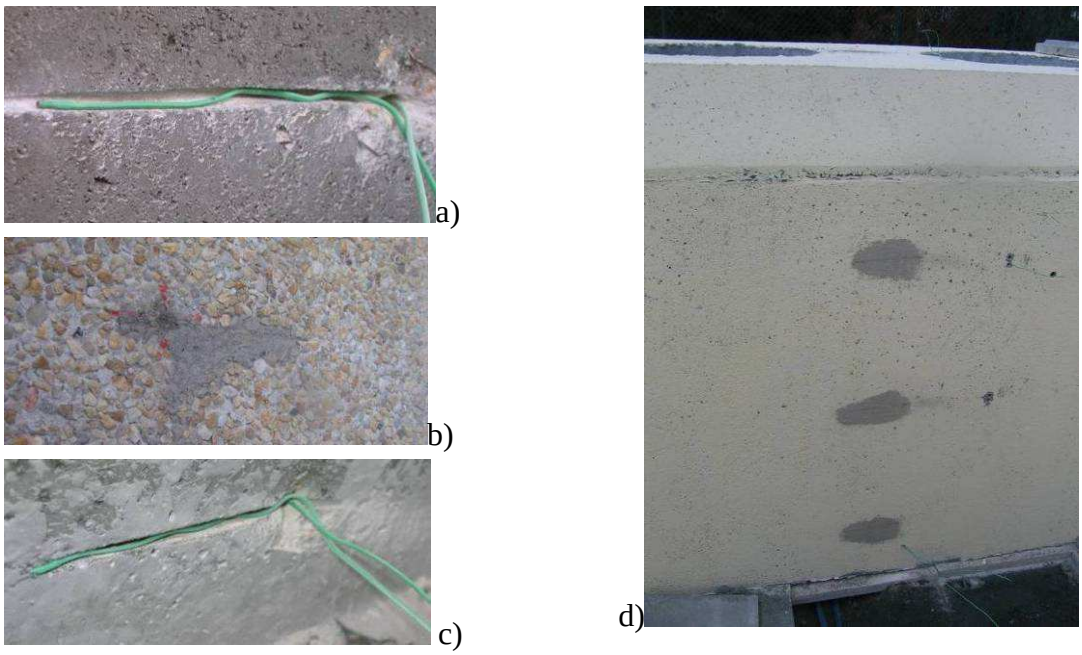


Figure 71: a) et c) Capteurs installés de manière à ce que leur extrémité effleure la surface des cuves b) et d) résultat final pour l'extérieur : chaussée et façade

Les câbles de protections ont également servis au cheminement des fils des 12 fluxmètres GLO[10]. Une fois l'ensemble des capteurs placé, une 3ème sous-couche de peinture gris clair a été apposée. Les dalles inter-rues ont été remises en place avant d'appliquer l'ultime couche de peinture marron[11] « Standard » (Figure 72).

---

[9] Liants en dispersion de résine dans une phase aqueuse, meilleure tenue au support

[10] De marque Captec

[11] De marque Castorama, (Teinte façade 80.8041.1) à laquelle ont a ajouté 180ml de colorant noir et 10ml de rouge pour s'approcher au maximum de notre teinte marron cool imposée

Figure 72 : 4 rues canyons peintes

Ensuite des protections radiatives ont été installées pour protéger les thermocouples extérieurs sur l'air. Comme le montre la figure 73, ils sont constitués de deux tubes concentriques en aluminium recouverts d'une peinture chromée à haute réflectivité CLO et basse émissivité GLO (ρ = 0.95, ε = 0.38). Les tubes sont légèrement inclinés au nord pour empêcher l'éclairement solaire direct.

a)

b)

Figure 73: tube basse émissivité de protection pour thermocouples air

La température des fluxmètres GLO étant approximée par le thermocouple de surface le plus proche, ceux-ci ont été fixés par de la graisse thermique qui implique un bon contact thermique (Figure 74b).

a) b)

Figure 74: a) Anémomètre sonique 2D et b) Capteur de flux GLO

Les données enregistrées par nos capteurs sont directement affichées sur les ordinateurs du laboratoire via une connexion Ethernet. Par la suite, un anémomètre sonique 2D[12] a été implanté sur la toiture du bâtiment central pour mesurer la vitesse et direction du vent local au dessus de la canopée urbaine de notre modèle réduit. Au final nous enregistrons 3 tables de données :

- Une table réunissant 85 températures et 11 flux net GLO toutes les 10 minutes
- Une table des données de vitesses et directions du vent ponctuelles toutes les 30 secondes
- Et une table de vitesses et directions du vent moyennées toutes les 10 minutes

Le 14 juillet 2009, la peinture marron cool est appliquée (façade est du bâtiment B et bâtiment C, cf. photographie figure 75).

[12] De marque Gill, modèle Windsonic

Figure 75: Banc d'essai avec les 3 configurations de peintures aux surfaces des rues canyons

Après séchage sur leur support, on s'aperçoit que l'aspect des deux peintures n'est pas équivalent dans le domaine des longueurs d'ondes visibles ce qui était confirmé par l'analyse spectrophotométrique. De plus, le vieillissement et l'exposition aux intempéries ont entraîné l'éclaircissement de la peinture standard, probablement de part une mauvaise formulation chimique. Au final, l'aspect plus sombre du produit cool se traduit par une absorptivité solaire plus élevée dans le spectre visible qui contient 50% de l'énergie thermique incidente. On verra par la suite que la performance liée à l'utilisation de la peinture cool d'un point de vue des températures de surface atteintes n'a pas été aussi nette que l'on pouvait espérer ce qui est sans doute dû à une différence d'albédo effectif entre les deux peintures plus faible que ce que stipule l'étude spectrophotométrique.

3.3.4. Capteurs de température

Le matériel de mesure est constitué de 62 thermocouples de surfaces disposés selon une coupe transversale de l'ensemble des rues (Figure 76). Seule la cuve centrale de chaque bâtiment est équipée. Les cuves sont des parallélépipèdes recouverts d'un couvercle pyramidal, nous avons considéré ces 25 centimètres du haut des cuves comme la toiture d'un bâtiment réel un seul thermocouple est placé au centre de la face horizontale. La partie verticale restante que l'on a appelé façade et a été virtuellement découpée en 3 facettes de 33 cm et un thermocouple a été positionné au centre de chacune de ces facettes. Ces 7 thermocouples par bâtiment ont été doublés en face intérieure de la cuve afin de pouvoir estimer le terme de conduction à travers les 4-5 cm de paroi. Un thermocouple a également été disposé sur le fond de la cuve, la mesure effectuée par celui-ci sera désignée comme température des fondations. Sur le même axe,

2 thermocouples ont été disposés à 30 cm des façades en surfaces de la chaussée et sous les dalles de la plateforme à l'interface avec le sable meuble.

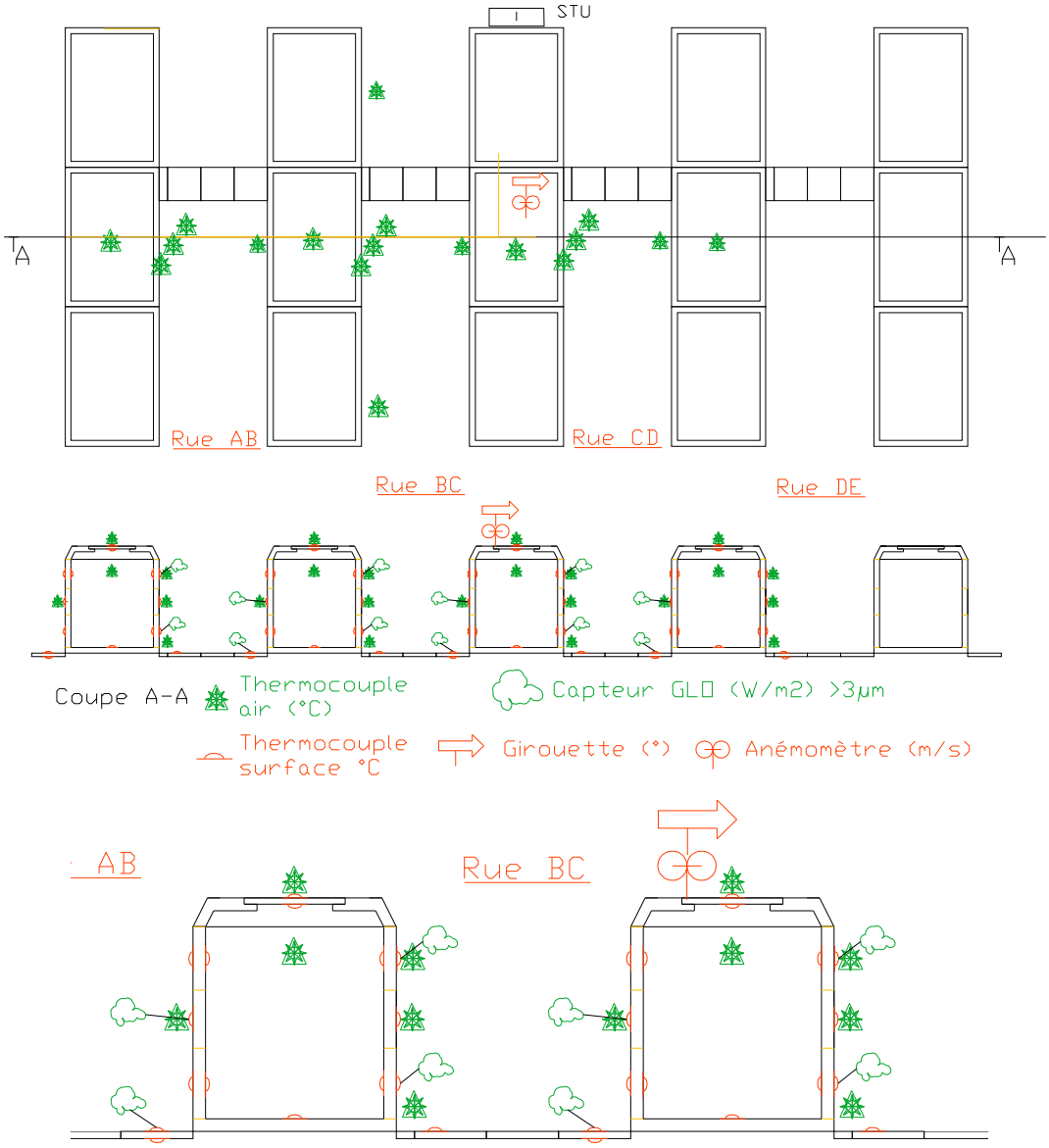


Figure 76 : Schéma des emplacements des thermocouples, capteurs de flux GLO et de l'anémomètre sonique

Vingt trois thermocouples sont également disposés pour mesurer la température de l'air en diverses positions de la scène urbaine. Ceux placés à l'extérieur sont protégés par des barrières radiatives faites de 2 tubes concentriques peints en aluminium chromé. Trois thermocouples ont été fixés le long de la façade Est à environ 5 cm de la façade et des thermocouples de surfaces disposés, 10cm en retrait vers le nord afin d'éviter toute ombre portée sur le thermocou-

ple de surface. La façade ouest a été équipée d'un seul thermocouple sur l'air au niveau de la facette centrale, ainsi qu'un au dessus de chaque toiture. La température de l'air à l'intérieur de chaque bâtiment est mesurée par un thermocouple placé à mi-hauteur de chaque bâtiment. La rue BC est également équipée de thermocouples sur l'air aux extrémités de la rue, abrités par la façade est. La calibration des thermocouples laisse augurer une précision de ± 0,25 °C, mais le positionnement final des thermocouples de surfaces sous le ciment qui les recouvrent et la disposition dans les protections radiatives des thermocouples sur l'air pourraient accentuer l'erreur de mesure. Une comparaison avec une mesure par caméra radiative infrarouge devra être réalisée par la suite pour vérifier l'erreur faite sur la température finale.

3.3.5. Mesures des échanges radiatifs

Les flux radiatifs horizontaux incidents CLO et GLO sont mesurés grâce au radiomètre disposé en toiture d'un bâtiment de l'université voisin (cf. §2.4). Le fichier météorologique des hauteurs pluviométriques d'une station alentour nous permet de faire la ségrégation des périodes d'évaporation. Douze capteurs de flux radiatif de dimension 50 x 50 mm² permettent la mesure du rayonnement net GLO. L'association de ces capteurs avec une mesure de température de surface proche permet de déduire les valeurs des flux GLO émis et incident au capteur. La composante CG3 du radiomètre mesure les échanges radiatifs GLO incidents en toiture, enfin les fluxmètres GLO (Figure 77) sont répartis dans les canyons AB, BC et CD.

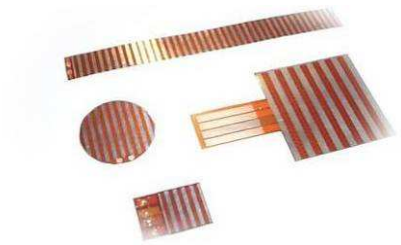


Figure 77: Capteurs plats de flux radiatif GLO développés par l'entreprise CAPTEC

Nous avons choisi de placer les capteurs en facette haute du mur est, en facette basse, au sol en marge de la façade ouest et sur la facette du milieu de notre façade ouest et ce pour les 3 rues. La combinaison du flux conduit à travers la paroi en un point (association de thermocouples intérieur /extérieur), du flux GLO net et de la température de l'air à l'approche du mur (thermocouple dans leur protection radiante) pendant les périodes nocturnes nous permet

de fermer le bilan thermique et de déduire le flux de convection surfacique et le coefficient associé.Le fonctionnement du capteur est basé sur la mesure des flux de chaleur échangés entre ses éléments parallèles disposant chacun d'une réflectivité connue dans les CLO et GLO. Le contact thermique au dos du capteur est primordial puisque la température du cuivre est équivalente à celle des éléments absorbants dans les GLO.

3.3.6. Mesure des caractéristiques du vent

Les caractéristiques de direction et de vitesse des vents régionaux, que l'on mesure en toiture d'un bâtiment proche de la plateforme, à environ 16 m au dessus du sol ne peuvent être directement utilisées pour définir l'écoulement sur la plateforme. La figure 78 présente la comparaison de l'évolution des caractéristiques du vent régional et de celui au dessus de notre plateforme, mesuré au niveau de la canopée urbaine à l'échelle réduite puisque l'anémomètre sonique 2D est situé à 28 cm au dessus de la toiture du bâtiment central. La période étudiée pour réaliser ces roses de vents va du 14 juillet au 15 octobre 2009.

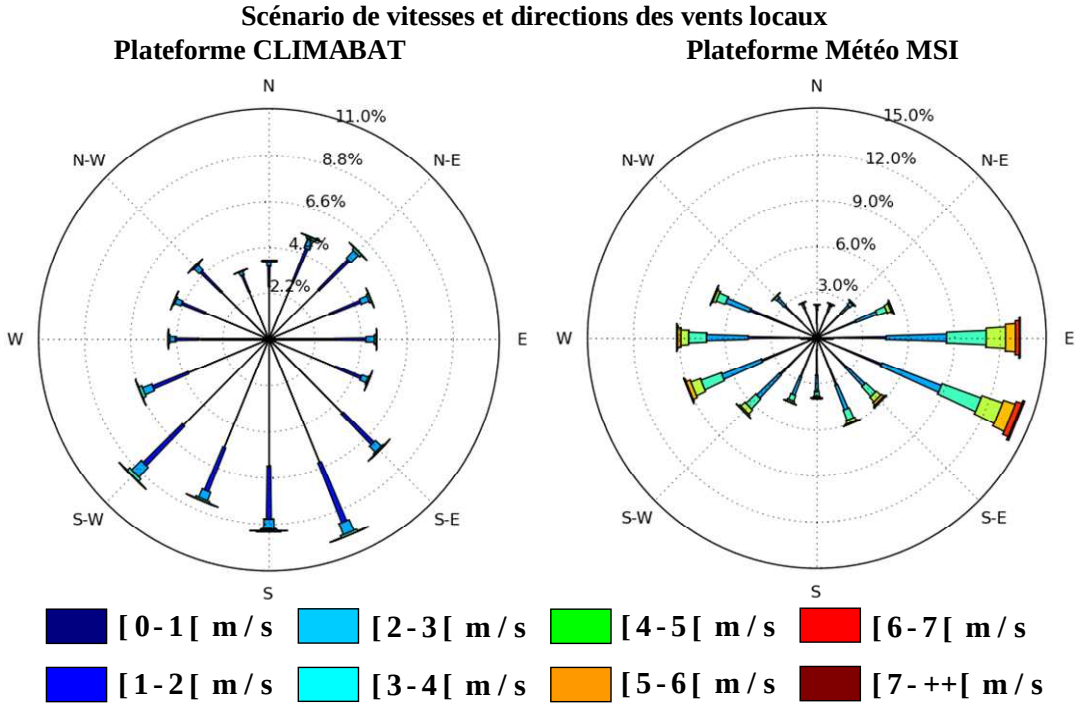


Figure 78 : Tendance des directions et vitesses des vents locaux au dessus de la toiture de la maquette centrale de la plateforme ClimaBat et sur la toiture d'un bâtiment universitaire

On remarque que le vent météorologique (~1,8 m au dessus de la toiture d'un bâtiment de l'université culminant à environ 16m) atteint s'élève au dessus 7 m/s avec une forte tendance au vent d'Est pendant ces 3 mois est totalement différente de la mesure au sol au dessus de la toiture de nos modèles réduits (~30 cm au dessus de la toiture de la maquette centrale). L'environnement immédiat de notre plateforme constitué par une haie d'arbres haut d'une dizaine de mètres à l'ouest, de deux bâtiments préfabriqués à l'est et au nord ainsi que de bâtiments élevés dans une périphérie plus lointaine protège notre dispositif du vent et perturbe totalement l'écoulement engendrant de nombreuses turbulences et une direction oscillant entre sud sud-ouest et est sud-est. La vitesse du vent au dessus de la plateforme dépasse rarement les 4 m/s en raison de la rugosité de surface et des obstacles écrans. Cette direction moyenne du vent dominant atténuera certainement l'effet de confinement attendu car le vent balaye l'intérieur des rues.

3.3.7. Perspectives de développement du banc

Le traitement des résultats obtenus à la suite des premières campagnes de mesures a fait apparaître la possibilité d'ajouter un certain nombre d'amélioration à la plateforme pour affiner les comparaisons. Par exemple, le rajout d'un masque proche de hauteur identique aux cuves faisant face à la façade orientée ouest du bâtiment A donnerait toute sa spécificité à la rue témoin pour comparer des surfaces ayant des temps d'ensoleillement égaux.

D'autres opérations pourraient améliorer le processus expérimental pour une meilleure comparaison des différentes configurations.

- Déplacer les capteurs de flux solaire et atmosphérique sur la plateforme ainsi qu'un capteur de température / humidité de l'air sous abris
- Amélioration du contact des capteurs de flux GLO
- Comparaison du flux en toiture avec les données du pyrgéomètre
- En perspective une étude des vitesses d'air dans le canyon

Si les températures intérieures sont mesurées pour chaque cuve centrale aux rangées de bâtiments, nous n'avons aucun renseignement quant à l'humidité de l'air dans la cuve et donc à la condensation dans le cas de phénomène de parois froides. Ce problème pourrait être résolu dans le futur par l'installation de ventilateurs d'extraction sur les façades Nord et sud (bouchons de surplus des cuves). Les trois cuves sont actuellement reliées par leurs bouchons de

surplus respectifs et la conception d'une ventilation traversante pourrait aider également à conserver des conditions de températures intérieures réalistes.

3.4. Identification de l'effet canyon

La campagne de mesure peut s'identifier en deux phases distinctes, une phase destinée à l'identification des performances thermiques et du microclimat lié à la forme géométrique de la scène urbaine (effet « canyon). Alors que la seconde phase fait état des performances liées à la configuration radiative des surfaces à l'intérieur du canyon. L'accent étant mis en particulier sur l'utilisation de peintures cool pour rafraîchir l'environnement et la température ambiante des bâtiments. La première phase d'identification des conditions thermiques créées par la géométrie a été menée du 15 avril au 14 juillet 2009, où les bâtiments étaient tous peints avec une couleur uniforme (marron standard). Durant cette période, la caractérisation des effets thermiques est uniquement analysée à partir du traitement des températures d'air et de surface mesurées. Dans un premier temps on remarquera la liaison évidente de la température de surface est du flux CLO reçu aux surfaces.

3.4.1. Températures diurnes et flux solaires simulés

La connaissance de l'évolution du flux solaire absorbé avec SOLENE, nous permet d'établir une comparaison avec les températures de surfaces mesurées sur une journée type. D'après le calcul du flux CLO par l'ensemble des facettes de chaque bâtiment, à cause des masques lointains, chaque bâtiment ne reçoit pas les mêmes apports solaires. L'énergie solaire journalière moyenne absorbée pour le mois de juin, a été estimée à :

- 4,36 kWh/(m².jour) pour le bâtiment A,
- 3,99 kWh/(m².jour) pour le bâtiment B,
- 4,02 kWh/(m².jour) pour le bâtiment C et
- 4,05 kWh/(m².jour) pour le bâtiment D.

Cette différence d'énergie absorbée est exprimée par facette dans la figure 79. Les bâtiments d'intérêt qui sont instrumentés sur la scène sont les 3 premiers.

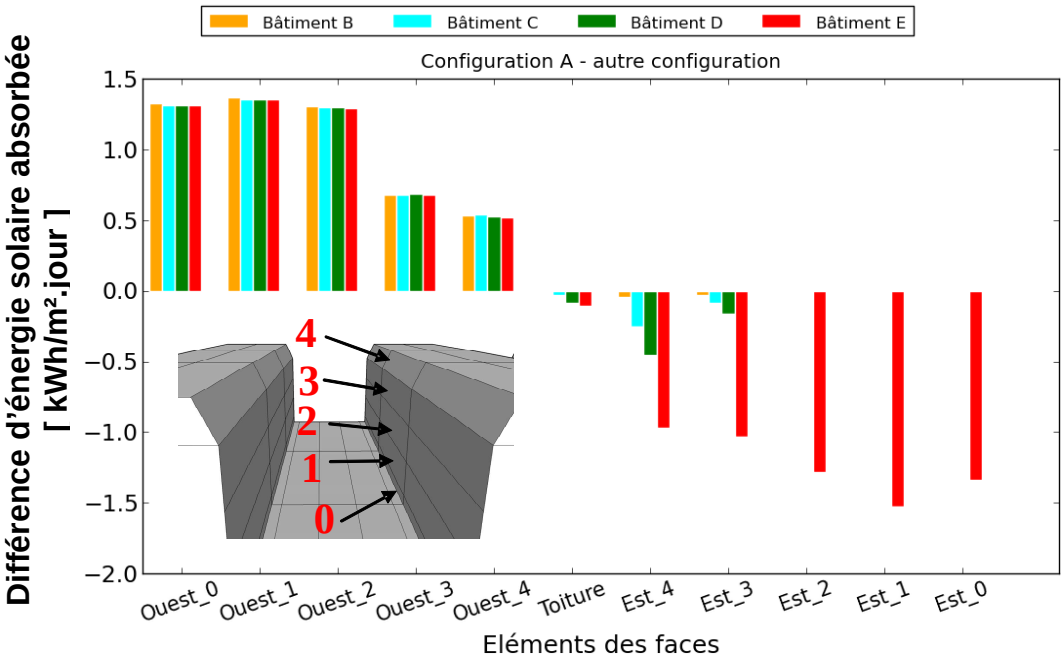


Figure 79 : Différence d'énergie solaire journalière absorbée entre les facettes constituant le bâtiment A et les autres bâtiments lors du mois de juin 2009

Les 4 facettes de la façade ouest des bâtiments comparés absorbent moins le flux solaire incident que celle du bâtiment A, et plus particulièrement les facettes les plus basses. La toiture et le haut de la façade A orienté à l'est absorbent légèrement plus d'énergie solaire que les 3 autres bâtiments.

La figure 80 illustre la variation des températures de surface en haut des deux façades des rues canyons AB, BC et CD, au niveau de la facette haute. On remarque que les températures des facettes orientées à l'*Est* :

- s'élèvent en même temps pour tous les bâtiments
- De 11h à 16h, celles des bâtiments A et B sont 1°C moins élevées que pour le C
- À 17h, lorsque l'ensoleillement passe sur la façade ouest, celle du bâtiment A s'élève et atteint la même température que celle du bâtiment C vers 20h, laissant celle du bâtiment B 1°C plus frais.
- Les facettes des 3 bâtiments retrouvent la même température vers 3h

Pour la température des facettes orientées à l'*ouest* :

- S'élève de 8h à 14h, sous l'effet d'un ensoleillement diffus
- à 13h celles des bâtiments C et D sont déjà supérieures d'1°C à celle du bâtiment B
- de 14h à 20h sous l'effet de l'ensoleillement direct, elles atteignent un pic où celles des bâtiments C et D sont 2 à 4°C plus élevées
- à 20h, les facettes des 3 bâtiments retrouvent la même température,
- pendant la nuit, celle de B reste environ 0,5°C plus chaude que les autres

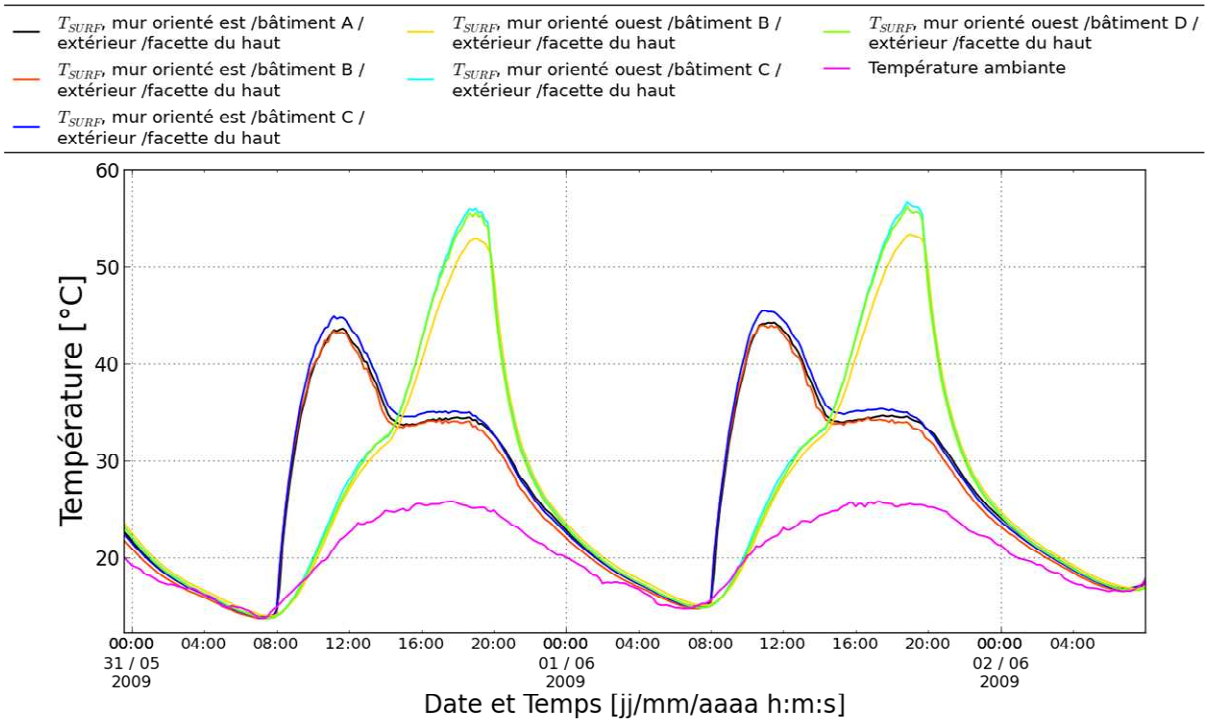


Figure 80 : Évolution des températures de surface des facettes du hauts des façades est et ouest des 3 rues canyons observées, début juin 2009

Pour la façade A et B, la montée en température au coucher du soleil est relative à la façade orientée à l'ouest du bâtiment A sans masque lointain immédiat. L'énergie absorbée par le bâtiment A par sa façade ouest est redistribuée à sa façade est.

La figure 81 présente l'évolution journalière des températures de surface des 6 facettes verticales constituant les deux façades de la première rue canyon (AB). La différence de température diurne entre l'air (repéré « température ambiante » sur le graphique) et les surfaces verticales de la scène urbaine fluctue entre 10 et 30°C pendant notre période de mesure. En revan-

che, la différence de température en fin de nuit est pratiquement nulle pour les facettes hautes est proches de 2°C pour les surfaces situées en bas du canyon pour les jours de ciel clair.

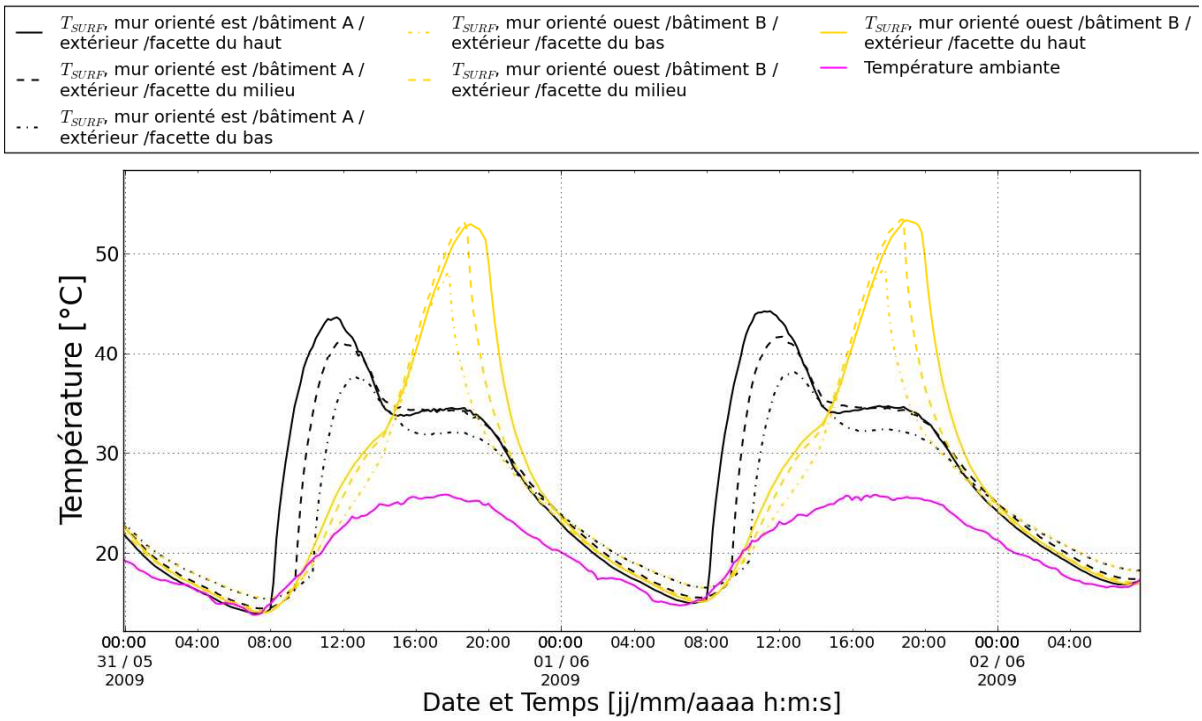


Figure 81 : Évolution des températures de surface mesurées pour les façades de la rue AB

On remarque que pour la façade est :

- Lors de l'ensoleillement direct, la facette haute atteint une température maximum 2-3°C plus chaude que la centrale et 6-7°C que la basse
- Lors de la période d'ensoleillement diffus, les facettes haute et centrale ont une température équivalente, soit 2-3°C plus chaude que la facette basse
- Entre 21h et 22h, l'ordre des températures s'inversent progressivement et à 8h00, les facettes basses sont 0,5-1°C plus chaudes que les centrales et 1-2°C plus chaudes que les hautes

Les conditions thermiques de la scène urbaine pendant la journée sont majoritairement influencées par les ombres portées par les masques lointains et par les masques proches de la géométrie canyon. Pour la période nocturne l'évolution des champs thermiques est guidée par les conditions en fin de journée et par le facteur de vue du ciel des facettes concernées créant un effet de confinement thermique.

Les mesures mises en forme pour les températures de surfaces et d'air de la notre scène réduite sont présentées dans les paragraphes suivants afin de déterminer l'effet de la position des facettes sur le profil de température des rues.

3.4.2. Différence de températures selon la position des surfaces dans la maquette

L'évolution diurne de la température de surface pour la rue AB et la rue BC pendant la période de calibration est illustrée par la figure 82, les boîtes représentent le quartile inférieur et supérieur des données nettoyées des périodes de pluie et de condensation. Les moustaches de part et d'autres de la boîte montrent l'étendue de la variation de la température des facettes durant la période observée. La ligne centrale à la boite représente la valeur médiane qui est reportée en chiffres au dessus des illustrations et l'étoile dans les boîtes marquent la valeur moyenne du jeu de données traité.

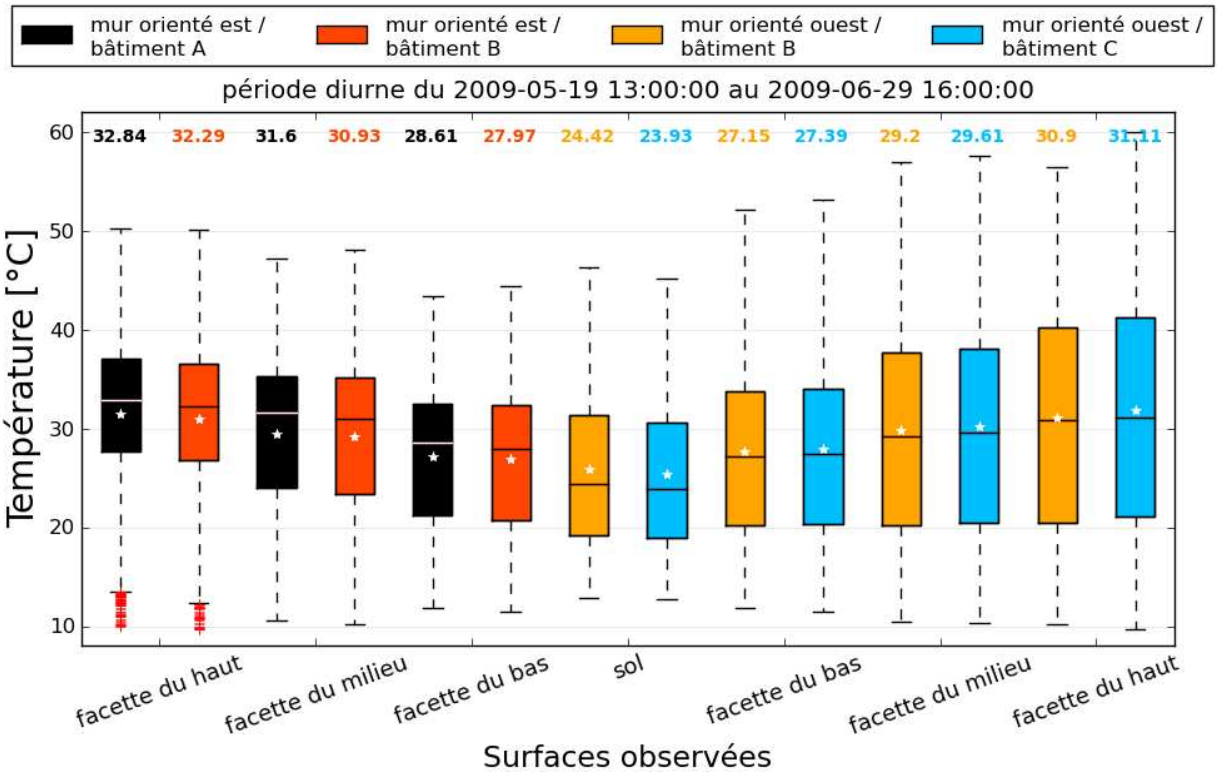


Figure 82 : Comparaison de l'évolution de la température de surface dans la rue AB et BC lors de la période diurne de la phase de calibration

La différence entre la rue AB et BC, pour la façade *est*, est peu explicite :

- il y a moins de 0,5°C d'écart entre les valeurs médianes des facettes hautes et basses pour les 2 rues (Tmoyenne$_{AB}$ supérieure)
- les valeurs maximales sont égales pour les facettes hautes et environ 1,0°C plus élevées pour les facettes moyennes et basses de la rue BC

La chaussée proche de la façade ouest des 2 rues ont des moyennes semblables (AB+0,5°C) et AB est plus élevée de 1,2°C pour la valeur maximale. Pour les facettes de la façade ouest :

- la température maximale est plus élevée pour la rue BC de 1°C pour la facette basse et jusqu'à 3,5°C pour la partie haute
- les températures moyennes et les valeurs médianes sont semblables (ΔTmoy(AB-BC) < - 0,6°C).

Donc la rue AB est plus chaude le matin (face Est) et plus fraîche dans l'après midi (face Ouest). Les différences de températures entre les rues BC et CD sont encore moins marquées. Le panel des températures de surface nocturnes des mêmes facettes est illustrée dans la figure 83 pour les rues BC et CD.

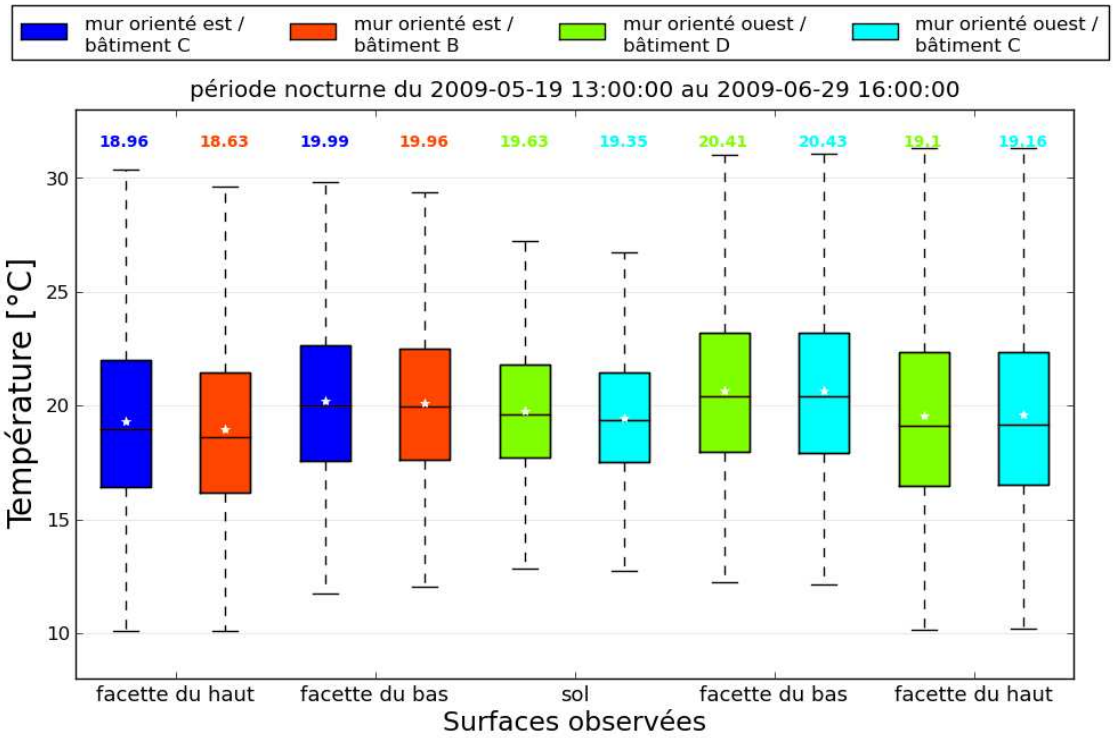


Figure 83 : Comparaison de l'évolution de la température de surface dans la rue AB et BC lors de la période nocturne de la phase de calibration

Il est intéressant de remarquer l'effet canyon durant la nuit, les facettes basses et la chaussée conservent des températures plus hautes que les facettes plus élevées des façades durant la nuit. Les températures minimales sont équivalentes. La figure 86 compare l'occurrence de la différence des températures de surface entre :

- La rue canyon BC et la rue témoin (AB) et
- La rue canyon CD et la rue témoin

Pour les 3 facettes de la façade *ouest* en fréquences cumulées pour les périodes diurne pendant la phase de « calibration ».

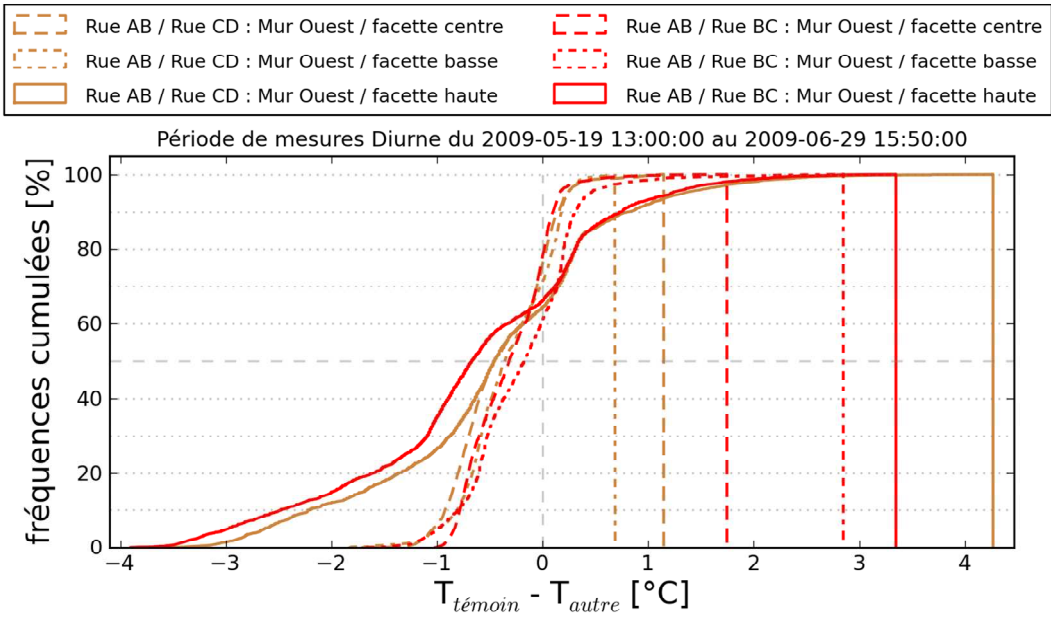


Figure 84 : Différence de température de surfaces des 3 facettes ouest constituant les parois verticales des canyons BC et CD avec le canyon AB sur la période diurne de calibration en fréquence cumulées

Pendant la période diurne, la température des surfaces en façade *ouest* pour les rues BC et CD comparée celles de la rue AB est, pour les facettes hautes :

- plus chaude de 0 à 3-3,5°C pendant 70% du temps
- plus fraîche de 0 à 2°C pendant 28% du temps et de 2 à 4,5°C pendant 2%

Pour les facettes centrales :

- plus chaude de 0 à 1°C pendant 70% du temps, et de 1-2°C pendant 5%
- plus fraîche de 0 à 0,5°C pendant 20% du temps et de 0,5 à 2°C pendant 5%

Pour les facettes basses :

- plus chaude de 0 à 1,5°C pendant 70% du temps
- plus fraîche de 0 à 1°C pendant 30% du temps pour CD
- plus fraîche de 0 à 1°C pendant 29% du temps pour BC
- plus fraîche de 1 à 3°C pendant 1% ce qui correspond une différence de montage du thermocouple (phénomène à 18h30 les après midis-ensoleillé)

C'est en partie haute de la façade que les rues BC et CD se différencient le plus (BC plus chaude ~0,5°C pendant la journée).

Les fréquences d'occurrence nocturnes sont cumulées en ordre inverse pour mettre en valeur la valeur minimale de température atteinte, repérée par le segment vertical jusqu'à l'axe des abscisses (Figure 85). On peut voir que la différence de températures nocturnes dans les canyons BC et CD par rapport à la rue témoin ont un comportement identiques.

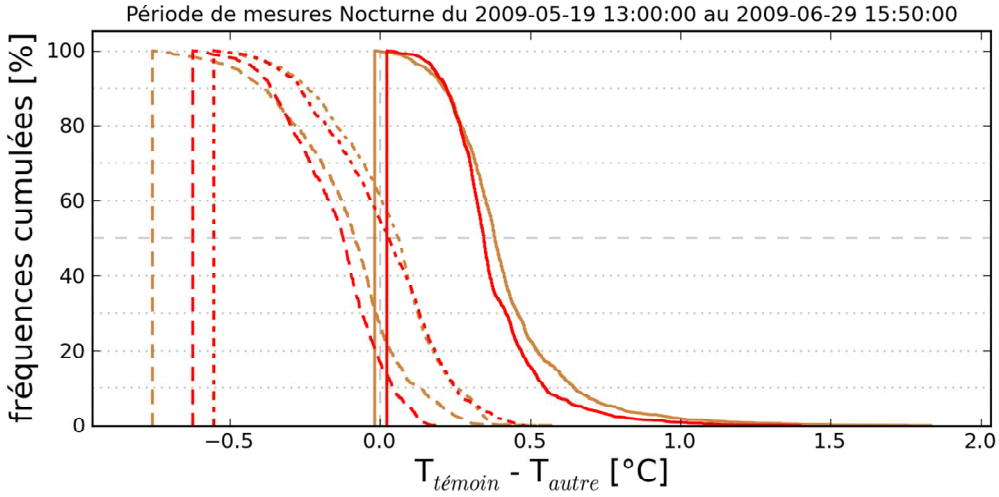


Figure 85 : Différence de température de surfaces des 3 facettes ouest constituant les parois verticales des canyons BC et CD avec le canyon AB sur la période nocturne de calibration en fréquence cumulées

Les facettes hautes présentent toujours 0 à 1,5°C de moins que la rue de référence, alors que les températures des facettes centrales sont majoritairement plus fortes (jusqu'à +0,7°C pour 80% du temps). La différence de température des facettes basses par rapport à la rue AB fluctue à 60/40% entre +0,5 et – 0,5°C. La température maximum atteinte par les façades *ouest*

s'élève à 60°C pour la rue BC, 59,6 pour la rue CD et 56,4°C pour la rue AB, pour les façades *est*, on recense 50,2°C pour la rue AB, 47,7°C pour la rue BC et 51°C pour la rue CD.

Le comportement diurne des facettes pour les façades *est* des rues BC et CD (Figure 86) est un peu plus différencié, la différence de température de surface moyenne avec la rue témoin (AB) pour la période de calibration (4527 mesures) :

- Une façade *est* BC plus fraîche de moins de 0,6°C en moyenne
- Une façade *est* CD quasiment identique en moyenne

.

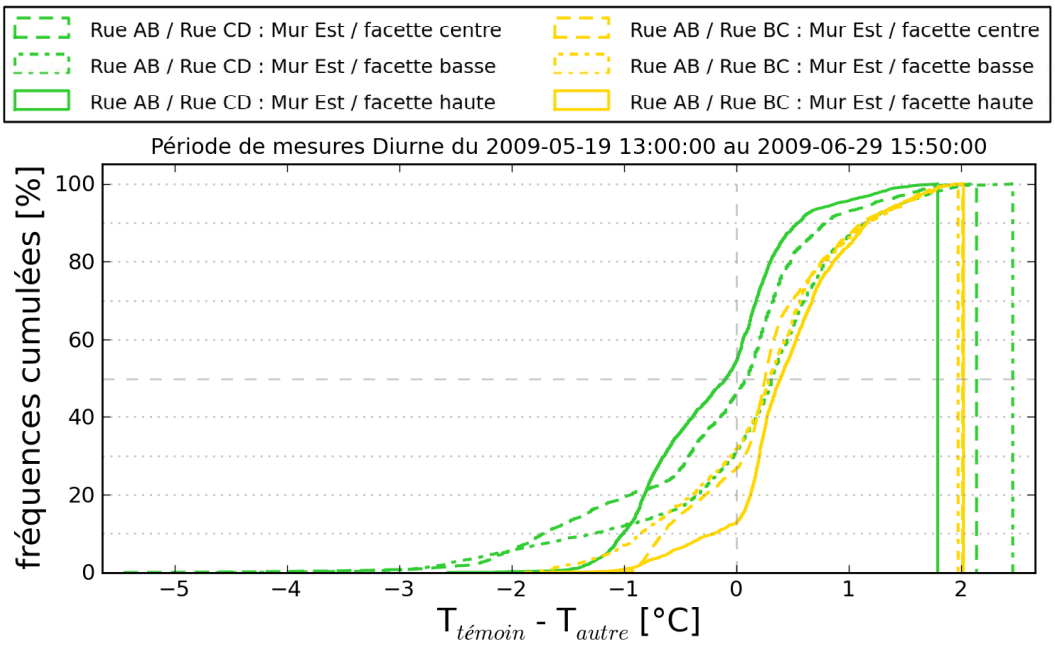


Figure 86 : Différence de température de surfaces des 3 facettes *est* constituant les parois verticales des rues BC et CD avec le canyon AB sur la période diurne en fréquences cumulées

Le détail par facette est donné dans le tableau suivant selon le pourcentage de mesures effectuées où la rue étudiée est plus ou moins chaude que la rue témoin, et les bornes de températures entre lesquelles la température de surface évolue :

Tableau 7 : Répartition des températures de surface des façades Est des rues BC et CD par rapport à AB pour 2 mois de mesures

	Rue BC (/témoin)		**Rue CD (/témoin)**		**Remarques**
Facette	Période + chaude	Période + froide	Période + chaude	Période + froide	Période + Chaude pour BC
Haute	55% / 0-2,2°C	45% / 0-1,8°C	27% / 0-1°C	73% / 0-2°C	-
Centrale	43% / 0-3°C	55% / 0-2,1°C	27% / 0-1°C	73% / 0-2°C	2% / 3 - 5,5°C (erreur montage)
basse	43% / 0-3°C	55% / 0-2,1°C	30% / 0-2°C	70% / 0-2°C	2% / 3 - 5°C (erreur montage)

Les températures de surface de la rue CD restent plus longtemps plus fraîches que celles des 2 autres rues. Les températures de la façade Est de la rue témoin (AB) sont plus élevées que celles des autres rues en fin d'après-midi. En effet, à ce moment là, la façade ouest du bâtiment A est la seule surface à ne pas profiter de l'ombre portée de la géométrie canyon, et entraîne une surchauffe de l'enveloppe par rapport aux autres bâtiments. Les périodes plus chaudes énoncées en remarques dans le tableau sont dues à un décalage de quelques centimètres du point de mesure du thermocouple d'une rue par rapport à l'autre. La différence de température entre BC et AB est forte à 9h30 (facette centrale) et à 10h30 (facette basse) à l'*est*.

Pendant la période nocturne, les différences enregistrées entre les trois canyons sont faibles, La température de surface des façades des rues BC et CD est constamment plus fraîche que celle de la rue témoin de 0 à 1,5°C. En moyenne, la température dans la rue BC est plus élevée de 0,5°C que pour la rue CD ce qui n'est pas significatif.

3.4.3. Influence sur les températures d'air de l'environnement bâti

Les températures de l'air circulant aux abords de la scène urbaine permettent d'apprécier l'effet de confinement « urbain » créé par l'environnement bâti. L'air circulant au dessus du bâtiment D présente la température la plus faible durant la nuit, on peut supposer que ce phénomène est uniquement dû à la mise en œuvre ou à l'étalonnage. Les températures d'air mesurées dans les tubes de protection sont relativement homogènes au dessus des toitures. La

figure 87 présente la densité de probabilité d'occurrence de la température d'air circulant au dessus des 4 toitures pour la période nocturne.

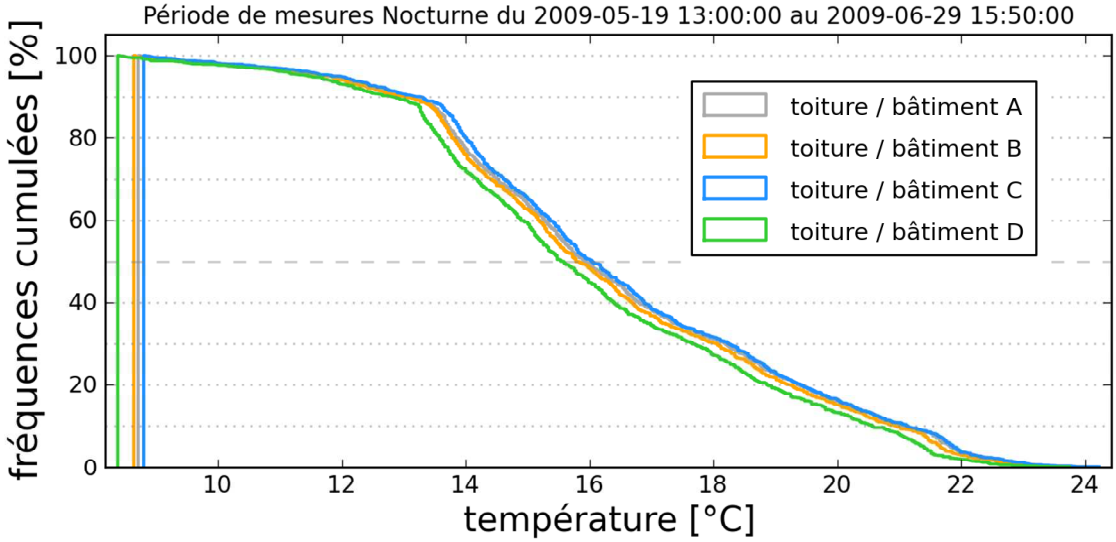


Figure 87 : Fréquences cumulées de température nocturne d'air en toiture des 4 bâtiments pendant 40 jours lors de la phase de calibration

La mise en œuvre des capteurs de température d'air sur la scène urbaine s'est avérée délicate. La différence de température nocturne mesurée entre les 4 capteurs est inférieure à 0.25°C. Celle-ci est faible et peut provenir du positionnement des thermocouples à l'intérieur de leurs tubes de protection radiative mais aussi à la configuration des rues par rapport aux écoulements d'air. La figure 88, quant à elle, montre cette occurrence de température en période diurne, à partir de 20°C les valeurs correspondantes à un même pourcentage d'occurrence pour les 4 températures d'air mesurées sont espacées de 2°C au maximum.

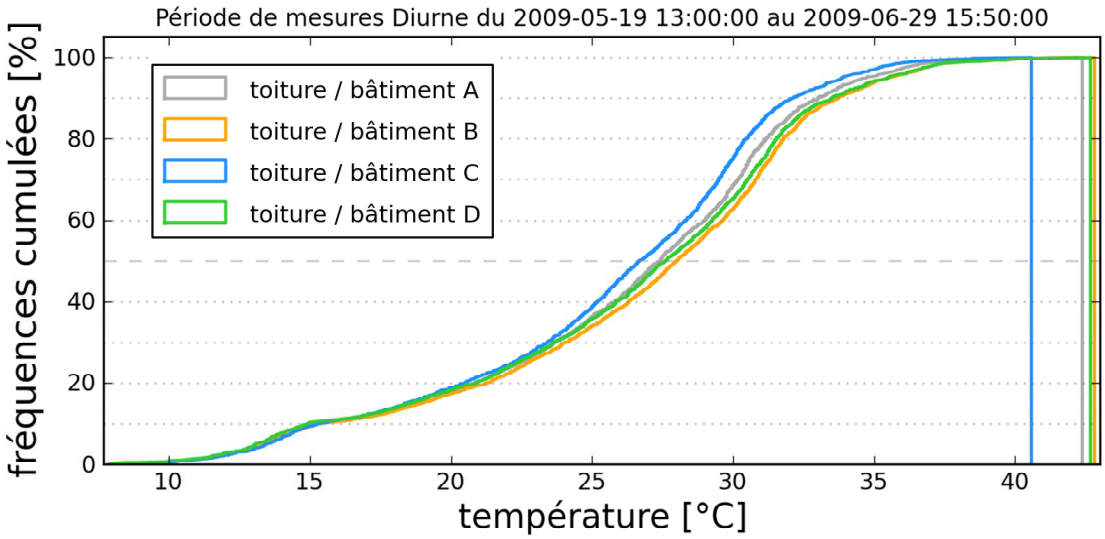


Figure 88 : Fréquences cumulées des températures d'air en toiture de 4 bâtiments pendant 40 jours lors de la période diurne de la phase de calibration

La moyenne des températures diurnes de l'air en toiture est pratiquement égale avec 25,2°C pour le bâtiment A, 25,7 pour le B, et 25,4°C pour le D en revanche le bâtiment C avec 24,8°C se situe 1°C en dessous des autres. Lors du jour le plus chaud, sa valeur maximale est 3,5°C plus faible que les autres. D'après la simulation solaire effectuée, les toitures C et D absorbent légèrement moins de calorie que les toitures A et B, néanmoins les différences des températures de surface mesurées en toiture n'expliquent pas cette différence (inférieures à 0,3°C). Ceci doit être dû à l'installation du thermocouple.

La figure 89 montre la différence de température d'air à l'intérieur des canyons, au centre des façades entre les canyons BC et CD par rapport à la rue témoin (AB) pour l'ensemble de la période diurne. Une observation préalable des valeurs prises par la température de l'air pour les 6 thermocouples situés à l'*est* et à l'*ouest* dans les trois rues montre une variation allant de 10 à 37,5°C et de 10 à 43°C respectivement. De plus la température d'air mesurée à l'*ouest* de la rue AB présente une valeur plus élevée de 0,5 à 3°C pendant toute la période. La valeur des températures étant particulièrement élevée, on peut supposer que les thermocouples sont situés dans la couche limite verticale.

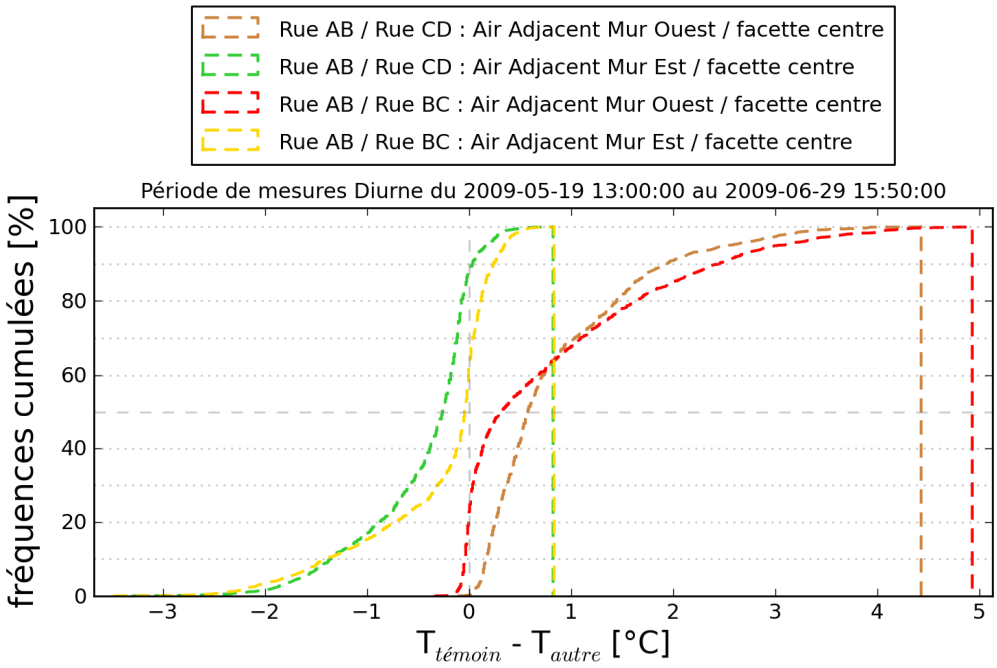


Figure 89: Comparaison des différences de température d'air à l'*est* et à l'*ouest* du canyon en milieu de façade entre les canyons BC et CD par rapport à la rue AB en fréquences cumulées

A la différence des résultats enregistrés au cours du suivi des températures de surfaces, l'air circulant à l'*est* des rues BC et CD est durablement plus chaud (60 et 90% du temps) que dans la rue témoin et ce jusqu'à 2,5°C pour sa valeur maximale. A l'*ouest*, on observe une température constamment plus fraiche par rapport à la rue témoin, allant jusqu'à 5°C de différence pour la rue BC et 4,4°C pour la rue CD. Les températures d'air aux abords des facettes plus basses mesurées sur la façade *est* sont quant à elles jusqu'à 2°C plus basses dans les canyons centraux que dans la rue témoin. La différence *est*/*ouest* s'explique par les températures de surfaces obtenues à l'*ouest* plus importantes qu'à l'*est* avec des différences maximales allant de 5 à 10°C (Figure 82). Ces remarques confirment que le bâti situé à l'est de la scène urbaine réduite est plus chaud le matin (BC et CD), alors que l'ouest atteint les maximums en fin d'après midi (rue AB).

Les mesures données par les trois thermocouples situés au niveau de la chaussée *est* dans l'axe nord/sud de la rue BC ont montré des températures très semblables, avec moins d'1°C plus faibles pour les extrémités. Cette différence est sans doute due au plus grand brassage d'air aux extrémités de la rue.

3.4.4. Températures d'air dans les bâtiments

Les températures de surface et de l'air sur la scène urbaine n'étant pas très différentes, les différences de température dans les bâtiments sont uniquement liées à la façade entièrement exposée de notre bâtiment témoin. La figure 90 présente la différence de température de l'air ambiant du bâtiment témoin (A) avec les bâtiments B, C et D pendant la période diurne de calibration en fréquences cumulées.

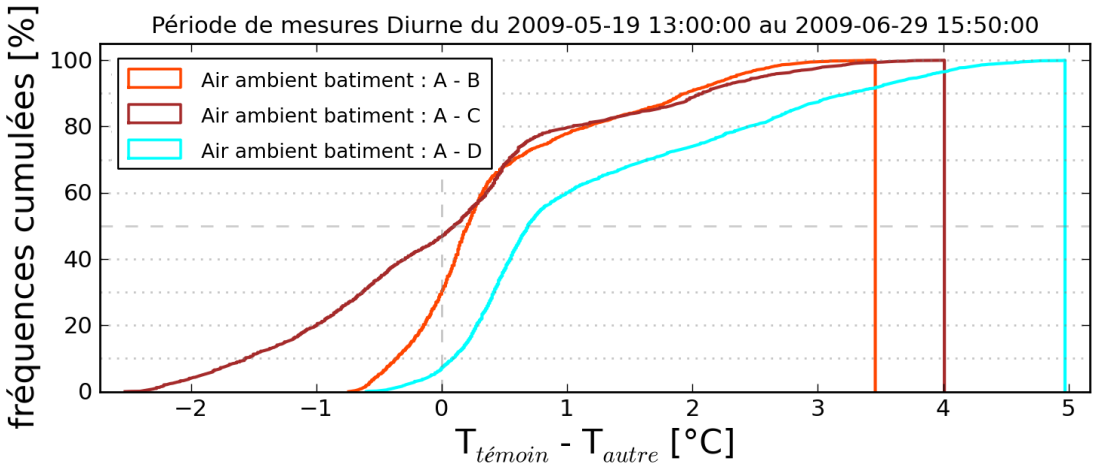


Figure 90 : Densité de probabilité diurne de l'occurrence de la différence de température d'air ambiant pour les bâtiments B, C et D par rapport au bâtiment A en fréquences cumulées

Les bâtiments B, C et D sont plus frais que le bâtiment témoin :

- pendant 70% du temps pour B et ce jusqu'à 3,5°C
- pendant 55% du temps pour C et ce jusqu'à 4°C
- pendant 93% du temps pour D et ce jusqu'à 5°C

Et plus chaud que le témoin :

- pendant 30% du temps pour B et ce jusqu'à 0,75°C
- pendant 45% du temps pour C et ce jusqu'à 2,5°C
- pendant 7% du temps pour D et ce jusqu'à 0,75°C

Les données ou B et C sont plus frais correspondent essentiellement à l'après midi, pendant la matinée, l'air ambiant de ces 2 bâtiments est un peu plus chaud que la rue témoin.

Pendant la période nocturne (1664 mesures), la température est constamment plus fraîche comme le montre le graphique ci-dessous. Le bâtiment B est plus chaud que le bâtiment A pendant 6% du temps. Et on observe jusqu'à 1°C de différence sur les températures minimales atteintes par l'air ambiant dans les bâtiments C et D par rapport aux deux autres.

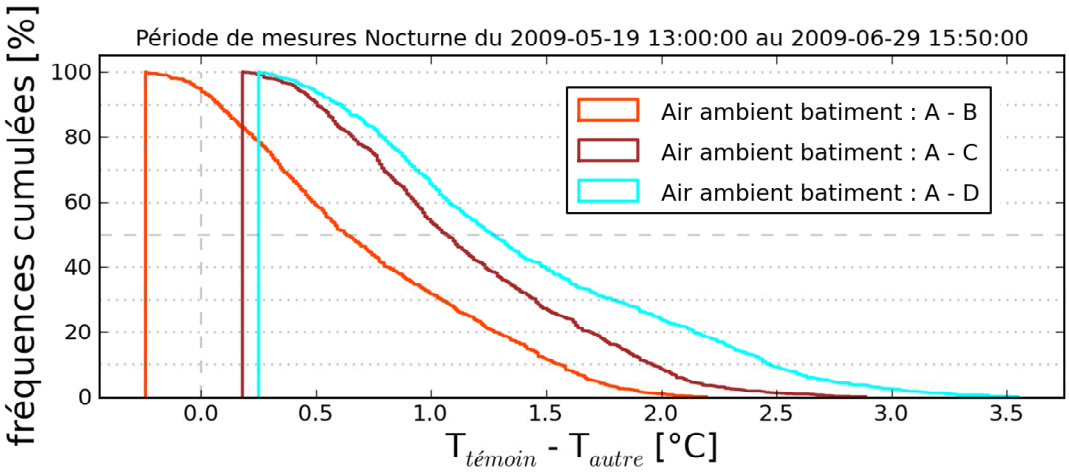


Figure 91 : Densité de probabilité nocturne de l'occurrence de la différence de température d'air ambiant pour les bâtiments B, C et D par rapport au bâtiment A en fréquences cumulées

L'écart de température entre les bâtiments C et D est en moyenne de moins de 0,25°C et atteint 0,75°C avec B. Le bâtiment A demeure le plus chaud pour l'ensemble de la nuit, jusqu'à ce que l'ensemble de la chaleur stockée dans le bâtiment soit rayonnée sous forme de grandes longueurs d'onde. En fin de nuit, le bâtiment B, qui en comparaison a un facteur de forme plus faible sur la façade ouest (masque proche) réduisant sa vitesse de refroidissement par échanges radiatif GLO, et qui a récupéré une part de l'énergie rayonnée par A, prend des températures légèrement plus élevées (10% de la période nocturne et jusqu'à ~0,25°C). Cependant cet écart en fin de nuit, se situe dans l'erreur absolue du thermocouple pour toutes les ambiances mesurées (±0,3°C).

On peut dire que la configuration entraine, jour comme nuit, une température ambiante dominante dans le bâtiment A par rapport aux autres bâtiments, se confortant ainsi à la prédiction établie par les simulations solaires. Les échanges entre les 4 bâtiments décrits sont complexes et les champs de températures sont essentiellement menés par la course solaire et l'exposition des façades par rapport à leurs masques lointains.

3.4.5. Analyse des transferts convectifs en toiture

L'analyse des coefficients de convection aux différentes surfaces de la scène réduite est possible par la fermeture du bilan énergétique grâce aux valeurs mesurées (cf. 2.5). Cette opération est possible pour les périodes diurnes et nocturnes pour les toitures en dehors des périodes où les masques lointains sont effectifs. La figure 92 présente la variation des flux conduits

et convectés à la surface des toitures A et B confrontés aux variations de températures de leurs surfaces, pendant 4 jours ensoleillés fin septembre 2009. Le terme lié à l'énergie conduite à la surface observée est calculé à partir d'un modèle de facteurs réponse qui sera décrit dans le chapitre 0 et avec les propriétés thermiques dynamiques indiquées. La convection est déduite en refermant le bilan thermique en surface de toiture, en utilisant le flux atmosphérique GLO mesuré au pyranomètre et le flux solaire CLO au pyranomètre comme flux incidents, et le terme calculé de conduction entre les deux températures de surfaces mesurées en toiture et au plafond des bâtiments.

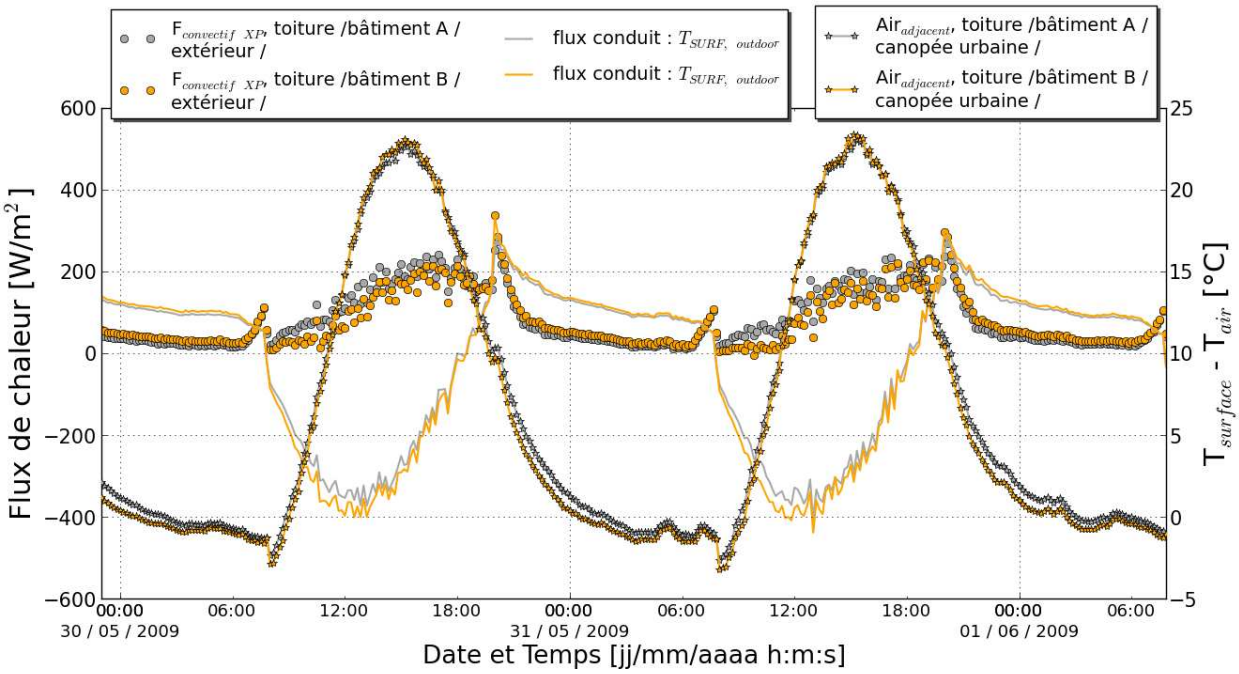


Figure 92 : Comparaison des flux conduits calculés et des flux convectés en toiture A et B ainsi que la différence de température entre la surface et l'air circulant au dessus

La différence de température entre l'air et les surface fluctue entre -3 et 24°C. On s'aperçoit que les températures de surface sont légèrement perturbées aux alentours de 19 heures à la suite de l'action d'une ombre portée, ce phénomène n'est pas vérifié en toiture C et D. Les représentations des flux convectés et conduits à la surface de la toiture sont perturbées entre 7 et 8 heures le matin puis entre 20 et 21 heures le soir lorsque la différence de température utilisée entre la surface et l'air est proche de 0. Le flux conduit vers l'intérieur durant la journée atteint des valeurs de 400W/m² alors que le flux perdu durant la nuit fluctue entre 100 et 200

W/m² pour les 2 bâtiments. En revanche pour cette période, le transfert de chaleur convectif se fait toujours de la surface vers l'air avec un pic en fin d'après-midi atteignant les 250W/m².

D'après la même méthode d'ajustement des points expérimentaux par minimisation d'une fonction linéaire utilisée pour les disques au paragraphe 2.5.1 nous avons ajusté les coefficients de convection surfacique des toitures de nos 4 bâtiments. L'équation bilan et ses coefficients à ajuster est la suivante :

$$(A.V_{vent} + B).(T_S - T_{air}) + C = \varepsilon.(E_{atm} - \sigma.T_S{}^4) + \varphi_{cond}$$ Équation 25

Avec *A* et *B* les coefficients d'une loi linéaire décrivant le coefficient de convection surfacique à la surface en fonction de la vitesse du vent mesurée 30 cm au dessus du bâtiment central. *C* est un coefficient de fermeture du bilan thermique qui nous permet d'estimer l'erreur faites dans le calcul. La figure 93 représente les résultats des ajustements pour les bilans réalisés aux 4 toitures de la scène urbaine, le coefficient B, qui n'a pas d'effet particulier sur le terme convectif lié au vent, a été arbitrairement fixé comme égal pour les lois régissant les 4 surfaces en supposant que celui-ci est plus lié à l'effet induit par la géométrie et l'horizontalité des surfaces observées.

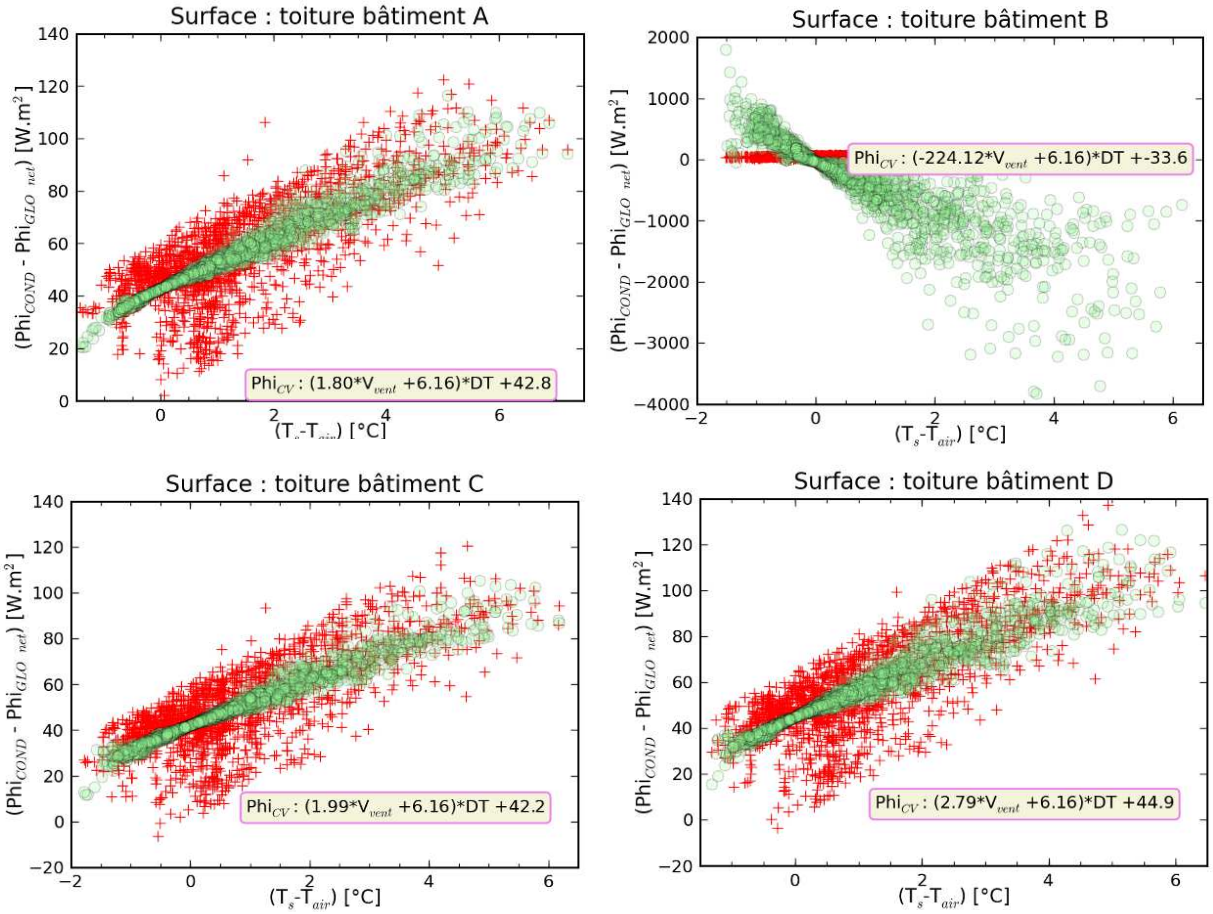


Figure 93 : Résultat d'ajustement de l'équation de bilan thermique aux toitures et du coefficient de convection par rapport à la vitesse de l'air en toiture pour une période d'hiver

Le terme de droite de l'équation bilan est affiché en ordonnées alors qu'en abscisses se retrouve la différence de température de référence. Les croix rouges indiquent les couples de points expérimentaux alors que les pois verts représentent les couples de points pour les valeurs ajustées. Dans cette configuration de calcul, le résultat pour la toiture B est totalement faussé alors que les autres toitures affichent des coefficients de lois linéaires plutôt cohérents mais une valeur de fermeture de bilan en W/m² assez importante (40 à 45W/m²). On remarque également que les valeurs expérimentales sont plus dispersées autour de la valeur ΔT proche de 0, entraînant une erreur sur l'ajustement (cf Chapitre 2). Dans le cas présent, les résultats montrent que l'on manque de précision sur l'un des termes, qui peut être le terme de stockage pas conduction, il faudrait alors affiner la valeur des coefficients de diffusivité thermique du béton constituant la toiture. Une source d'erreur supplémentaire pourrait provenir de la température d'air de référence utilisée, en effet la température d'air de référence utilisée dans les

équations de convection locale est supposée être mesurée dans l'écoulement non perturbé et hors de la couche limite thermique (ici ~10cm au dessus de la toiture.

3.5. Effet de la configuration des propriétés radiatives aux surfaces du canyon

La seconde phase d'identification concerne les conditions thermiques créées par la modification des propriétés radiatives en façade de nos rues canyons, c'est-à-dire l'utilisation d'une peinture cool et l'asymétrie. Cette phase a été menée du 15 juillet jusqu'au 12 novembre, les bâtiments étaient peints selon les 3 configurations définies précédemment en utilisant deux produits différents, un marron standard et un marron cool. Durant cette période, la caractérisation des effets thermiques est toujours analysée à partir du traitement des températures d'air et de surface mesurées, mais également grâce aux capteurs de flux radiatifs GLO lors de la période allant du 14 décembre au 14 janvier. Les valeurs de la réflectivité solaire et de l'émissivité GLO pour la peinture cool (ρ=0,38 et ε=0,88) et pour le produit standard ont été mesurés préalablement (ρ=0,15 et ε=0,89). Néanmoins, les peintures appliquées sur une base gris clair n'ont pas pris exactement les mêmes teintes dans le spectre visible, et le marron standard s'est même éclairci au cours du temps. Ces différences ne jouent pas en faveur de la peinture cool en termes de différence d'albédo.

3.5.1. Évolution des flux solaires journaliers absorbés

La réflectivité solaire plus élevée de la peinture cool est sensée diminuer le piégeage radiatif dans les canyons en comparaison avec ceux recouvert de son homologue standard, ce qui devrait réduire la température des surfaces traitées. Nous présentons l'évolution de l'éclairement solaire absorbé simulé avec SOLENE sur une journée type que nous confrontons au suivi expérimental des températures de surface mesurées au niveau des mêmes facettes. La figure ci-dessous illustre la variation de flux solaire absorbé par les deux façades de nos trois configurations de rues canyons, au niveau de la facette haute et centrale pendant l'été 2009.

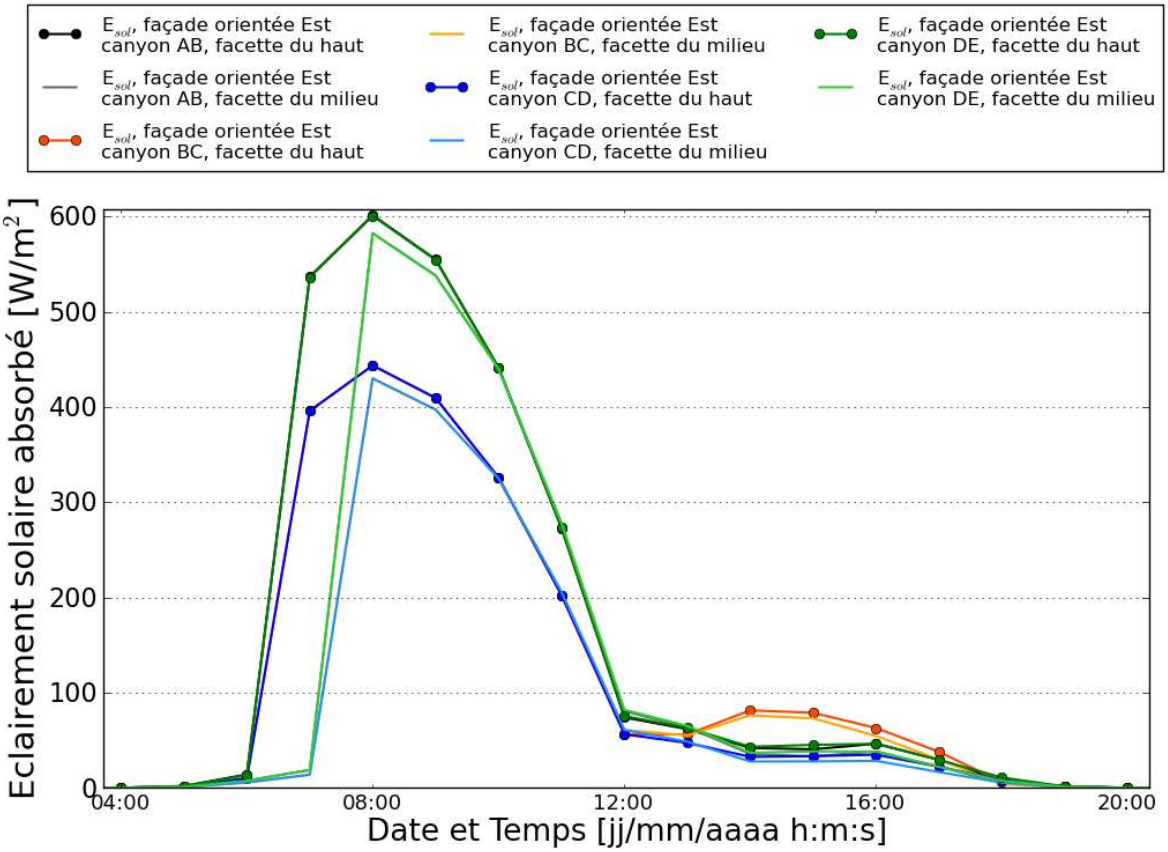


Figure 94 : Éclairement solaire absorbé par différentes facettes des façades Est des rues témoin, cool et asymétrique pour la journée du 15 aout 2009

Le graphique nous montre que les inter-réflexions ont peu d'influence sur les flux solaires absorbés lors de l'ensoleillement direct de la façade *est* (de 6h00 à 12h00), puisque les flux reçus par les façades *est* des rues cool (BC) et asymétrique (CD) sont exactement les mêmes. Ces deux là sont en revanche presque 30% plus faible que pour les façades peintes en marron standard (les façades de A et D sont elles aussi confondues. La différence est plus marquante pour la part absorbée du flux solaire diffus reçu après inter-réflexions pendant l'après midi, le canyon cool (BC) absorbe plus l'éclairement que la façade cool du canyon asymétrique. L'éclairement diffus absorbé par les canyons DE et AB, tous deux recouverts de la peinture standard, se situe entre les deux. Pour les façades ouest que la façade standard de la rue asymétrique absorbe environ 20% plus l'éclairement solaire que la rue configurée cool.

Après le 14 juillet, une fois la technologie cool appliquée sur la rue BC et la version asymétrique à la rue CD, on peut observer l'évolution temporelle des températures de surfaces pour les

façades des canyons sur 3 niveaux différents. La figure 95 montre ces évolutions pour la facette du haut des façades de nos trois rues pour une journée ensoleillée le 15 août 2009. La géométrie des bâtiments, l'orientation des rues et l'équivalence des propriétés thermiques des matériaux permettent de considérer la température de surface des différentes facettes comme un indice de la performance énergétique des peintures.

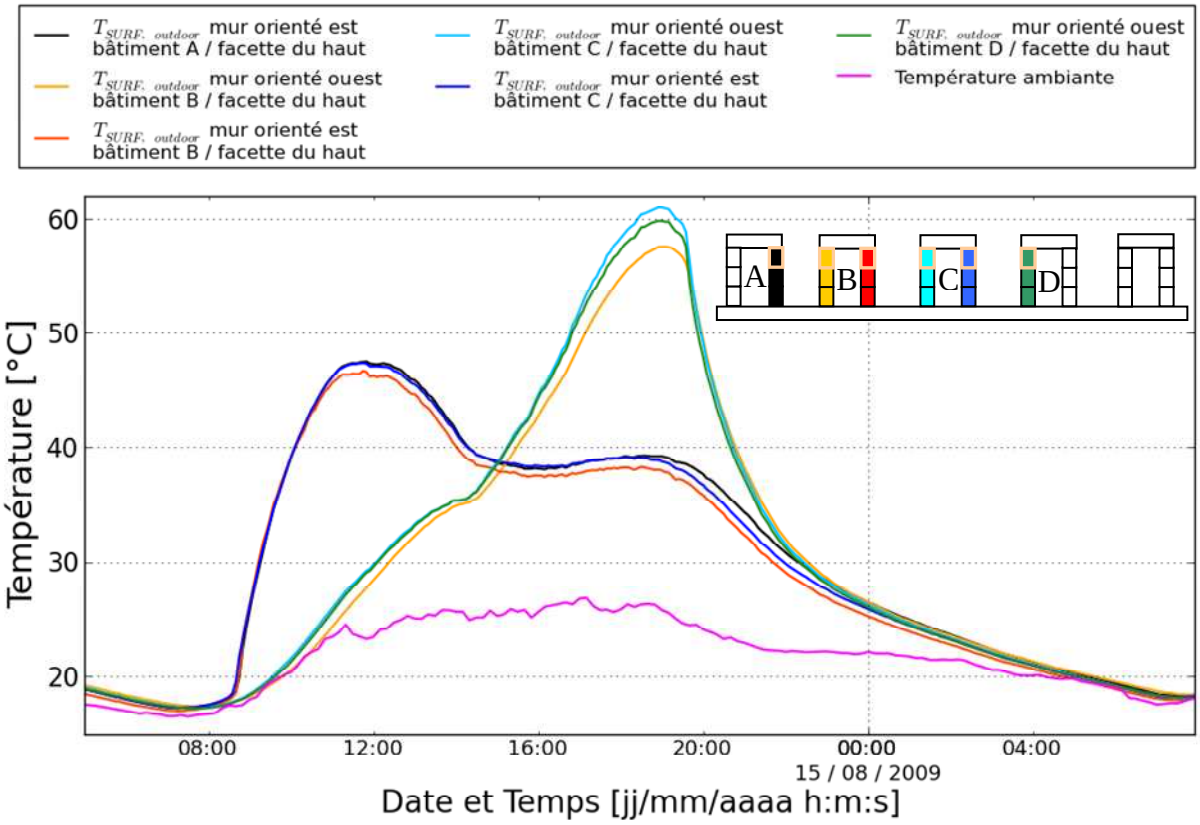


Figure 95 : Évolution des températures de surface des facettes du hauts des façades est et ouest des 3 rues canyons observées

L'effet du piégeage radiatif sur la température pour chaque façade des 3 types de canyon n'est pas aussi net que l'indique le calcul théorique de l'éclairement solaire absorbé calculé. Pour les températures des façades *est* :

- 11h, les façades est des rues témoin (AB), cool (BC) et asymétrique (CD) ont exactement la même évolution et amplitude
- A partir de 11h et jusqu'à 18h, la température de la façade est du bâtiment témoin (A) devient la plus haute (+/- 0,2°C) par rapport au bâtiment cool (C) et la température du bâtiment à l'enveloppe asymétrique (B) est plus fraîche d'1°C

- A 18h, l'ensoleillement est direct sur la façade ouest du bâtiment témoin (A) et diffus dans les canyons, la température de la façade est de A devient plus chaude d'1°C par rapport à C, qui lui-même reste à 1°C de D
- Vers 23h, les 3 températures est décroissent pour atteindre un même équilibre vers 7h00

Pour les façades *ouest* :

- du levé du soleil à jusqu'à 16h, les façades *ouest* du bâtiment standard soumis à l'asymétrie (D) et du bâtiment cool (C) ont exactement la même évolution et amplitude, celle du bâtiment d'enveloppe asymétrique (B) est plus fraîche d'1°C
- de 16h jusqu'au pic vers 19h, les températures des façades *ouest* divergent, le bâtiment C devient le plus chaud, puis1°C plus frais, le bâtiment standard D, puis le bâtiment à l'enveloppe asymétrique (B) est plus fraîche de 3-5°C
- vers 20h, les 3 facettes ont même température, mais le bâtiment B reste plus chaud pendant la nuit de 0,5°C

Par rapport aux mesures réalisées en juin, lorsque les maquettes étaient peintes d'un marron uniforme, les facettes hautes orientée *est* des rues BC et CD (teinte cool) se sont rafraîchies comparées à celle de la rue AB. A première vue, l'écart entre les températures des facettes hautes orientées à l'ouest par rapport à la configuration d'origine n'a pas évolué. Les performances de la peinture COOL ne semblent pas très déterminantes par rapport à ce que nous voulions réaliser mais ceci semble lié à l'éclaircissement de la teinte standard précité.

3.5.2. Modification des températures de surface

L'étendue de la variation de température des différentes surfaces constituant l'intérieur du canyon témoin et du canyon cool au cours de la période de mesure diurne (8785 données) sont présentées dans la figure 96. On remarque que malgré l'application du revêtement cool, l'effet escompté n'est pas flagrant, la température maximale est bien toujours par le haut de la façade *ouest* du canyon en configuration cool (+3,5°C par rapport à sa facette homologue dans la rue témoin).

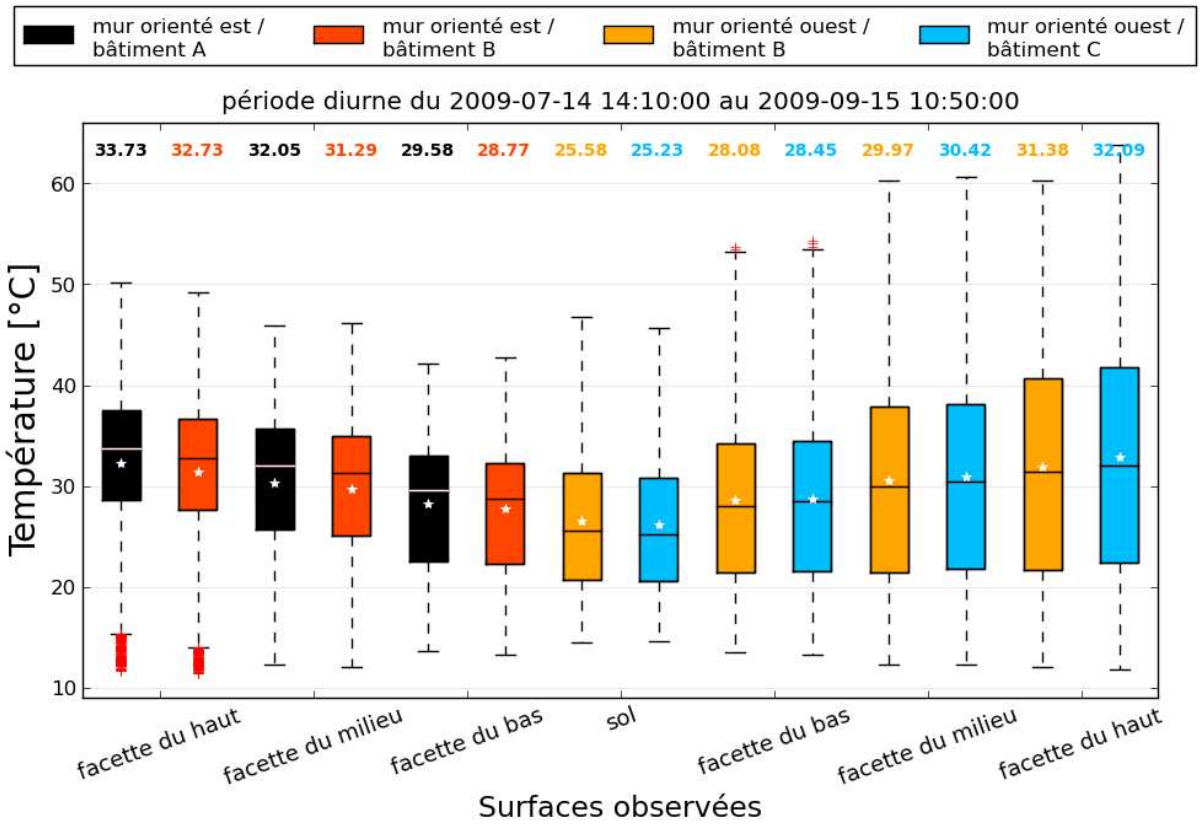


Figure 96 : Comparaison de l'évolution de la température de surface dans la rue AB et BC lors de la période diurne de la phase avec 3 configurations.

La différence des valeurs de température moyenne prise par les différentes facettes présente la facette *est* de la rue standard témoin comme de 0,7 à 1,0°C plus chaude en moyenne que dans la rue cool, alors que pour la façade *ouest* est de 0,3 à 0,6°C plus fraîche pour la rue standard. Par rapport à la phase de calibration, on voit que l'écart de haut en bas de la façade *est* a augmenté en faveur de la configuration cool (-0,3 à -0,5 sur la moyenne), alors que l'écart sur les façades ouest a augmenté en sa défaveur (+0,1 à +0,3 sur la moyenne). Néanmoins peut être que la faiblesse de ces variations est uniquement explicable par les variations des conditions météorologiques liées à la saison lors des 2 de phase de mesures.

La performance thermique des peintures sur les façades peut être évaluée en comparant la différence de température entre les surfaces de la rue témoin et les surfaces des rues cool et asymétrique. La figure ci-dessous représente les fréquences cumulées diurnes de ces différences pour les 3 facettes constituant la façade *est* durant 2 mois.

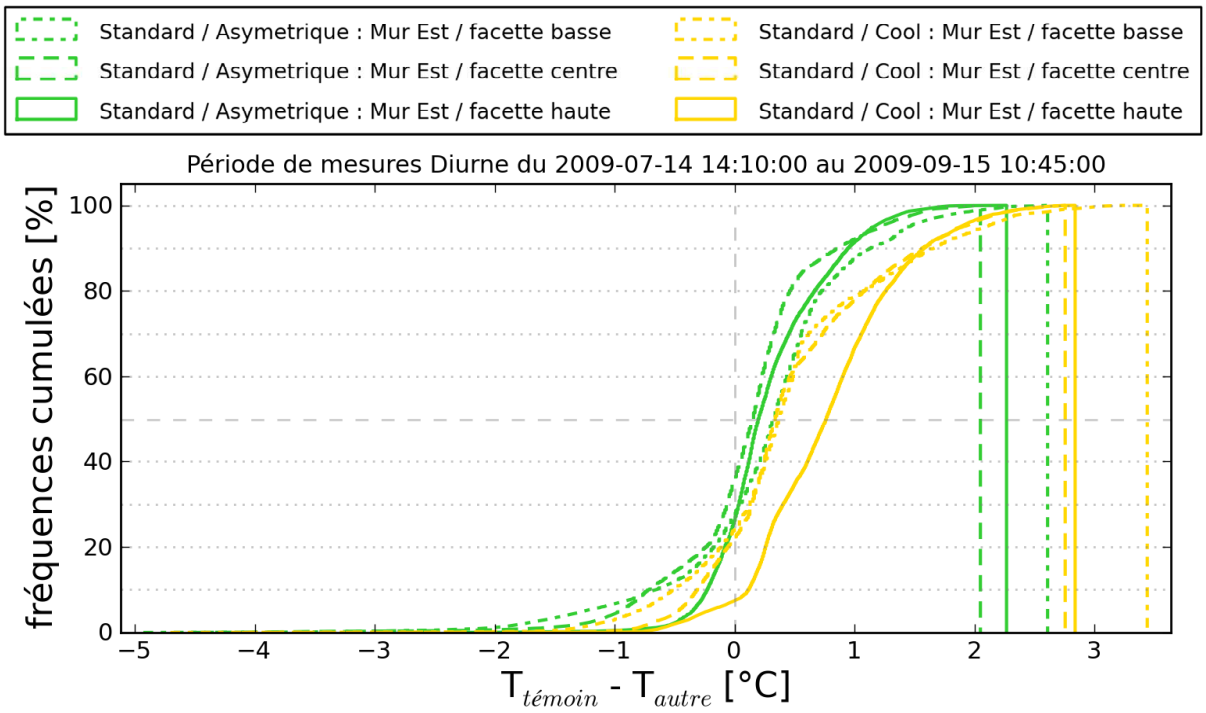


Figure 97 : Occurrence de la différence de température d'éléments de surface des façades Est de la rue témoin par rapport aux rues cool et asymétrique en fréquence cumulée en été

Les données par facette sont bien corrélées suivant une tendance similaire pour les 2 configurations, par rapport à la rue témoin, les facettes situées à l'*est* de la rue cool se révèlent plus fraîches que celles de la rue asymétrique. Le tableau 8 regroupe les valeurs interprétées ces séries de mesures diurnes.

Tableau 8 : Répartition des températures de surface des façades *Est* des rues cool (BC) et asymétrique (CD) par rapport au témoin (AB) pour 2 mois de mesures

	Rue cool (/témoin)		**Rue asymétrique (/témoin)**		**Remarques**
Facette	Période + chaude	Période + froide	Période + chaude	Période + froide	Période+ chaude BC et CD
Haute	8% / 0-1°C	92% / 0-2,8°C	27% /0-1,5°C	73% /0-2,3°C	-
Centrale	23% / 0-1,5°C	75% / 0-2,7°C	37% / 0-2°C	61% / 0-2°C	2% / 2 - 5°C (erreur montage)
basse	23% / 0-1,5°C	75% / 0-3,5°C	27% / 0-2°C	71% /0-2,6°C	2% / 2 - 5°C (erreur montage)

Pour la façade *est* dans la rue cool, le pourcentage de la période où cette rue est plus chaude que la rue témoin a considérablement réduit par rapport à la phase « calibration ». La période chaude est de 20 à 50% moins grande et les ΔT_{max} atteints sont réduits de 1 à 2,5°C, ces pourcentages sont gagnés par la période fraîche où l'écart de température a augmenté jusqu'à 1,3°C.

Pour la façade considérée de la rue asymétrique (recouverte du marron cool), la période où la température de ses facettes est plus chaude que de la rue témoin a sensiblement augmenté (1 à 10%), pour des écarts ΔT_{max} similaires en période chaude et qui ont augmentés pour la période fraîche (~0,3-0,5°C).

On peut dire que les interactions sur ce set de rues sont complexes, la réduction de température observée pour la rue BC est encourageante, mais les 2 façades observées ont reçues le même traitement cool, et pourtant elles n'ont pas réagit de la même manière.

Les variations répertoriées au niveau de la façade opposées sont affichées sur la figure 98.

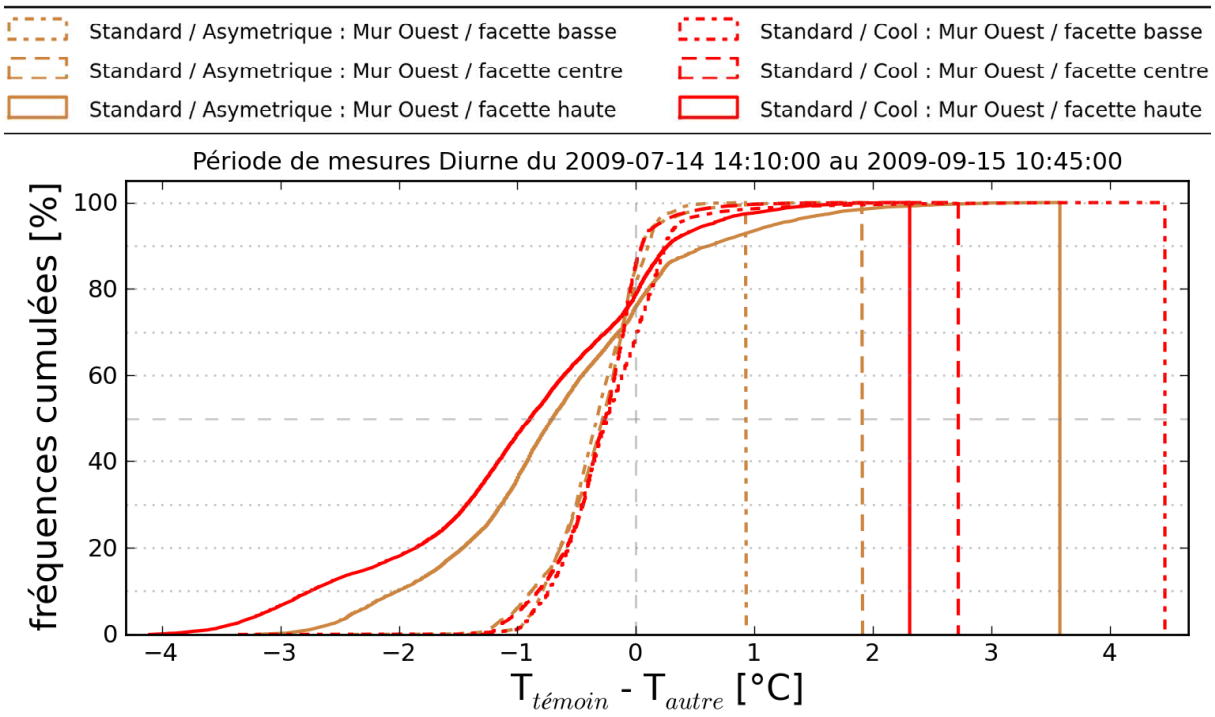


Figure 98 : Occurrence de la différence de température de surface des façades Ouest de la rue témoin par rapport aux rues cool et asymétrique en fréquence cumulée sur 2 mois de mesures

Les périodes où les façades *ouest* de la rue cool (bâtiment C) et de la rue asymétrique (bâtiment D, marron standard), étaient plus chaudes que celle de la rue témoin ont augmenté après l'application du traitement :

- De 5 à 13% pour la rue cool, avec des écarts de températures maximums plus ou moins semblables (±0,5°C)
- De 5à 12% pour la rue asymétrique (±0,5°C)
- Les écarts de températures pour la période fraîche n'ont pas beaucoup évolué non plus (±1°C)

De ce côté-là de la rue, l'application de la peinture cool n'a pas été bénéfique. Si cette évolution est normale pour la face théoriquement la plus absorbante de la rue asymétrique, elle ne l'est pas pour la rue cool.

3.5.3. Maintien des températures d'air de l'environnement bâti

La figure 99 permet de visualiser l'effet des parois proches sur la température de l'air mesurée à l'intérieur des protections radiatives. Les évolutions sont affichées pour une journée ensoleillée de septembre et la courbe de la température météorologique (mesurée sous abris en toiture d'un bâtiment voisin) qui est dénommée « Température ambiante ».

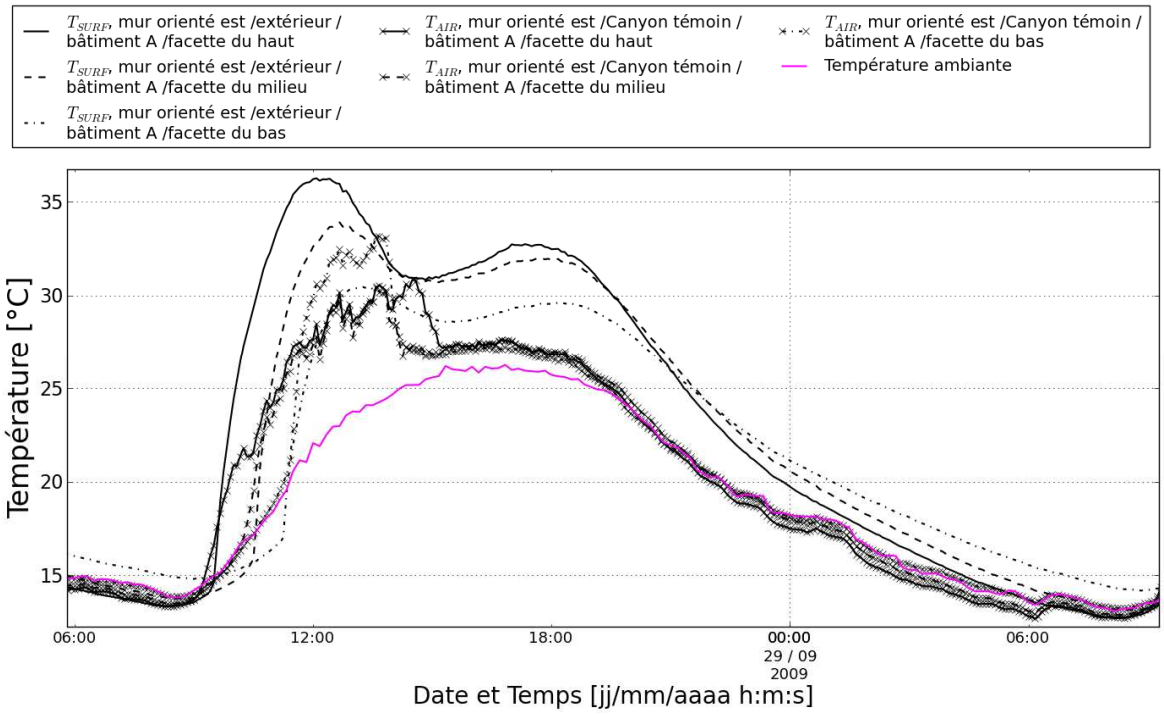


Figure 99 : Comparaison de l'évolution des températures d'air dans le canyon témoin par rapport à leur température de surface adjacente

On remarque que les températures mesurées sur le profil de la façade *est* sont influencées par la température de surface de la façade proche. Durant l'ensoleillement direct, le thermocouple le plus influencé est celui le plus proche de la chaussée, car il est influencé par la convection thermique en provenance à la fois du sol et des façades. Pendant l'ensoleillement direct, la température de l'air sur la scène urbaine peut être de 5 à 12°C supérieure à la température de référence. Lors de l'ensoleillement diffus, les températures d'air sur la scène urbaine restent relativement proches entre elles et sont supérieures à la température météorologique de 2 à 4°C. Pendant la nuit, on remarque que les températures les plus fraîches se situent en haut du canyon avec une température d'air au niveau du sol environ 1°C supérieure aux autres. La nuit, les températures de la scène urbaine et la référence sont semblables, on observe donc par d'îlot de chaleur urbain (qui nécessite une plus grande masse thermique et des apports anthropiques), même si en journée, le confinement thermique est observé.

Les écarts de températures de surface observées entre les parois de chaque configuration ne sont très significatives, cependant, nous allons observer l'effet produit sur les températures d'air mesurées à l'*est* des rues témoin et cool. La figure 100 divulgue les densités de probabi-

lité de l'occurrence de température de l'air circulant aux alentours de la façade pour les 3 hauteurs de mesures sur la période nocturne.

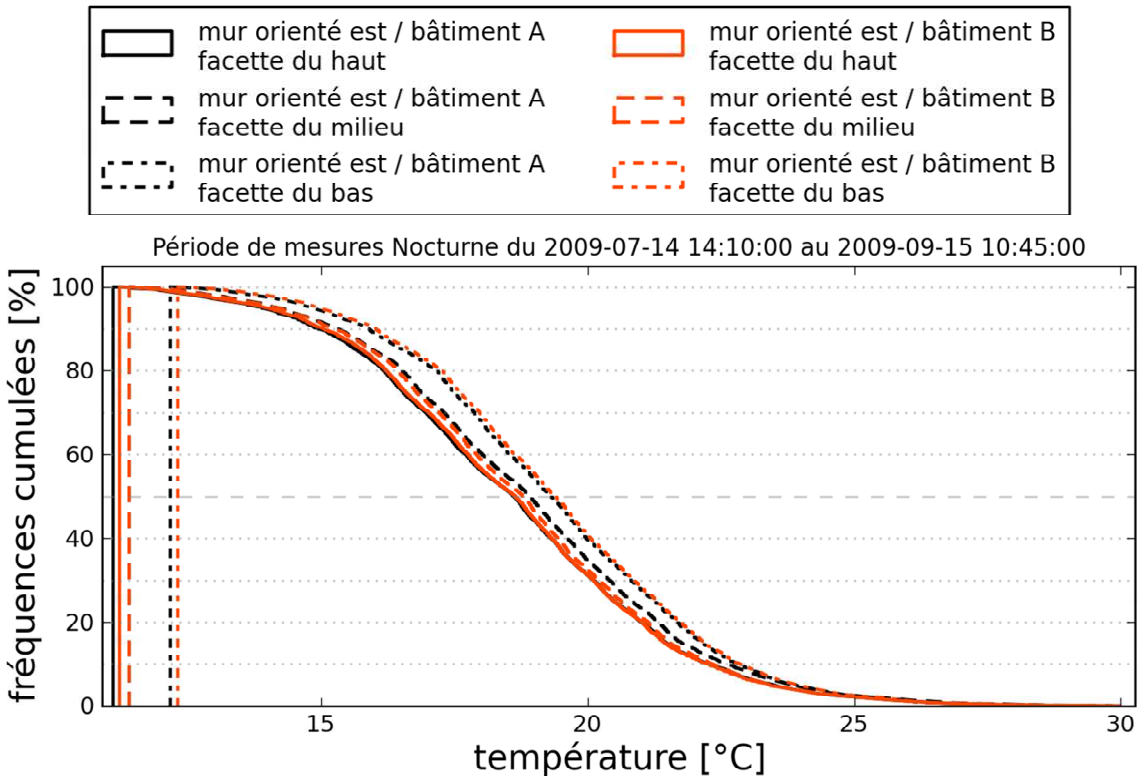


Figure 100 : Températures de l'air nocturnes mesurées sur le profil de la façade est dans les rues AB et BC en fréquences cumulées

Les résultats en fréquences cumulées confirment que les températures d'air au niveau de la chaussée (facette basse) et des facettes haute et centrale des deux rues sont exactement les mêmes deux à deux. De plus, on vérifie cette effet de confinement thermique sur l'air de la rue durant la nuit, avec des températures à l'approche de la chaussée, 1 à 2°C supérieures à celles prises plus hautes sur les façades.

La figure 101 illustre les variations au cours de la période diurne :

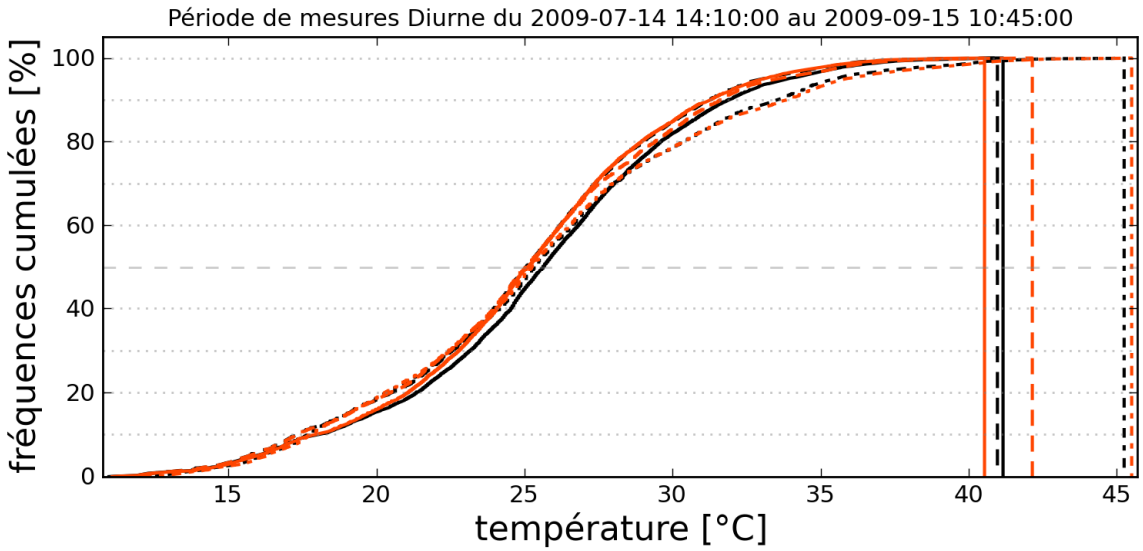


Figure 101 : Températures de l'air diurnes mesurées sur le profil de la façade *est* dans les rues AB et BC en fréquences cumulées

Pour les 2 rues, durant la période d'ensoleillement :

- les températures au niveau de la facette haute sont distantes de 0,5 à 1°C,
- les températures auprès des facettes centrales sont encore plus rapprochées,
- Les températures près du sol sont quasiment identiques

On sait que l'effet maximal des températures de façades sur les températures maximales d'air auprès de la facette est se situe le matin, on ne peut pas dire que la différence soit significative, à par sur le haut de la façade. En comparant ces valeurs avec les valeurs prises lors de la phase de mesure de calibration, les différences sont peu visibles mais on peut déceler une légère diminution de la température dans la rue cool (inférieure à 0,5°C).

3.5.4. Températures de l'air intérieur

Les températures intérieures de chaque bâtiment doivent refléter à la fois l'effet lié aux configurations des propriétés radiatives sur leurs parois, ainsi que le confinement et leur rapport aux ombres portées de l'ensemble de la scène urbaine. Rappelons que le bâtiment témoin auquel on compare les performances des 3 autres bâtiments a ses 2 façades peintes en marron standard, mais que sa façade Ouest ne bénéficie pas d'ombres portées proches d'une configuration rue canyon. Le bâtiment B a sa façade Ouest peinte avec le revêtement standard et l'Est avec la peinture cool, le bâtiment C a ses deux façades peintes en cool, alors que le D a le

même revêtement que la rue témoin mais est soumis à l'influence d'une paroi opposée peinte en cool. Le graphique ci-dessous indique l'occurrence des températures diurnes d'air ambiant dans chaque bâtiment pendant 2 mois d'été affichée en fréquences cumulées.

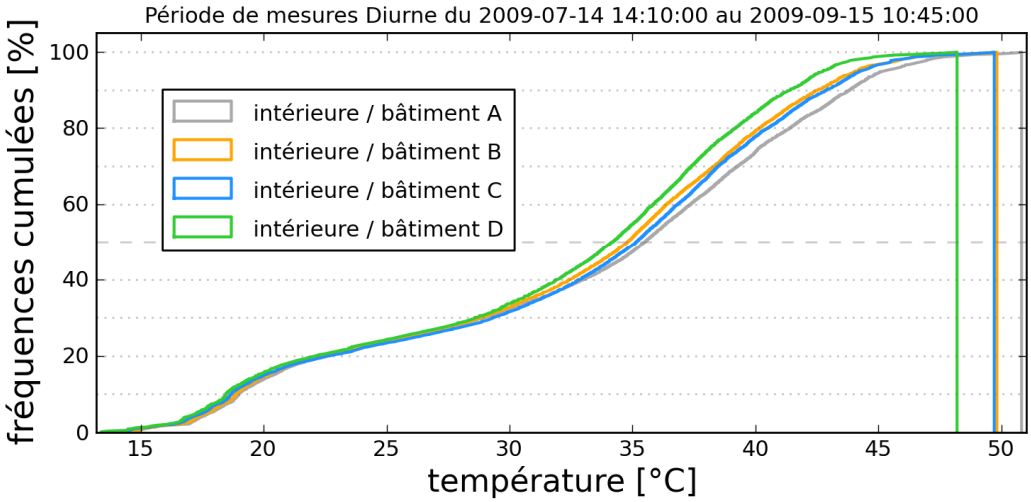


Figure 102 : Occurrence de températures de l'air ambiant dans les bâtiments peints avec le revêtement standard (A et D), cool (C) et asymétrique (B) pendant la période diurne de 2 mois d'été 2009 en fréquences cumulées

Le bâtiment A demeure le plus chaud en terme de température maximale, avec un maximum près de 2°C supérieurs aux bâtiments B et C, et près de 5°C sur le bâtiment D. La différence de température du bâtiment A au bâtiment D, qui ont pourtant des revêtements identiques, est principalement lié à cette façade ouest exposée pour le bâtiment A qui lui permet de capter plus d'apports solaires lorsque le soleil est pratiquement perpendiculaire à l'ensemble de cette façade (bas sur l'horizon). Après vérification, la différence notée pour le bâtiment D est aussi certainement liée aux trappes d'accès qui ont été mal étanchéifiées et qui créent un écoulement d'air interne. La figure 103 matérialise l'occurrence de la différence de température ambiante diurne entre les bâtiments B, C, D et le bâtiment témoin (A) au cours des 2 mois d'été.

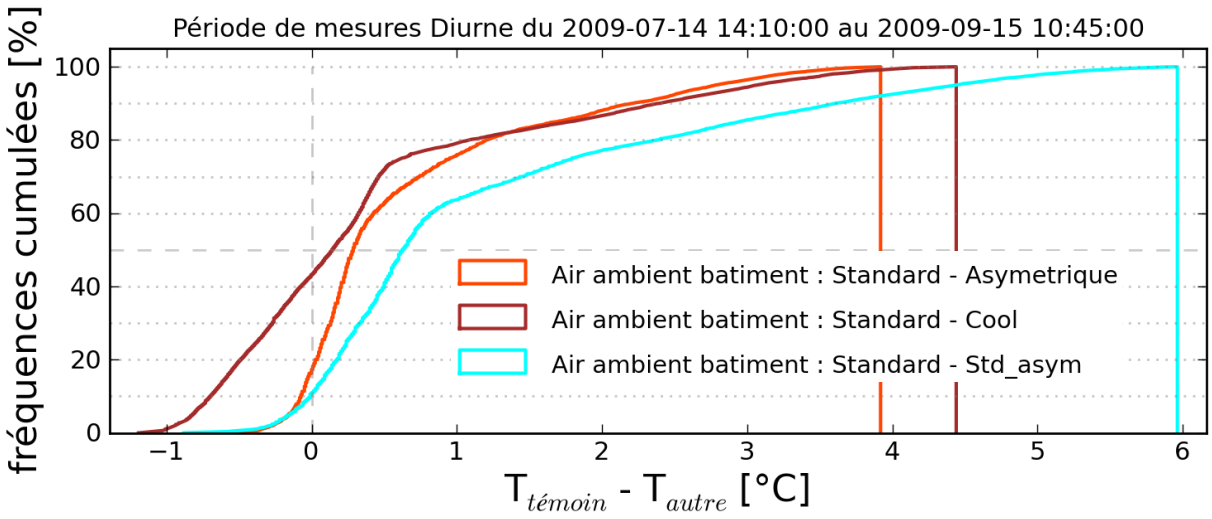


Figure 103 : fréquences cumulées diurnes de la différence de températures d'air ambiant entre les bâtiments peints de manière cool (C) et asymétrique (B) comparé au bâtiment témoin (A) pendant l'été 2009

Pendant cette période, les températures des 3 configurations de bâtiment peuvent être examinées en terme de pourcentage du temps où la différence de température avec le bâtiment témoin et en terme de domaine de température observé. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus lors de la phase calibration (figure 89 et la figure 90) et résumés dans le tableau 9

Tableau 9 : Comparaison de l'évolution des différences de température intérieure entre le bâtiment témoin et les 3 autres configurations.

Bâtiment test	**État de la config.**	**période (%) où Ttest < Ttémoin**	**ΔT_{max} (°C)**	**période (%) où Ttest > Ttémoin**	**ΔT_{max} (°C)**
B	Calibration	30 %	- 1	70 %	3,5
	3 config.	20 %	- 0.6	80 %	3.9
C	Calibration	52 %	-2,5	48 %	4
	3 config.	45 %	-1,2	55 %	4,4
D	Calibration	5 %	-0,75	95 %	5
	3 config.	12 %	-1	88 %	6

Pour le bâtiment B, après l'application des la stratégie cool sur sa façade ouest, on remarque que la durée de la période diurne où sa température interne est plus basse que celle du bâtiment A augmente. La période de mesure sur les 3 configurations différentes d'enveloppe étant située durant l'été, on voit le domaine entre les différences de températures extrêmes s'élargir. Le domaine couvert par la période où $T_{int,B}$ est plus fraiche que $T_{int,A}$ est celui qui subit la plus grande progression. Pour le bâtiment C, la période où $T_{int,A}$ est plus fraîche que $T_{int,C}$ augmente de 7%. La différence maximum lorsque A est plus frais que C est réduite d'1,3°C et augmente de 0,4°C pour la période plus chaude que C. Enfin, pour le bâtiment D, cette différence entre la phase calibration et la phase avec 3 configuration est définitivement plus réduite, avec une augmentation de la période où D est plus chaud que A de 7% et une augmentation des maximas de la différence de température lors de cette période de 0,25°C. Cet effet est probablement lié à l'augmentation du flux solaire réfléchis par la façade cool opposée.

Néanmoins, cette nouvelle configuration n'annihile pas l'effet lié à l'environnement et à la conception géométrique, c'est-à-dire que le bâtiment D (*est* et *ouest* recouverts de peinture standard) reste le plus frais des quatre bâtiments étudiés.

. La figure 104 illustre l'occurrence de cette différence de température ambiante nocturne entre les bâtiments B, C, D et le bâtiment témoin (A) au cours des 2 mois d'été.

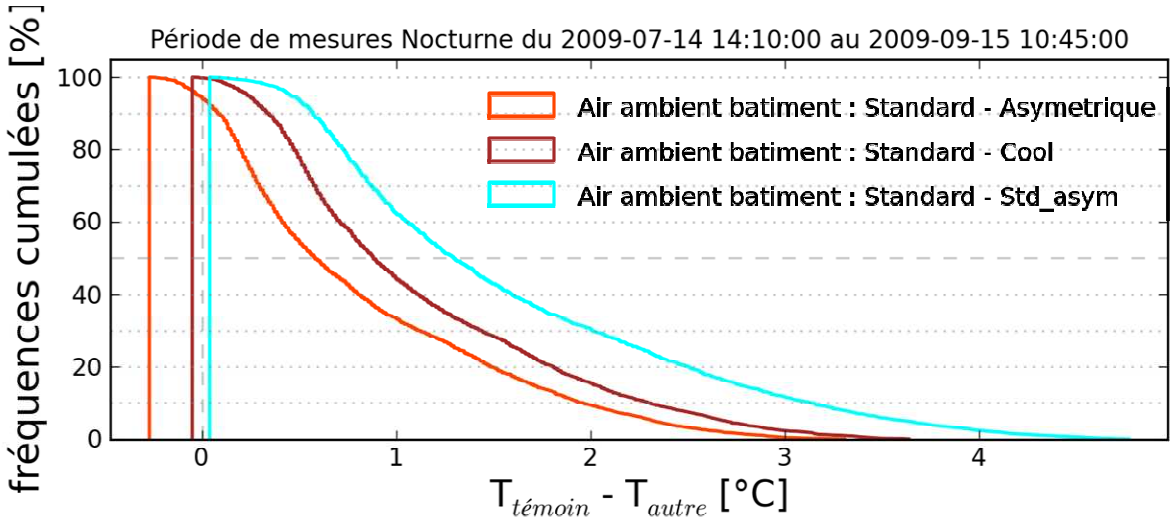


Figure 104 : Occurrence de différence de températures entre l'air ambiant des bâtiments peints de manière cool (C) et asymétrique (B) comparé au bâtiment témoin (A) pendant la période nocturne de 2 mois d'été 2009 en fréquences cumulées

Durant la nuit, les 3 bâtiments B, C et D sont moins chauds que le bâtiment A, mais étonnamment, le bâtiment le moins chaud est le bâtiment asymétrique peint de couleur standard. La magnitude de l'occurrence moyenne de température intérieure décroit en s'éloignant vers les rangées situées à l'Est, le bâtiment B est presque 0,8°C moins chaud alors que les bâtiments C et D sont respectivement 1,1 et 1,4°C moins chaud que le bâtiment A. Si l'on compare ces résultats à ceux obtenus lors de la phase de calibration, on s'aperçoit que les bâtiments B, C et D ont maintenant une courte période où leur température nocturne est supérieure à celle du bâtiment témoin (< 4%) et surtout que lors des périodes où leur température intérieure est inférieure, leur écart maximal a augmenté et peut aller de 3 à 4,5°C. Ceci est dû à l'action des façades ouest cool et de la géométrie canyon sur le flux solaire absorbé par la structure lors des angles solaires bas en fin de journée. Dans les villes réelles, l'ICU est surtout observable durant la période nocturne, mais dans notre cas la masse thermique de notre scène urbaine est trop faible pour identifier des modifications.

3.5.5. Bilan d'énergie nocturne dans les canyons

Les mesures des flux net radiatifs aux grandes longueurs d'ondes, associés aux températures de surfaces et d'air ponctuelles à l'intérieur des canyons ont été mises en œuvre pour établir des bilans énergétiques en deux points sur la hauteur de la façade Est, sur la chaussée Ouest et au centre de la façade Ouest de nos trois rues. La méthode de fermeture du bilan énergétique utilisée dans le paragraphe 3.4.5 nous permet de déduire le terme de flux de chaleur échangé par convection aux différentes facettes ainsi que le coefficient *h* associé. Nous disposons des données enregistrées du 14 décembre au 6 janvier 2009 pendant l'hiver que nous allons détailler en terme qualitatif. L'interprétation des échanges radiatifs nets GLO entre parois à l'intérieur du canyon AB (témoin) est fournie par la figure 105. Dans ce canyon, 4 capteurs de flux sont utilisés, un situé sur la facette haute de la façade est, un sur la facette basse, un sur la chaussée au pied de la façade ouest et un sur la facette centrale de la façade ouest.

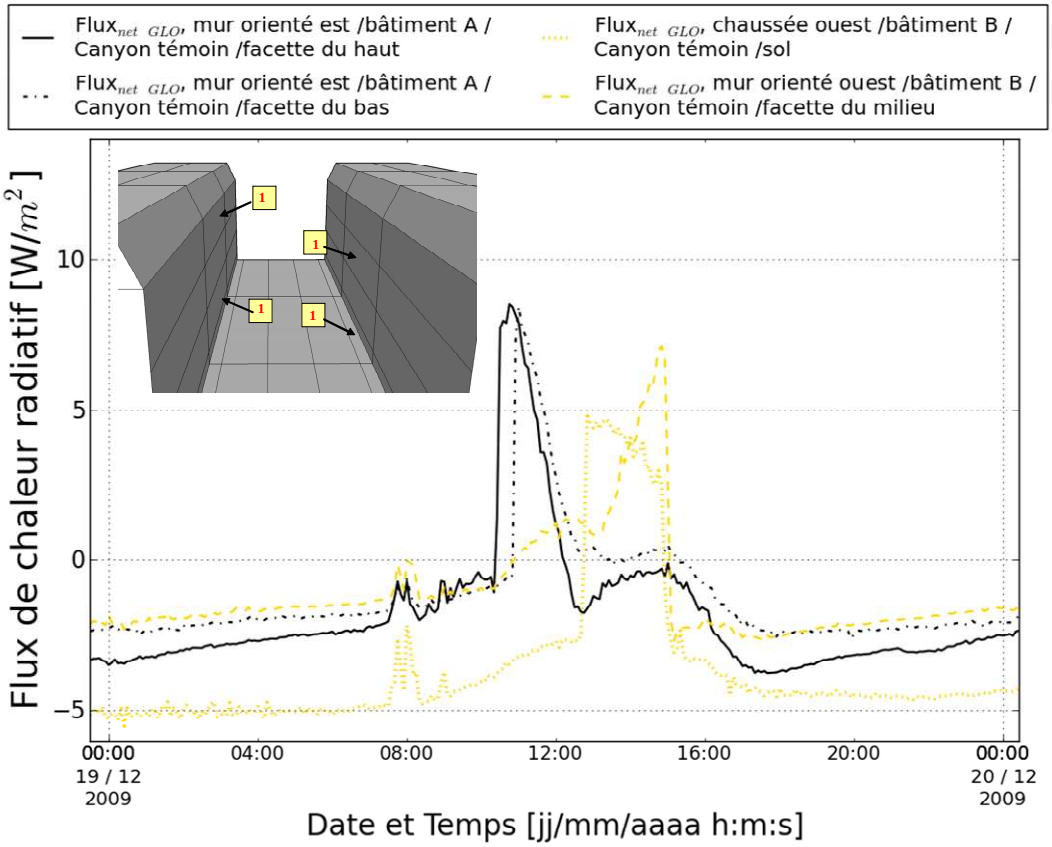


Figure 105 : Évolution des flux nets radiatifs GLO à différents emplacement du canyon témoin pendant l'hiver 2009

On remarque une première augmentation et perturbation du flux net pour l'ensemble des capteurs entre 7h00 et 10h30 correspondant à l'effet du flux solaire diffus sur la scène. Puis surviennent deux pics plus prononcés sur la façade Est correspondant à la montée en température de la surface due à l'ensoleillement direct de celle-ci et donc à une émission GLO proportionnelle à sa température. De 12h30 à 15h00, intervient l'émission des surfaces de la chaussée qui jusqu'alors absorbait plus qu'elle n'émettait. Ceci étant dû à son ouverture faible vers la voûte céleste et à son vis-à-vis avec les façades, première à capter l'énergie solaire, à monter en température et à réémettre leur énergie radiative vers la chaussée. Puis ensuite intervient le flux émis par la façade ouest, qui est plus faible que celui de la façade est dans le cas de la rue témoin. On remarque sur les mesures des capteurs produites par les deux parois opposées un pic plus discret de chaque côté correspondant à l'ensoleillement direct de la paroi opposée, et donc à l'échauffement produit par les inter-réflexions dans le canyon. Pendant la nuit on remarque que les surfaces du canyon se refroidissent progressivement même si leur flux net

demeure constamment négatif, le flux radiatif GLO gagné provenant des facettes les plus élevées et du sol. Les échanges radiatifs dans les deux autres canyons sont moins complets (3 capteurs fonctionnant dans chacun d'entre eux). Le résultat est semblable avec des valeurs de flux net légèrement plus élevées (le pic pour la façade ouest atteint 12 W/m² au lieu de 7 dans le canyon témoin). Les quatre figures ci-dessous illustrent les résultats des ajustements de l'équation de bilan d'énergie nocturne pour plusieurs surfaces où on mesure le flux net GLO, les températures de surface de par et d'autre de la paroi et la température de l'air à proximité de celle-ci. En ordonnée, le flux perdu par convection est représenté par rapport à la différence de température T_S moins T_{air}. L'équation utilisée pour l'ajustement est encore l'équation 25, à la simple différence que les flux GLO utilisés sont ceux dispensés par les capteurs GLO disséminés.

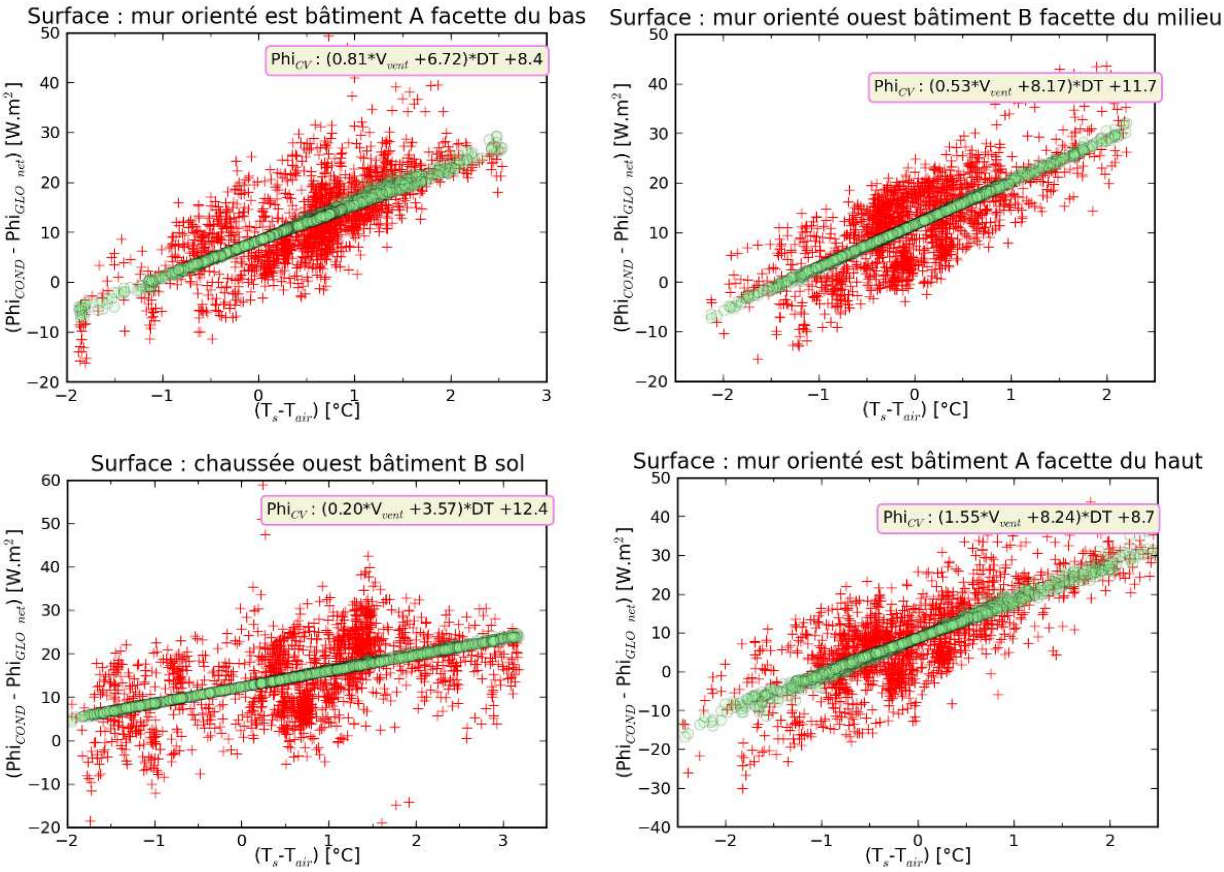


Figure 106 : Résultat d'ajustement de l'équation de bilan thermique aux surfaces des canyons et du coefficient de convection par rapport à la vitesse de l'air en toiture pendant l''hiver

Si la correspondance des tendances entre les données mesurées et les données ajustées semblent plutôt bonne, la valeur des coefficients de convection retrouvés par l'ajustement des ré-

sultats expérimentaux par minimisation des équations de bilan thermique aux surfaces ne sont pas très satisfaisants. Cependant on remarquera que les façades du haut ont un coefficient directeur (lié à la vitesse du vent en toiture) de la loi linéaire plus important, par conséquent leur température est plus influencée par la vitesse de l'écoulement au dessus de la maquette. La validité des coefficients calculés nécessiterait surement de réaliser les ajustements avec des jeux de données triés selon la direction du vent, et calculer la part liée à la convection naturelle indépendamment.

3.6. Conclusions sur les résultats expérimentaux

Ce chapitre a retracé la mise en œuvre d'une plateforme instrumentée pour observer l'effet d'une géométrie confinée de ratio *H*/*W* fixé sur les températures de surface et d'air. Sa conception théorique et technique ont été expliquées afin d'obtenir un microclimat caractéristiques des centres urbains denses. Le confinement thermique observé, appelé ici l'effet canyon, se remarque principalement la nuit par une température plus élevée pour les surfaces situées au bas des rues (~2°C) et en journée par une élévation de la température de l'air au abord des façades jusqu'à 12°C au dessus de la température météorologique. Une autre remarque concerne l'effet cumulé d'une série de bâtiments, les bâtiments situés en bout de série exposé à l'*est* et à l'*ouest* régulent la température de l'air sur l'ensemble de la scène. Concrètement, pour notre dispositif, le bâtiment avec la façade la plus à l'*est*, non protégée par une ombre portée le matin, prend des températures de surface plus élevées que le reste de la scène, ce qui se répercute de manière atténuée aux bâtiments situés à l'ouest. Il en est de même pour la façade la plus à l'ouest en fin de journée. Cette théorie se vérifie sur les températures d'air moyennes mesurées au centre des façades (d'est en ouest, -0,3°C le matin et d'ouest en est, -0,8°C le soir) comme le montre la figure 107.

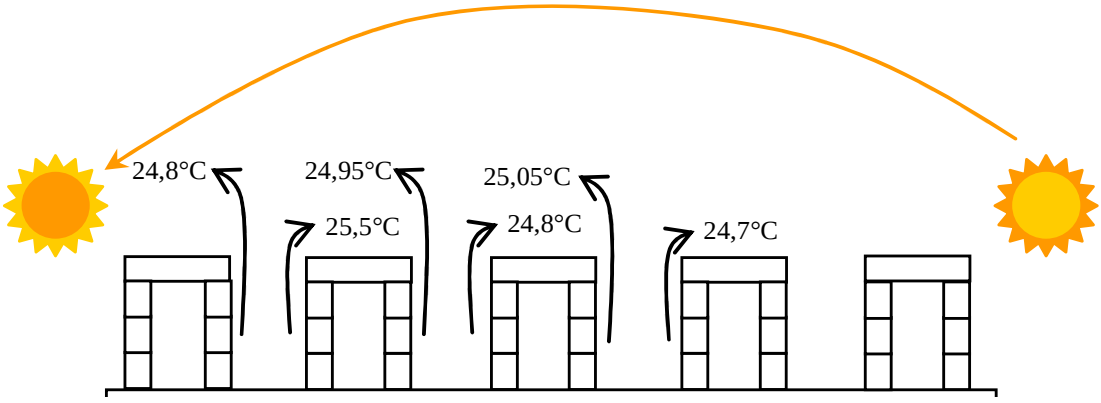


Figure 107: distribution des températures d'air moyenne sur 2 mois de mesure

Ensuite une méthodologie de comparaison a été développée, mettant en valeur des indicateurs caractéristiques permettant de cibler les performances de plusieurs configurations radiatives aux surfaces. Le but à long terme étant d'estimer, par la mesure, la performance de différents traitements d'ilot de chaleur urbain sur la température des bâtiments et de la scène urbaine réduite. Cette méthode a ensuite été appliquée aux effets de la mise en œuvre de traitement de façade sélectif. Plus particulièrement, 2 produits de teinte marron semblable (une peinture préparée cool et une peinture standard), ayant une différence de réflectivité solaire ($\Delta\rho_{SOL}$ initial) avant exposition égale à 0,24, ont été testés. Ils ont permis de réaliser trois configurations, une rue témoin, une rue cool et une rue asymétrique d'un point de vue des albédos des façades. Après un premier traitement des mesures, les différences de température de surface entre les façades traitée ou non ne se sont pas avérées aussi importantes que sur le banc expérimental en toiture.

Nous avons donc utilisé une comparaison indirecte des variations de températures de la scène urbaine entre sa période de calibration où toutes les surfaces avaient un albédo identique et sa période en configuration cool/standard/asymétrique. Celle-ci a donné des résultats encourageants. L'utilisation de la peinture cool a permis :

- de réduire la période où la température intérieure des bâtiments ayant une enveloppe traitée cool était plus chaude que celle du bâtiment témoin recouvert de peinture standard (jusqu'à 10% de réduction),

- de réduire l'écart de température sur la période où le bâtiment cool était plus chaud que le bâtiment témoin (jusqu'à -1,3°C),

- d'augmenter l'écart de température sur la période où le bâtiment cool était plus frais que le bâtiment témoin (jusqu'à 1°C).

L'effet de l'asymétrie du canyon était quasiment inexistant, mais a pu être identifié d'après une légère augmentation de la période où la température intérieure du bâtiment standard opposé à une façade cool était plus chaude que le bâtiment témoin (+5%). Les résultats sont tout de même mitigés, principalement à cause d'un éclaircissement de la peinture standard dans les visibles au cours de la campagne, donc une augmentation de son albédo engendrant une réduction du $\Delta\rho_{SOL}$ effectif entre le produit cool et standard.

Ces conclusions sont importantes, mais incomplètes pour conclure sur la performance en façade des peintures dans les milieux urbains réels. En effet il faudrait corriger leur impact en tenant compte de l'interaction des autres facteurs tels que les apports anthropiques. De plus cette configuration étudiée permet de conclure sur la base d'un seul rapport d'aspect géométrique H/W égal à 1 ; le chapitre suivant présente les résultats obtenus pour le calcul du piégeage radiatif obtenu selon la valeur des propriétés radiatives aux façades de différents canyons, avec différentes orientations, géométries et latitudes. Puis on donnera les résultats d'un cas d'étude formalisé sur un logiciel couplant le microclimat urbain et la consommation énergétique des bâtiments, afin de dégager des estimations quant aux performances des stratégies utilisées en conditions réelles.

4. Simulation du piégeage radiatif et de la demande énergétique des bâtiments en milieu urbain dense

L'utilisation de revêtements sélectifs dans le spectre solaire sur les bâtiments modifie leur bilan thermique de surface, ce qui agit à deux niveaux :

- Sur la température intérieure et donc la demande énergétique du bâtiment concerné.
- Pour une utilisation systématique, sur la température de l'air à l'échelle de la ville.

Pour les bâtiments seuls, le contrôle de l'ensoleillement absorbé permet de diminuer la température intérieure, donc d'améliorer le confort thermique, et pour les cas avec climatisation, de réduire l'énergie consommée durant la période estivale. En contrepartie, pendant l'hiver, la diminution des apports solaires entraîne une augmentation de la demande énergétique. Dans les pays de latitude moyenne, les apports solaires d'hiver sont plus faibles, de part le faible angle solaire d'incidence et la récurrence des ciels couverts et de précipitations. Cette technique de rafraîchissement passif n'entraînerait donc pas une diminution notable des apports solaires gratuits d'hiver. Les pertes sur la demande en chauffage et les gains sur la demande en rafraîchissement doivent donc être quantifiées tout en tenant compte de l'influence des revêtements réflectifs relative à l'atténuation effective de l'îlot de chaleur urbain.

En effet, la diminution des températures de surfaces observées réduit les échanges de chaleur par convection superficielle avec l'air, ce qui pourrait notablement réduire sa température pour une application de la stratégie à grande échelle. A ce sujet, des simulations méso-échelles réalisées par l'équipe du LBNL (Akbari 2010) rapportent le potentiel considérable d'économies réalisables en augmentant l'albédo moyen des villes de 40%. La simulation a révélé des économies financières pour la ville de Los Angeles : 100M$/an en termes de gains directs[13] sur l'énergie consommée par les bâtiments traités estimée, 70M$/an pour les gains indirects[14] sur l'ensemble de l'agglomération et 270M$/an pour les coûts dérivées imputables à la pollution (santé des habitants).

---

[13] Réduction des apports solaires surfaciques vers l'intérieur des bâtiments climatisés

[14] Réduction de la température de l'air extérieur (traitement de l'ICU)

Le chapitre présente tout d'abord la dépendance du flux de chaleur conduit dans un local selon la réflectivité et la résistance thermique d'une paroi horizontale (toiture). Ensuite, les résultats d'une étude paramétrique sur le piégeage radiatif dans une rue canyon selon la configuration des propriétés radiatives aux surfaces (façades, chaussée, combiné), le rapport d'aspect géométrique, l'orientation et la latitude. Et enfin, une étude de cas est menée avec un code numérique disponible au LEPTIAB (Simcanyon, Bozonnet 2005) qui permet le couplage entre la demande énergétique des bâtiment et le microclimat d'une rue canyon et donc d'observer les performances directes (réduction des consommations) et indirectes (réduction de la température de l'air extérieur) liée à des caractéristiques d'enveloppe. L'application à une rue canyon Athénienne a permis la prédiction de la demande énergétique annuelle de ses bâtiments imputable à la configuration des propriétés radiatives des façades.

4.1. Modélisation des économies d'énergie directes liée à l'application d'un cool roof

Les bénéfices liés à l'application des cool roofs ont été examinés dans de nombreux articles, avec de bonnes performances pour les bâtiments de plain pied et d'importantes surfaces de toiture terrasse tels que les supermarchés (Parker et al. 2002, Synnefa et al. 2007). La sensibilité aux différents modes de transferts de chaleur d'une paroi de bâtiment est dépendante des propriétés radiatives affectées à sa surface extérieure et des propriétés thermophysiques des matériaux la constituant. Les équations qui régissent les bilans énergétiques aux surfaces et le transfert de chaleur par conduction dans les parois sont développées dans le paragraphe suivant. Puis ce modèle de paroi est couplé avec une température résultante fixe (simulant un local indépendamment des autres parois) sur la face interne et avec les mesures météorologiques de La Rochelle (correspondant aux mesures du chapitre 2) en face externe. Cet exercice nous permet de quantifier l'impact du revêtement de toiture sur la densité surfacique de flux d'énergie traversant la paroi en été et hiver pour trois valeurs de réflectivité solaire, et deux résistances thermiques de paroi différentes.

4.1.1. Modèle simplifié du local et des transferts thermiques

Ce modèle a été volontairement simplifié, pour établir l'impact énergétique d'une toiture seule sur un local où la température résultante intérieure est maintenue à une température de

consigne constante durant les périodes de climatisation et de chauffage. L'utilisation d'une température résultante intérieure nous permet de nous concentrer sur les effets liés au traitement radiatif d'une paroi isolée sans avoir à modéliser d'autre paroi dans le calcul.

Bilan thermique pour une surface extérieure horizontale

La figure 108 représente les différents modes de transfert de chaleur qui établissent l'équilibre énergétique de la surface extérieure.

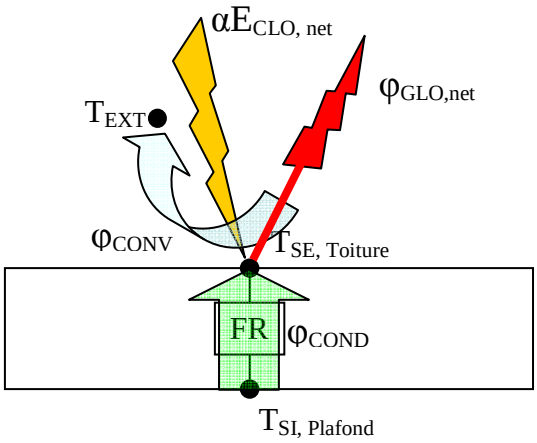


Figure 108: Bilan thermique à la surface d'une toiture

Cet équilibre énergétique peut alors s'écrire :

$$\varphi_{CONV} + \varphi_{GLO}^{net} + \alpha_{SOL} E_{SOLAIRE} = \varphi_{COND} \qquad \text{Équation 26}$$

Avec α_{SOL}, le coefficient d'absorption de l'énergie solaire de la surface considérée, $E_{SOLAIRE}$, l'éclairement reçu par la paroi en W/m², φ_{GLO}^{net}, le flux net de grandes longueurs d'onde de la surface en W/m². Le calcul du rayonnement de grandes longueurs d'ondes peut être simplifié pour les échanges radiatifs de la toiture avec la voûte céleste par l'utilisation d'un coefficient d'échange radiatif h_R :

$$\varphi_{GLO}^{net} = h_r \left(T_{SE} - T_{ciel}\right) \qquad \text{Équation 27}$$

$$h_r^p = 4 \cdot \varepsilon_{toit} \sigma \cdot T_m^3 = 4 \cdot \varepsilon_{toit} \sigma \cdot \left(\frac{T_{SE}^{(i-1)} + T_{ciel}}{2} \right)^3$$

Avec σ, la constante de Stephan Boltzmann, ε, l'émissivité GLO de la toiture et afin d'éviter les itérations, on prend la température de surface de la toiture, $T_{SE}^{(i-1)}$ au pas de temps précédent.

Bilan aux surfaces intérieures

La Figure 109 introduit l'équilibre thermique d'une surface intérieure. Nous faisons l'hypothèse d'une température résultante intérieure fixe, T_{RS}, qui doit être maintenue par le système de chauffage ou de climatisation.

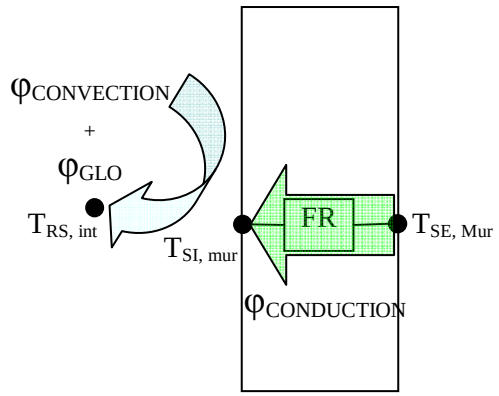


Figure 109: Bilan thermique à la surface intérieure d'une paroi

Le bilan énergétique de surface s'écrit :

$$\varphi_{CONV} + \varphi_{GLO}^{net} - \varphi_{COND} = 0 \qquad \text{Équation 28}$$

Pour le bilan au nœud placé sur la surface intérieure de la paroi, le coefficient d'échange thermique global h_G intègre le transfert de chaleur radiatif linéarisé et de convection naturelle de la surface. De plus, les parois intérieures sont supposées rayonner comme des corps gris (ε~0.9), soit :

$$h_G = h_{conv}^{\text{int}} + h_R^{\text{int}} = 4\varepsilon_{mur,\text{int}}\sigma \cdot T_{SI}^3 + h_{conv}^{\text{int}} \qquad \text{Équation 29}$$

Le coefficient d'échange convectif $h_{\text{int, conv}}$ est fixé à 9W/m².K. L'apport au local par unité de surface est alors exprimé par la relation suivante :

$$\varphi_{COND} = h_G.(T_{SI} - T_{RS}) \qquad \text{Équation 30}$$

Ce flux surfacique correspond aux apports par la paroi à l'ambiance ; le bilan complet de l'ambiance fait bien sûr intervenir les apports internes, le renouvellement d'air et d'autres charges qui ne sont pas étudiés ici.

4.1.2. Modélisation de la conduction thermique dans une paroi

Le modèle de transfert par conduction et de stockage thermique de la paroi a été modélisé de surface à surface de manière unidimensionnelle selon l'équation de Fourier :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho \cdot Cp} \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

Équation 31

L'équation de la chaleur est linéaire et invariante dans le temps, ce qui permet de trouver ses solutions analytiques pour un mur homogène mais qui se complique avec des parois multi-couche. Le paragraphe suivant présente la méthode employée pour calculer la conduction thermique dans la paroi appelée méthode des facteurs de réponses.

Méthode indirecte des facteurs de réponses thermiques

Le concept de facteurs de réponses thermique est une méthode basée sur l'identification de la réponse d'une paroi à une sollicitation unitaire. La réponse r_t à une excitation dite unitaire (impulsion en température à la surface) est échantillonnée selon un pas de temps Δt constant. Les valeurs discrètes ainsi obtenues sont appelées facteurs de réponse r_j (figure 110). Les sollicitations utilisées sont des fonctions d'impulsion triangulaire de base $2\Delta t$ (Mitalas et al. 1967).

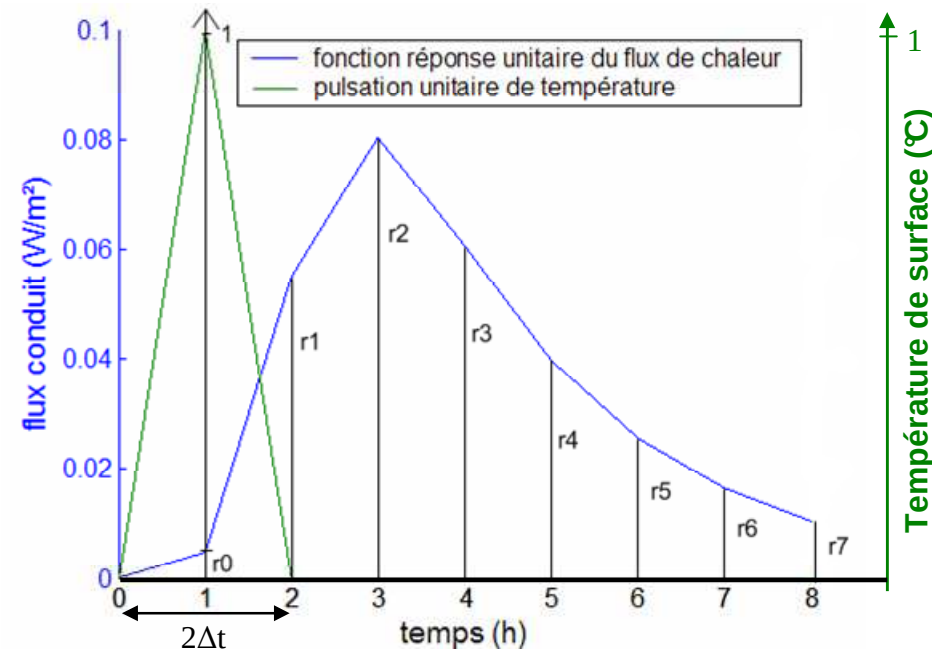


Figure 110 : réponse thermique à une impulsion triangulaire en température

La réponse en flux q_j au pas de temps j à une impulsion en température de valeur arbitraire au pas de temps initial est donnée par :

$$q_j = r_j \cdot T(t=1) \qquad \text{Équation 32}$$

Où les valeurs r_j représentent les facteurs réponses horaires de la paroi expérimentée dans la figure précédente. Les flux thermiques conduits aux surfaces de part et d'autres de la paroi en réponse à une excitation unitaire sur la face intérieure alors que la face extérieure est maintenue à 0°C sont échantillonnés, On note X, le flux entrant, et Y le flux traversant. On inverse ensuite la face sollicitée devient la face extérieure, on note Z et Y les flux entrant et traversant.

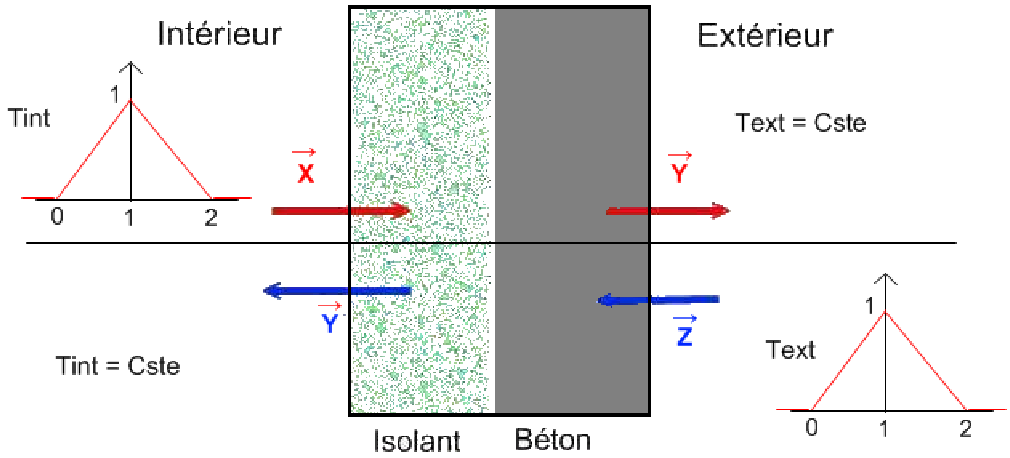


Figure 111: excitation unitaire et réponse en flux d'une paroi

La méthode des facteurs de réponse est donc basée sur une forme discrète du produit de convolution représentée mathématiquement par la somme d'une série de termes (produits du facteur de réponse par la sollicitation). Par superposition des effets, le flux de chaleur conduit de l'intérieur de la paroi vers l'interface paroi / ambiance intérieure au pas de temps n dérivé de la réponse à des excitations en températures sur les deux surfaces du mur est donné par :

$$\varphi_{cond}^{\text{int}}(n) = \sum_{j=0}^{N} Y_j T_S^{ext}(n-j) - \sum_{j=0}^{N} X_j T_S^{\text{int}}(n-j) \qquad \text{Équation 33}$$

Le flux de chaleur conduit de l'intérieur de la paroi vers l'interface paroi / environnement extérieur au pas de temps n dérivé de la réponse à des excitations en températures sur les deux surfaces du mur est donné par :

$$\varphi_{cond}^{ext}(n) = \sum_{j=0}^{N} Y_j T_S^{\text{int}}(n-j) - \sum_{j=0}^{N} Z_j T_S^{ext}(n-j)$$ Équation 34

Où X_j, Y_j, Z_j sont les réponses en flux échantillonnées sur la base de temps choisie, autrement dit les facteurs réponses, ceux-ci sont infinis mais la série peut être tronquée à N termes. N dépend du type de mur étudié et de la précision exigée par l'utilisateur du modèle. Chaque terme de la série représente le « souvenir » qu'a la sortie de la perturbation à un moment donné. L'information concernant la mémoire du système (facteurs de réponse) est dissociée de celle liée aux évènements créant l'excitation.

Pour connaitre la réponse de la paroi à une sollicitation quelconque, les fonctions d'impulsions peuvent être combinées sous la forme d'une approximation linéaire du profil de température de surface (Figure 112).

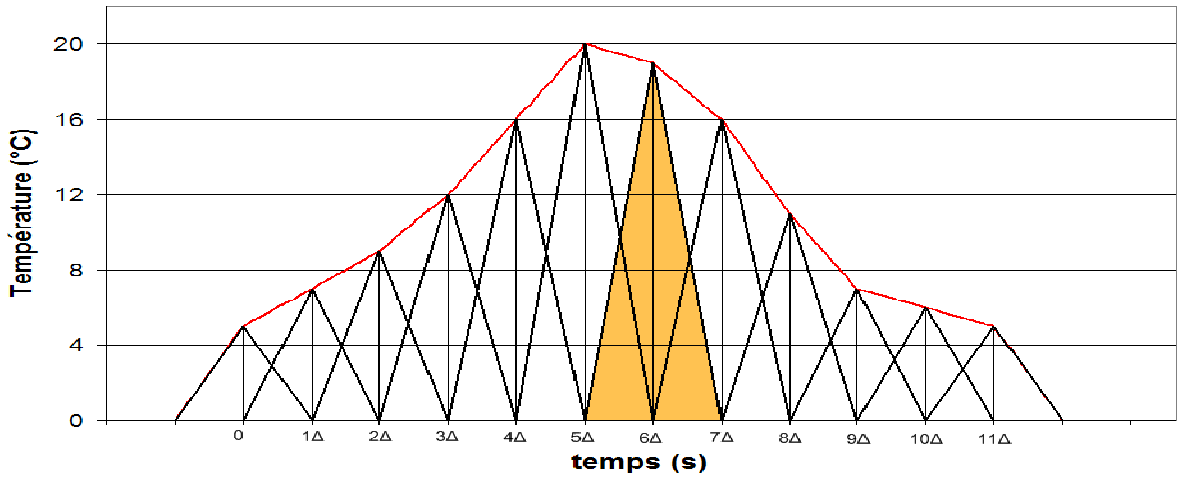


Figure 112: approximation de la température d'excitation surfacique par des impulsions triangulaires de base 2Δt

La considération d'une évolution linéaire de la température entre deux prises de mesure autorise la superposition des réactions d'une paroi aux pulsations individuelles en températures imposées sur ses deux surfaces.

Le modèle de facteurs réponses thermiques est une méthode indirecte et se faisant, la réponse exacte d'une paroi quelconque à une sollicitation unitaire de température à sa surface doit être calculée au préalable par une méthode directe (Brau et al. 1984). La méthode des différences finies explicites ou implicites et les éléments finis sont des méthodes directes de résolution de l'équation de la chaleur et des conditions aux limites du problème. Ces méthodes directement

basées sur la discrétisation (spatiale et temporelle) des équations de la physique peuvent être très pénalisante sur leur mise en œuvre couplée dans un modèle du bâtiment (stockage des données du maillage et des valeurs physiques aux nœuds, coût en temps de calcul...). Nous avons choisi de résoudre l'équation de la chaleur en différences finies avec un schéma de Cranck-Nicholson (élimination des problèmes de convergence). La résolution de l'équation de la chaleur se fait de surfaces à surfaces sans l'intervention de coefficients d'échanges superficiels.

4.1.3. Intégration des facteurs réponses dans le bilan thermique de surface

On reprend l'équation 26 et l'équation 28. Les séries de facteurs réponses sont tronquées selon la précision requise par l'utilisateur. On développe φ_{COND} sous la forme d'un produit de convolution entre les températures de surfaces à l'instant présent et aux instants précédents et les facteurs de réponses de la paroi :

$$h_{conv}^{local} \cdot \left(T_{SE} - T_{air}\right) + \varphi_{GLO}^{net} - \alpha_{SOL} E_{SOLAIRE} = \left(Y_1\, T_{SI} + \sum YT_{SI} - Z_1 T_{SE} - \sum ZT_{SE}\right) \qquad \text{Équation 35}$$

Avec Y_1 et Z_1, les premiers facteurs de réponses de la paroi observée, et ZT_{SE} et YT_{SI} des termes constants dépendants des N-1 températures de surfaces intérieures et extérieures précédentes et des N-1 valeurs de facteurs réponses :

$$YT_{SI} = \sum_{j=2}^{N} Y_j T_S^{\mathrm{int}}\left(N - j\right) \quad et \quad ZT_{SE} = \sum_{j=2}^{N} Z_j T_S^{ext}\left(N - j\right) \qquad \text{Équation 36}$$

A la surface intérieure on obtient :

$$h_g.\left(T_{SI} - T_{RS}^{INT}\right) = Y_1 T_{SE} + YT_{SE} - X_1 T_{SI} - XT_{SI} \qquad \text{Équation 37}$$

Avec YT_{SE} et ZT_{SI}, la somme des facteurs de réponses d'ordre supérieur multipliés par les températures de surfaces aux instants antérieurs:

$$YT_{SE} = \sum_{j=2}^{N} Y_j T_S^{ext}\left(N - j\right) \quad et \quad XT_{SI} = \sum_{j=2}^{N} X_j T_S^{\mathrm{int}}\left(N - j\right) \qquad \text{Équation 38}$$

Les transferts de chaleur vers le local sont comptés positivement alors que celui vers l'extérieur sont comptés négativement. Ce modèle nous a servi à étudier le potentiel de réduction de l'apport énergétique à un local en fonction du flux de chaleur conduit dans une toiture

pour différentes absorptivités solaires à La Rochelle. Les consignes pour T_{RS} intérieure ont été fixées à 22°C en été et 20°C en hiver (non conforme à la RT2005) afin d'augmenter virtuellement les besoins en climatisation du local qui sinon auraient été quasi-inexistants pendant l'été.

4.1.4. Application à l'influence de la réflectivité solaire sur le flux gagné par une paroi horizontale

Trois absorptivités solaires différentes ont été étudiées, faisant chacune référence à des couleurs couramment utilisées, alors que l'émissivité aux grandes longueurs d'ondes a été conservée fixe avec une valeur de 0,9. La première absorptivité, de valeur 0,95 correspond à une surface peinte avec un noir mat, la valeur 0,75 est attribuée à une surface de ton équivalent avec des propriétés cool alors que l'absorptivité 0,15 est la valeur minimale qu'une surface recouverte d'un revêtement blanc standard du commerce peut atteindre. Les gains nets représentent les économies d'énergie réalisées au cours d'une année entre les gains occasionnées sur la climatisation et les pertes liées au chauffage. Dans les graphes qui vont suivre, la température de l'air extérieur, le rayonnement solaire global et la température effective du ciel sont des mesures instantanées effectuées sur le banc météorologique de toiture (chapitre 2).

Période de climatisation

La période estivale utilisée s'étend du 1er mai 2009 au 10 octobre 2009, la température ambiante moyenne fut de 18,9°C avec un maximum à 32,8°C et un minimum de 8,5°C. La température du ciel présente une valeur moyenne sur cette période de 7,4°C, et une amplitude de 32,0°C. Les données d'entrées du modèle pour le premier jour ont été recopiées plusieurs fois en début de simulation afin d'obtenir une mise en régime du mur et des conditions stables. L'évolution de la température des surfaces intérieures et extérieures pour les 3 configurations choisies est présentée pour la toiture en béton d'épaisseur 12cm pour la période de 11 au 17 aout 2010 (Figure 113) qui semble être la semaine la plus chaude de l'été 2009. L'ensoleillement global sur la toiture et la température de l'air extérieur sont également tracées sur le même graphique en guise d'indication des variables d'excitations.

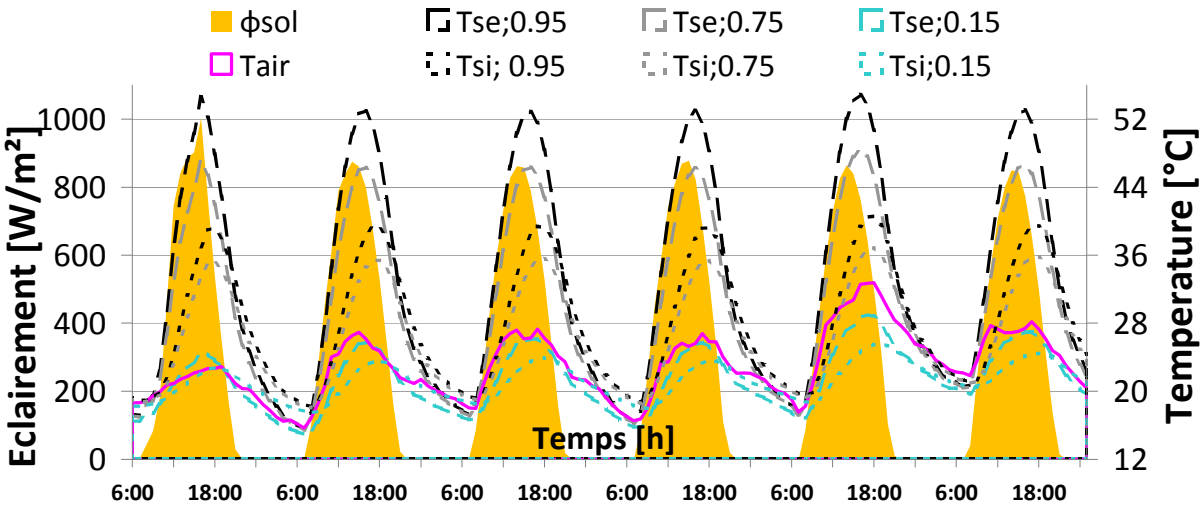


Figure 113 : Évolution des températures de surfaces intérieures et extérieures en fonction du temps pour les 3 configurations de réflectivité solaire pour une paroi de 12cm en béton

Sur l'ensemble de la période, les maximums atteints par la température de surface extérieure sont 58,2°C, 50,8°C et 29,7°C respectivement pour la surface noire, noire cool et blanche. La température moyenne s'élevant quand à elle à 27.9°C, 25,6°C et 18,7°C. La toiture béton atteint des températures très élevées à la surface intérieure avec respectivement 42,2°C, 38,3°C et 26,1°C comme valeurs maximales sur la période étudiée. L'impact de la réflectivité solaire, pouvant entrainer des écarts de température instantanés jusqu'à 8,5°C entre le noir et le noir cool et jusqu'à 34°C entre le noir et le blanc à la surface extérieure. On remarque également que les pics de températures aux surfaces extérieures et intérieures sont déphasés d'une heure entre la configuration blanche et la configuration noire (17 – 18h). La figure 114 relève l'influence des configurations sur le flux conduit à la surface intérieure du local pour la même période, la température d'air extérieur et de la température fictive du ciel sont également représentées.

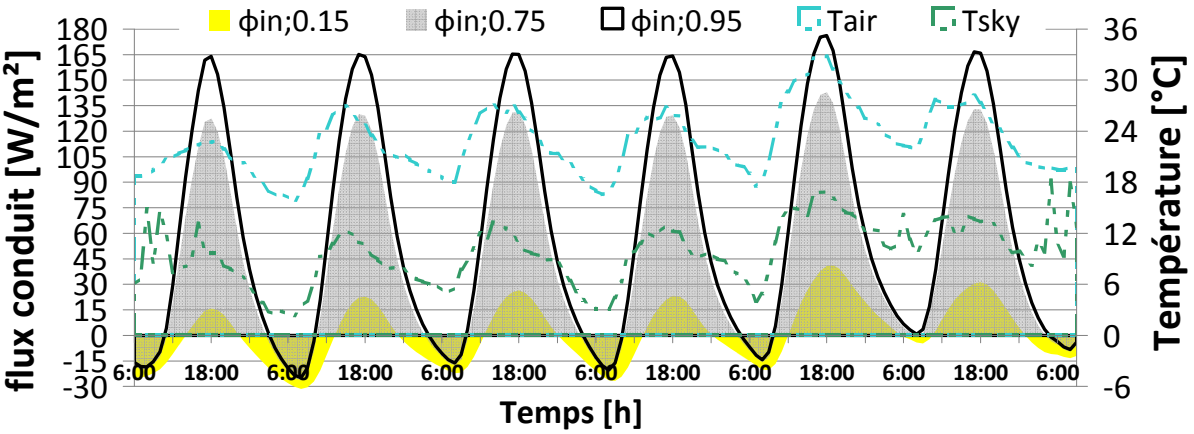


Figure 114 : Évolution des flux conductifs à la surface intérieure d'une toiture pour 3 configurations de réflectivité solaire pour une paroi de 12cm d'épaisseur en béton

Les flux négatifs indiquent que la température intérieure du local est haute et que le local perd de l'énergie, alors que le flux positif correspond à l'énergie nécessaire pour combattre les apports thermiques à la surface intérieure. Les résultats de la simulation sont restitués dans le Tableau 10. Au cours de la période estivale, la simulation montre que la densité d'énergie entrant dans le local et qui est susceptible d'entrainer une demande en climatisation pour une toiture non isolée peinte en noir peut être réduite de 95% (~- 160 kWh/m² de toiture) en configuration blanche et de 26% (~- 44 kWh/m² de toiture) en configuration cool de ton équivalent (noir). De même le flux surfacique maximal pénétrant par m² de toiture peut être diminuée respectivement de 76% et 19%.

Tableau 10 : Valeurs des flux conduits vers le local par m² de toiture en été pour les 3 absorptivités solaires pendant les 158 jours simulés

Absorptivité solaire	**0,95**	**0,75**	**0,15**
Densité de flux moyenne (W/m²)	38,4	25,8	-12,7
Densité de flux maximale entrante (W/m²)	191,0	155,3	45,5
Demande d'énergie en froid (kWh/(m².période))	168,7	125,0	9,0

Période de chauffage

La période hivernale de chauffage a été définie du 15 octobre 2008 au 25 mars 2009, la température ambiante moyenne fut de 7,7°C avec un minimum à -7,2°C et un maximum de 21,7°C. La température du ciel présente une valeur moyenne sur cette période de -3.4°C, et un minimum à -27,1°C. La figure 115 représente l'évolution des températures de surface et du flux solaire incident sur la toiture pour la période du 5 au 11 janvier, on y retrouve la température d'air minimale de l'année, de plus les deux premières journées sont couvertes avant de laisser place à une semaine relativement ensoleillée.

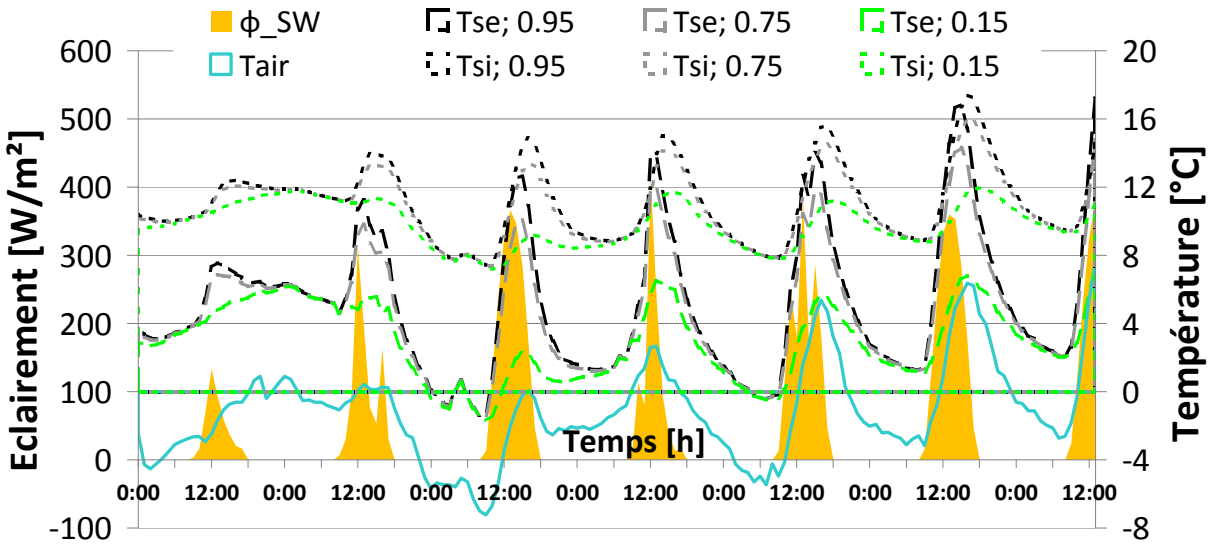


Figure 115 : Évolution hivernale des températures de surfaces intérieures et extérieures en fonction du temps pour les 3 configurations de réflectivité solaire pour la paroi béton

Cette figure illustre la réalité des pertes énergétiques d'un local par conduction dans une toiture non isolée selon la réflectivité solaire de sa surface. En effet, pendant l'hiver, la réduction des apports solaires gratuits par l'enveloppe sont réduits les jours de beau temps avec des températures de surface pouvant être jusqu'à 22,5°C inférieures pour la configuration blanche et jusqu'à 5,6°C pour la configuration cool. Mais, à La Rochelle, la période hivernale est caractérisée par des ciels couverts et de nombreuses précipitations, pendant ces épisodes, les apports solaires s'en trouvent fortement réduits. La différence moyenne de température de surface calculée pour les 2 configurations cool face à la configuration noire était respectivement de 2,9°C et 0,7°C. Cette tendance est confirmée par l'évolution des flux d'énergie entrants et sortants à la surface intérieure du local qui sont représentés dans la figure 116.

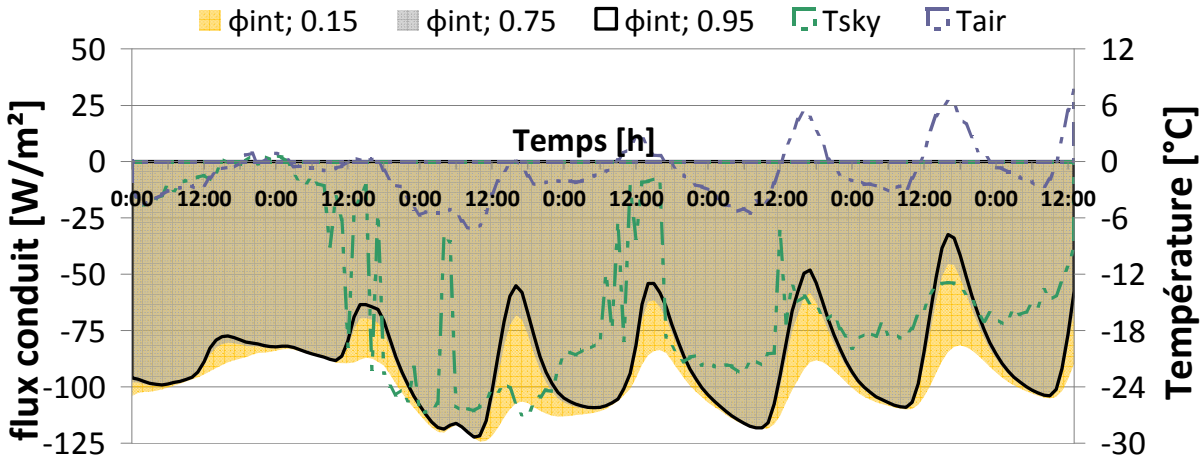


Figure 116 : Évolution hivernale des flux conductif entrant à la surface intérieure d'une toiture pour 3 configurations de réflectivité solaire pour une paroi de 12cm d'épaisseur en béton

L'impact négatif des peintures cools sur les apports à la surface intérieure induits par le cycle solaire et le climat pendant l'hiver est résumé dans le Tableau 11. On doit aussi remarquer que le pic de d'énergie perdu pour les locaux est localisé pendant la nuit entre 2 et 9 h du matin.

Tableau 11 : Valeurs des flux conduits par m² de toiture à la surface intérieure pour les 3 configurations lors de la période d'hiver (159 jours)

Absorptivité solaire	**0,95**	**0,75**	**0,15**
Densité de flux moyenne (W/m²)	-57,6	-45	-40,8
Densité de flux maximale entrante (W/m²)	87,1	64,7	10,6
Demande d'énergie chauffage (kWh/m².période)	-166,3	-177,4	-223,2
Demande d'énergie nette (kWh/m².an)	335	302	232

Les pertes pour les toitures blanches et cool estimées par m² de surface pendant l'hiver à La Rochelle sont estimées respectivement à 34% (~57 kWh/m²) et 6,7% (~11 kWh/m²) comparées au revêtement noir. En étudiant les gains nets sur l'année de climatisation / chauffage, on s'aperçoit que les économies d'énergie sont positives si l'on considère l'utilisation d'un système de rafraîchissement mécanique, ce qui n'est pas forcément nécessaire à La Rochelle, avec respectivement 44% (103 kWh/m².an) et 14% (32 kWh/m².an).

Effet de l'isolation thermique

Les toitures en France sont généralement isolées par l'intérieur et comme vu dans le chapitre bibliographique, la résistance de la paroi diminue la performance énergétique associée à la réflectivité solaire des surfaces extérieures. Nous avons choisi d'isoler la paroi d'origine par 12 cm d'isolant afin d'atteindre une résistance thermique de 3,45K.m²/W conseillée par la RT2005 pour les toitures terrasses en dalle béton armé. Comme le montrent les valeurs reportées dans le tableau 12, les apports d'énergie au local sont nettement plus faibles qu'avec la toiture sans isolation, les revêtements les plus réfléchissants occasionnent toujours un gain sur les besoins en climatisation pendant l'été et une augmentation des pertes en hiver.

Tableau 12 : Valeurs des flux conduits pour la toiture isolée

Absorptivité solaire	**0,95**	**0,75**	**0,15**
Demande d'énergie froid (kWh/m².période)	10,2	7,3	0,4
Demande d'énergie chauffage (kWh/m².période)	10,9	11,8	15,1
Demande d'énergie nette (kWh/m².an)	21,1	19,1	15,5

Cependant, les gains comparés entre les différentes solutions de réflectivité solaires de surface restent sensiblement les mêmes. Les besoins énergétiques annuels sont ainsi diminués de 26,5% pour la solution blanche et 9,5% pour la toiture cool d'aspect noir. Ces gains sont très faibles en valeur absolue pour de petites toitures sur des bâtiments résidentiels et l'utilisation des revêtements réfléchissants sera économiquement rentable sur des bâtiments de type supermarchés.

L'isolation de la toiture entraîne en revanche une augmentation de la température de surface extérieure pendant l'été ce qui a pour résultat d'augmenter l'échange de chaleur convectif avec l'air extérieur. Cette tendance est illustrée dans la figure 117 où les températures de la toiture pour la configuration toiture béton et la configuration avec isolation intérieure sont réunies pour les revêtements noir et blanc.

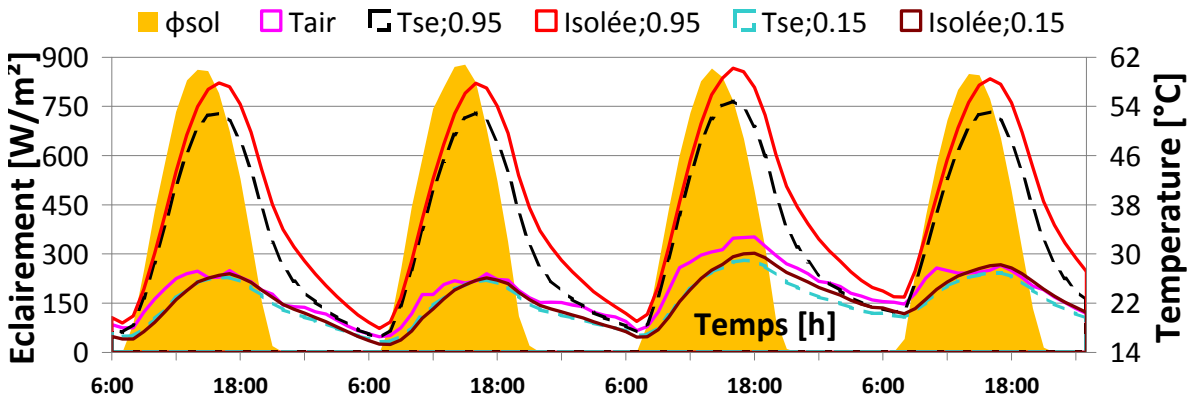


Figure 117 : Comparaison des températures de toitures avec et sans isolation pour 2 valeurs de réflectivité solaire pendant l'été

La différence de température entre la toiture isolée et non isolée est beaucoup plus importante pour le revêtement à forte absorptivité. Les températures maximales et moyennes atteintes par les toitures selon leur absorptivité solaire sont reportées dans le tableau 13.

Tableau 13 : températures de surface pour des toitures isolées et non isolées en été et en hiver

Absorptivité solaire	**0,95**		**0,75**		**0,15**	
Isolation	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non
T_S max été (°C)	62,8	58,2	55,1	50,8	31,1	29,8
T_S moyen été (°C)	30,1	27,9	27,1	25,6	17,9	18,7
T_S max hiver (°C)	41,4	40,7	34,8	34,9	15,2	17,7
T_S moyen hiver (°C)	10,1	12,7	9,0	11,9	5,7	9,5

On s'aperçoit en effet que sur la période d'été, la température moyenne de surface pour la toiture isolée est plus élevée que pour la toiture simple, de 1,5°C pour la peinture cool, de 2,2°C pour la peinture noire et elle est plus fraîche de 0,8°C pour la peinture blanche. Les températures maximales, quant à elles sont plus élevées pour les 3 absorptivités solaires simulées, soit une augmentation de 1,3°C, 4,3°C et 4,6°C. En été, ces différences de température montrent que les bâtiments isolés participent d'avantage à l'ICU. Pendant l'hiver la tendance sur les températures moyennes est inversée mais avec des températures maximales de 0,7°C (toiture noire) à 2,5°C (toiture blanche) plus chaudes pour la configuration non isolée. Cette inversion

étant due principalement aux déperditions par conduction de l'énergie de chauffage qui sont atténuées en cas de présence d'un isolant. Pendant l'hiver, les toitures isolées participeraient donc moins à l'effet d'ICU du fait d'une moindre dissipation de la puissance de chauffage utilisée par les parois.

En conclusion de cette étude menée avec le modèle de paroi, on a donc réalisé une estimation prévisionnelle des gains nets sur la consommation énergétique sous le climat Rochelais pour les toitures cool. Les gains sont faibles car les besoins en climatisation ne sont pas élevés pour une ville côtière comme La Rochelle. De plus, si la température de consigne été n'avait pas été abaissée (25°C→22°C), la réduction obtenu aurait probablement été négligeable. On remarque néanmoins que la modification de l'absorptivité solaire peut moduler la température de surface et donc l'importance les apports convectifs à l'air urbain. Pour estimer les effets combinés de la réduction des apports directs (flux conduit) et indirects (réduction de T_{air}) par l'utilisation de surfaces réfléchissantes, sur la demande énergétique, il est nécessaire d'utiliser un logiciel couplant les bâtiments et leur microclimat environnant.

La suite de l'étude s'est focalisée sur l'estimation des effets des propriétés radiatives sur les parois verticales d'un milieu urbain densément bâti sur la demande énergétique des bâtiments. Dans cet environnement, il existe de nombreuses interactions entre le bâtiment observé et l'environnement alentour, notamment le piégeage radiatif, le confinement thermique et les apports anthropiques. Pour simplifier l'étude, nous avons choisi d'étudier ces effets dans une rue canyon, unité morphologique représentative du milieu urbain dense, déjà utilisée sur la plateforme expérimentale, qui est idéale pour mettre en valeur la contribution des 3 phénomènes cité

4.2. Modélisation couplée de l'impact de la réflectivité des parois verticales d'une rue canyon sur les températures de l'environnement extérieur et les consommations énergétiques

Les logiciels classiques de simulations thermiques du bâtiment (Codyba, TRNSYS, EnergyPlus…) ne peuvent pas être utilisés tels quels pour estimer les effets couplés des propriétés radiatives sur la demande énergétique annuelle dans une rue canyon. En effet, les données

d'entrées et les hypothèses de ces modèles ne correspondent pas aux phénomènes à observer dans ce cas particulier. Dans la modélisation, on peut citer comme responsable du biais :

- L'utilisation de la température météorologique régionale exempte de l'effet du microclimat urbain. L'évolution dynamique de la température de l'air extérieur à cause des transferts de chaleur convectifs avec les surfaces ne sont pas modélisés. De plus, les vitesses d'écoulement étant modifiées par la configuration spéciale des bâtiments mériteraient sans-doute un affinement des coefficients d'échange convectif aux surfaces.
- La mise en œuvre de masques sur le rayonnement solaire qui ne sont effectifs que sur le rayonnement direct, alors que le rayonnement diffus n'est pas perturbé par ces masques et que les inter-réflexions dans le canyon ne sont évidemment pas prises en compte. De même, les échanges radiatifs GLO avec les autres éléments de la scène urbaine ne sont pas calculés

La quantité de paramètres et la période d'étude (2 saisons été / hiver) nous incitent à utiliser un outil disposant d'une durée de calcul raisonnable. Pour ces raisons, j'ai choisi d'utiliser le modèle SIMCANYON, introduit dans l'étude bibliographique (partie 1.2), qui était disponible au LEPTIAB. Ce code numérique permet le couplage des interactions entre le microclimat urbain, le bâti et la demande énergétique dans une rue canyon (Bozonnet 2005).

4.2.1. Description du modèle

Grâce à ce modèle, Bozonnet a pu mettre en évidence l'effet de la production de chaleur anthropique liée à l'utilisation de systèmes de climatisation en période estivale ; lequel peut être un facteur significatif de l'amplification de l'îlot de chaleur (Bozonnet et al. 2007). L'évaluation des charges énergétiques du bâtiment ne requiert pas une précision des écoulements du type code fin dynamique. A l'image du modèle simplifié utilisé pour des rues canyons, le couplage des phénomènes est réalisé dans un modèle zonal. Les phénomènes couplés modélisés dans ce code sont donc (Figure 118):

- Les mécanismes de l'écoulement, résolus par le modèle zonal.
- Le rayonnement solaire est préalablement calculé par le logiciel SOLENE (méthode des radiosités) – logiciel de simulation d'ensoleillement, d'éclairement et de rayonnement thermique – développé par l'école d'architecture du CERMA à Nantes

- Les échanges radiatifs GLO sont résolus par une méthode des enceintes fictives modifiée (Bozonnet et al. 2005) adaptée au milieu extérieur
- Les vents dominants, par un algorithme donnant vitesse et direction de l'écoulement à l'intérieur du canyon sur la base de données météorologiques à méso-échelle.
- La conduction dans les parois et le sol est décrite par des modèles réduits (type RC).
- Les locaux situés à l'intérieur des bâtiments sont simulé à partir d'un modèle nodal simple nœud similaire à celui décrit dans le paragraphe 4.1.1 avec une branche supplémentaire représentant les déperditions par ventilation.
- Le bilan énergétique aux surfaces extérieures est aussi décrit de la même manière que dans le paragraphe 4.1.1.

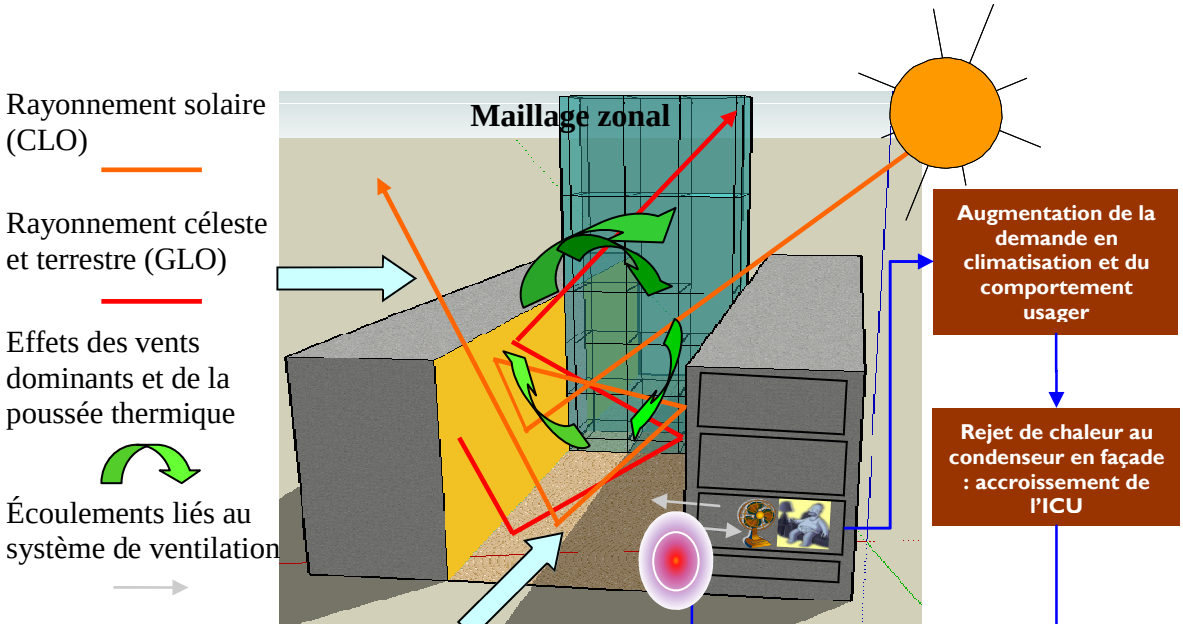


Figure 118 : Schéma des phénomènes couplés dans le modèle de rue canyon

La vitesse et la direction de l'écoulement d'air dans le canyon provoqué par les vents dominants mesurés au dessus de la canopée urbaine sont calculées à partir d'équations semi-empiriques (Bozonnet 2005). Celles-ci n'étant valables que dans le cas de ratios d'aspect géométrique susceptibles de développer un écoulement de type « rasant » avec un vortex dans le cas de vents orientés perpendiculairement à l'axe du canyon (*H/W* supérieur à 0,54). Les flux aéraulique à l'intérieur de la rue canyon sont décrits par un modèle zonal en différence de pression, où les phénomènes moteurs sont les différences de températures aux parois du mo-

dèle et les vitesses du vent locales. Les coefficients de convection surfacique sont calculés grâce aux vitesses de l'air aux parois de la rue. L'effet anthropique lié à l'utilisation de système énergétique de rafraîchissement peut être pris en compte par l'implantation de source de chaleur ponctuel dans les volumes d'air décrit par le modèle zonal. Le modèle peut être considéré comme bidimensionnel puisque les conditions aux limites sont symétriques.

La description de l'enveloppe des bâtiments se limite aux parois internes du canyon, les apports énergétiques aux toitures ne sont pas inclus dans l'équation de bilan des locaux. De la même manière qu'au paragraphe 4.1.1, l'ambiance des locaux est décrite par une température résultante fixée, la modélisation de la toiture n'est donc pas indispensable car elle nous permet de se focaliser sur l'influence des propriétés radiatives des façades à elles seules.

4.2.2. Description du cas d'étude : paramètres de simulation

Les corrélations semi-empiriques définissant l'écoulement d'air dans le canyon provoqué par les vents dominants en toiture ont été validées pendant le projet Européen URBVENT par une campagne expérimentale in situ (Bozonnet et al. 2007;Georgakis et al. 2006; Georgakis et al. 2008) sur 5 canyons dans la ville d'Athènes. Afin de conserver cette validité aéraulique, nous avons choisi d'étudier l'effet de la configuration des propriétés radiatives aux surfaces du canyon dans l'une de ces rues.

Choix d'un environnement urbain

La rue Dervenion à Athènes (37°58 N, 23°47 E) mesure 23 m de haut, 7 m de large pour 200m de long, ce qui lui confère un ratio d'aspect *H/W* égal à 3,3. La longueur, suffisamment grande comparée aux autres dimensions, permet l'hypothèse de l'absence d'effet de bords au milieu de la rue. La rue est orientée à 327° au nord, avec des façades faisant faces au sud-ouest et au nord-est. La géométrie de la rue est simplifiée à son maximum avec des façades verticales planes et lisses, dépourvues de vitrages.

Propriétés radiatives conférées aux surfaces de la rue

Dans cette étude, le ton des peintures ainsi que leur propriétés radiatives ont été choisis dans la palette de revêtements « cool » développée à l'université d'Athènes (Synnefa et al. 2007). Cinq aspects surfaciques ont été retenus pour les murs, et trois pour la chaussée. La **rue témoin** est composée de murs en béton et d'une chaussée pavée en grés clairs (rue piétonne).

Deux stratégies ont été conduites pour des revêtements blancs et aluminium, une avec les peintures appliquées uniquement aux murs en conservant la chaussée d'origine, et la seconde où l'ensemble de la rue canyon a été recouverte. Les 2 dernières configurations concernent une peinture standard et son équivalent « cool » dans un ton orange vif qui ont été appliquées uniquement aux façades. Le tableau 14 présente les valeurs des coefficients radiatifs utilisés dans nos configurations de la rue canyon.

Tableau 14 : propriétés radiatives des revêtements et matériaux utilisés

Peinture/ matériel	**aspect**	ρ_{solar}	α_{solar}	ρ_{IR} **(>2.5µm)**	ε_{IR} **(>2.5µm)**
Basse émissivité	Aluminium	0.75	0.25	0.51	0.49
pigments réflectifs dans les NIR	blanc	0.83	0.17	0.09	0.91
pigments réflectifs dans les NIR	orange	0.63	0.37	0.12	0.88
Pigments Normaux	orange	0.53	0.47	0.12	0.88
Murs en béton	gris	0.2	0.8	0.1	0.9
Carreaux de grès	Blanc sale	0.4	0.6	0.1	0.9

Les choix de revêtements proposés permettent d'envisager l'estimation de leur impact sur les performances qui pourraient être atteintes par une stratégie extrême (la peinture blanche présente les valeurs maximum atteignables en termes de réflectivité solaire). De plus, cela peut donner un aperçu du comportement des peintures à basse émissivité dans le domaine des GLO (aluminium) et enfin sur la comparaison des performances d'un produit « cool » par rapport à son binôme de conception traditionnelle et de même ton. Synnefa et al. (2006) ont fabriqué 14 peintures « cool » dont la réflectivité solaire sur le spectre 0,4 -2,5µm a augmenté de 5 et 440% par rapport aux peintures standards de tons équivalents. Dans le cas du ton orange utilisé pour le cas d'étude, l'addition de pigments inorganiques complexes a permis d'augmenter la réflectivité solaire de la peinture de 19%.

Matériaux

Les murs externes ont été modélisés en béton banché sans isolation, construction identique à de nombreux bâtiments à Athènes, avec une conductivité thermique de 1,75 W/m.K, une diffusivité thermique de $0{,}792.10^{-6}$ m²/s et une épaisseur de 0,12m. On n'a pas considéré de vitrages sur les façades, cependant il est nécessaire de faire remarquer la part importante qu'ils

ont habituellement dans les charges en climatisation et en chauffage nécessaire au conditionnement des locaux. Il s'agit d'une approche initiale qui va permettre la validation du bilan énergétique effectué sur un cas simplifié de modélisation des interactions entre l'enveloppe et le microclimat à l'échelle de la rue. Le sol est modélisé avec une température constante prise à 1m de profondeur et la conduction thermique est régie par un modèle RC renseigné par les caractéristiques thermiques du sous-sol. Les valeurs des émissivités aux grandes longueurs d'ondes sont aussi renseignées par surface pour permettre l'établissement du bilan d'échanges radiatifs dans le canyon et avec la voûte céleste.

Description des locaux

Le taux de renouvellement d'air a été fixé à 0,5 volume par heure. L'influence des usagers n'a pas été prise en compte et donc il n'y a pas de gains internes dans les locaux. Les températures de consignes ont été fixées arbitrairement à 25°C et 21°C, et le chauffage et la climatisation n'ont pas été autorisés hors de leurs périodes d'utilisation respectives. L'énergie absorbée par l'évaporateur du système de climatisation pour rafraîchir les locaux durant la période estivale est considérée égale à l'énergie rejetée au condenseur du système (système split). Ce phénomène reconnu comme source anthropique alimentant l'ICU est modélisé par une redistribution de la puissance demandée sur la façade extérieure du local. Pendant l'hiver, le chauffage des locaux est assuré par des radiateurs connectés à une chaudière commune, et la source de chaleur à l'extérieur n'a pas lieu d'être.

Données climatiques

La vitesse et la direction du vent utilisées comme vent de référence au dessus de la canopée, ainsi que la température de l'air proviennent de mesures effectuées à la station météorologique la plus proche, mise en place par le groupe de recherche de l'ITIA[15] à université d'Athènes. La station météorologique est située à peu près 5 km à l'ouest de la rue Dervenion.

[15] http://meteo.ntua.gr/

4.2.3. Répartition des éclairements solaires absorbés selon la configuration des propriétés radiatives dans la rue Dervenion

Pour une interprétation simplifiée, l'étude sera focalisée sur une bande d'1m de large dessinée au centre du canyon rue canyon. Dans cette bande, les façades ont été divisées en 4, avec 3 facettes de 7.5m² et une facette de 0.5m² en bas, le sol a lui été divisé en 5, avec 3 facettes de 2m² et 2 facettes de 0.5m² jouxtant les façades. Les données de rayonnement solaire incident ont été modélisées avec l'un des différents modèles de ciel existant dans le logiciel SOLENE (Antoine et al. 1998), nous avons choisis de modéliser un ciel clair grâce au modèle de Perez. Ce choix est représentatif d'un ensoleillement maximal hiver comme été, les véritables performances concernant l'énergie solaire absorbée sur la saison par chaque configuration doit être minimisée en admettant des jours de ciels couverts.

Évolution journalière

Sur la figure 119, on peut voir l'évolution journalière estivale de l'éclairement solaire absorbé par la façade exposée Nord-est en configuration « murs + chaussée blancs » et en configuration « témoin » examinée selon la position des surfaces sur l'axe de la hauteur.

Rue témoin - été – façade NE **rue blanche - été – façade NE**

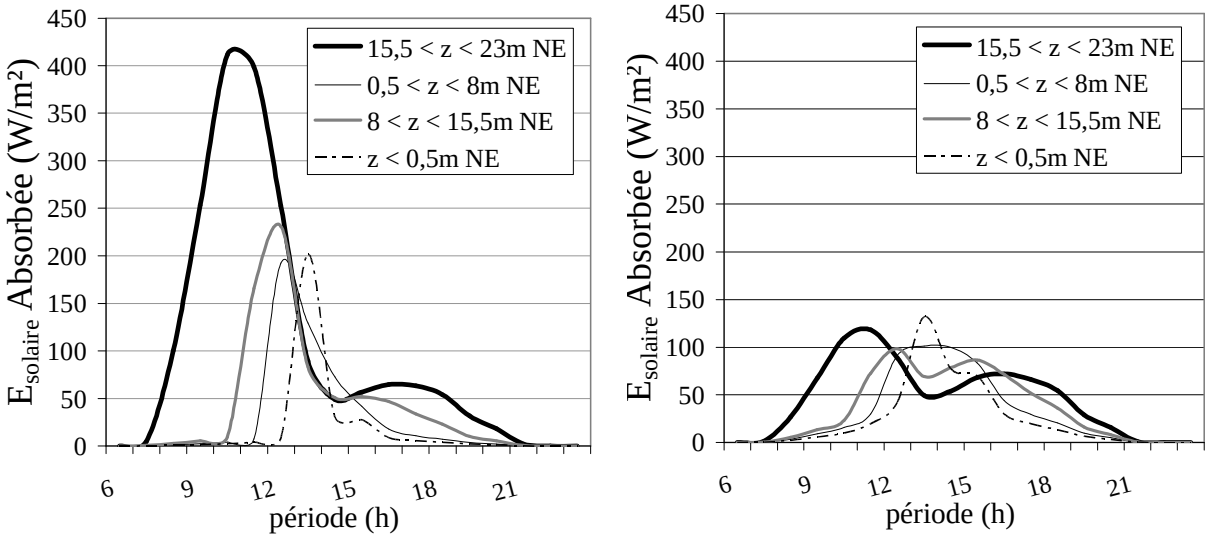


Figure 119 : Éclairement solaire absorbé sur le mur orienté NE selon la position de la facette étudiée pour le 8 juillet 2001.

On constate que les surfaces réfléchissantes de la « rue blanche » réduisent le pic de rayonnement direct absorbé. Lors de l'exposition du mur NE au rayonnement solaire direct (abscisse 7h00 à 15h00), cette part de l'éclairement absorbée est fortement atténuée. Pour la surface la plus haute du canyon, la réduction constatée du pic de puissance solaire absorbée est de l'ordre de 70% (~300W/m²), de 56% à la moitié de la façade et de 50% sur le bas de la façade (~100W/m²). Par contre, le pic augmente pour la surface jouxtant la chaussée ce qui est dû à la réflectivité accrue du sol par rapport à la configuration témoin qui multiplie les réflexions et absorptions du rayonnement solaire diffusé entre les surfaces. Entre les abscisses numérotées 15h00 à 21h00, on voit apparaître un second pic modulé par l'absorption du rayonnement diffus provenant de l'éclairement direct de la façade opposée. Dans le cas de la configuration « rue blanche », celui-ci est conservé et même amplifié progressivement en descendant sur la façade. En effet, pour la facette située entre 8 et 15.5m, le pic dû au diffus augmente de 40 W/m² alors que la facette située entre 0.5 et 8m ne présente pas de pics diffus et direct bien distincts.

Lorsque les façades et la chaussée sont blanches, le pic d'absorption dû au diffus s'installe légèrement plus tôt que pour la configuration témoin. Aussi, la facette du bas de la façade présente une légère expansion de sa base, qui correspond à une augmentation de la période où l'énergie solaire incidente est absorbée. Si une importante réduction de la part absorbée du rayonnement direct est constatée, l'augmentation majeure est due à la croissance de la part du rayonnement diffus (150%) provenant principalement du flux solaire réfléchi par la chaussée.

La façade SO est exposée aux mêmes tendances que celles observées sur le mur orienté NE. Le pic de diffus correspondant exactement au pic dû au rayonnement direct sur l'autre façade. L'amplitude du flux total absorbé par facette liée au pic de direct est un peu plus élevée alors qu'au contraire le pic lié au diffus est moins prononcé ce qui s'explique par son orientation plus propice à la réception du flux d'énergie solaire. On peut observer sur la figure 120, l'évolution journalière de l'éclairement solaire absorbé par la surface totale de la chaussée et de chaque façade de la rue canyon pour un jour d'été (8 juillet 2001).

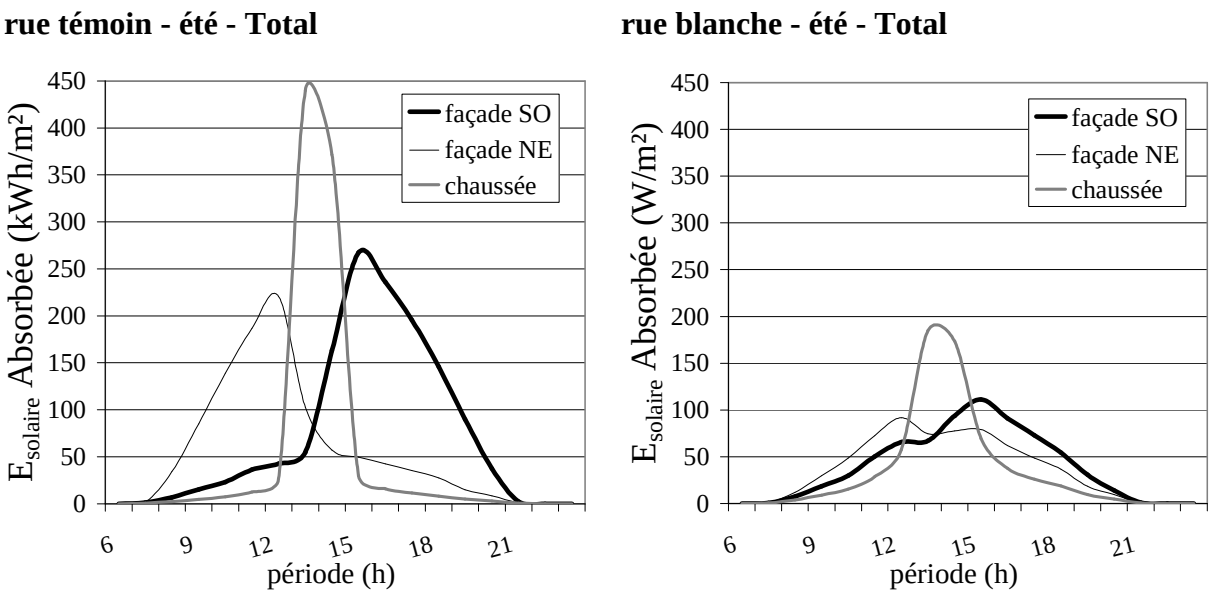
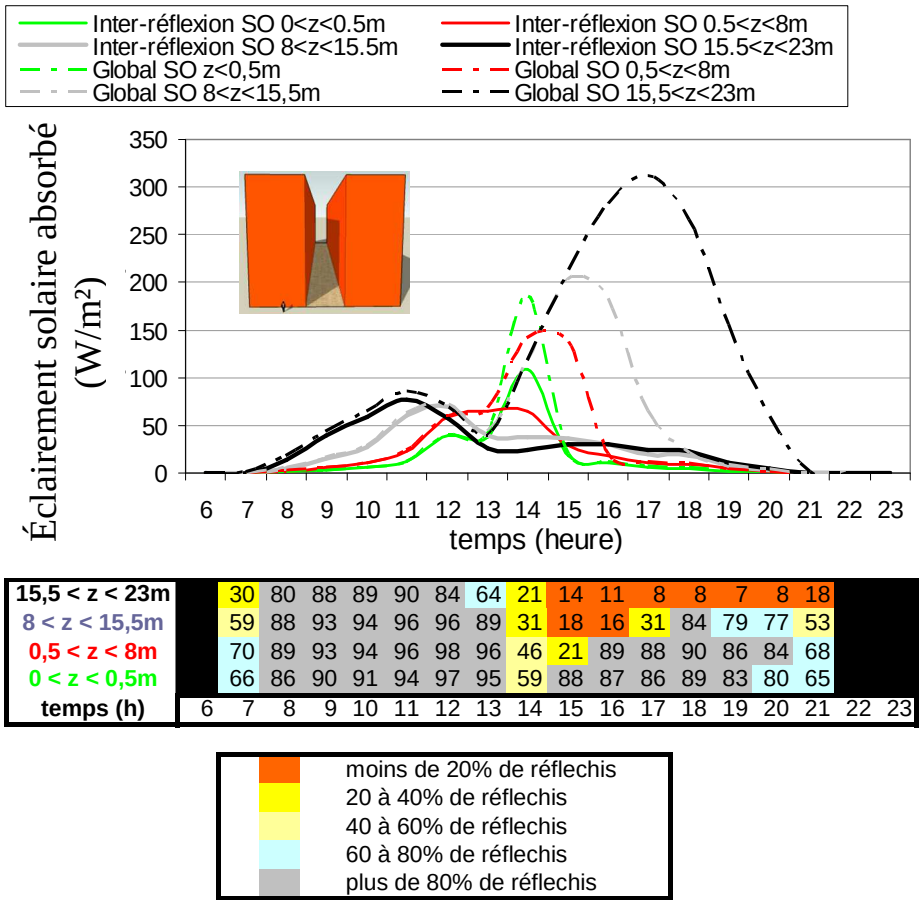


Figure 120 : Éclairement solaire absorbé par les surfaces de la rue canyon en été

La stratégie “rue blanche” lisse les contributions dues aux rayonnements direct et réfléchis, au final le pic d’éclairement solaire absorbée lors de l’ensoleillement direct de la façade et lors de son ensoleillement diffus (par inter-réflexions) sont pratiquement d’amplitudes égales. Les gains dus au direct ont diminué alors que ceux dus aux inter-réflexions ont augmenté, on peut alors faire l’hypothèse que la stratégie « rue blanche » entraînera une diminution de la température de surface des façades lors de leur ensoleillement direct et une légère augmentation lors du pic dû aux inter-réflexions.

Contribution des inter-réflexions

La contribution des inter-réflexions à l’éclairement solaire absorbé pour la configuration orange standard est observée pour les 4 facettes constituant la façade Sud-ouest (Figure 121). L’éclairement solaire total absorbé est représenté en ligne pointillée alors que la part liée aux seules inter-réflexions est en ligne continue. L’aire située entre ces 2 courbes pour chaque surface représente l’énergie absorbée lors de la première réflexion de l’éclairement solaire incident. Le diagramme coloré en dessous de la figure représente le pourcentage horaire de contribution des inter-réflexions à l’éclairement solaire absorbé.



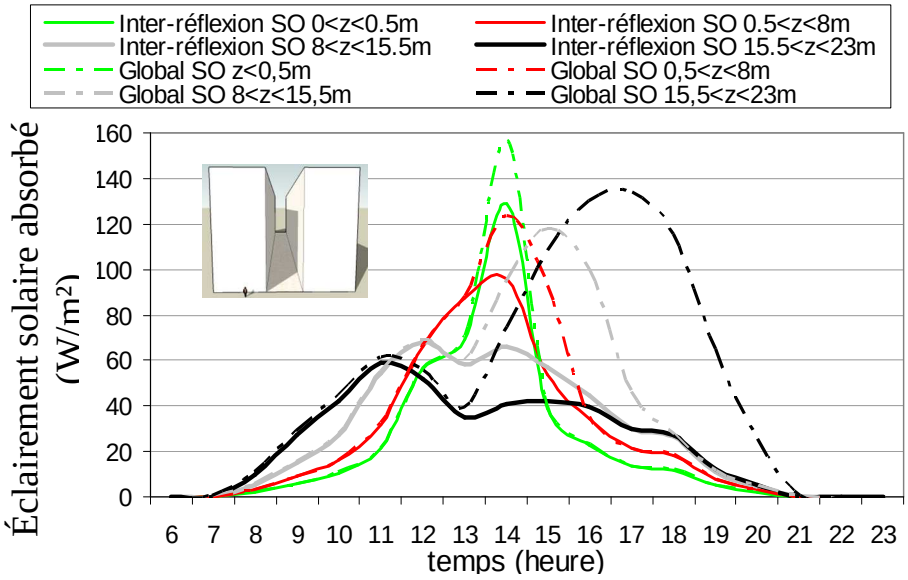
15,5 < z < 23m		30	80	88	89	90	84	64	21	14	11	8	8	7	8	18	
8 < z < 15,5m		59	88	93	94	96	96	89	31	18	16	31	84	79	77	53	
0,5 < z < 8m		70	89	93	94	96	98	96	46	21	89	88	90	86	84	68	
0 < z < 0,5m		66	86	90	91	94	97	95	59	88	87	86	89	83	80	65	
temps (h)	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

- moins de 20% de réflechis
- 20 à 40% de réflechis
- 40 à 60% de réflechis
- 60 à 80% de réflechis
- plus de 80% de réflechis

Figure 121 : Répartition modélisée de l'éclairement solaire absorbée lors de la première incidence et après inter-réflexions pour la rue orange standard au 16 juillet par ciel clair

Dans ce cas précis de canyon (*H*/*W*=3,3), en façade SO, pour les 4 facettes, le pic de rayonnement diffus matinal est alimenté de 80 à 98% par les inter-réflexions.. Dans l'après midi, on voit que les facettes les plus basses sont principalement sollicitées par l'absorption des flux issus des inter-réflexions, même lorsqu'elles sont exposées au rayonnement direct, 21 à 59% de l'éclairement absorbé se fait après réflexions dans le canyon. Les facettes plus élevées voient leur absorption solaire être principalement approvisionnée par le rayonnement direct (avec 8 à 18% due aux inter-réflexions).

La part liée aux inter-réflexions dans le canyon augmentent si l'ensemble des surfaces ont une réflectivité élevée dans le spectre solaire, la figure 122 montre l'effet de la configuration rue blanche.



15,5 < z < 23m		51	89	93	94	95	93	87	55	39	30	22	24	19	22	37	
8 < z < 15,5m		82	96	97	98	98	98	97	69	48	45	65	96	94	93	80	
0,5 < z < 8m		91	97	98	99	99	99	99	77	58	98	97	98	97	96	90	
0 < z < 0,5m		93	97	98	98	99	99	99	82	98	98	97	98	97	96	92	
temps (h)	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

Figure 122 : Répartition modélisée de l'éclairement solaire absorbée lors de la première incidence et après inter-réflexions pour la configuration rue blanche au 16 juillet par ciel clair

Le matin, l'éclairement absorbé par les 3 facettes du bas est entièrement dû aux inter-réflexions. Puis entre 14h et 17h, si on observe la surface située entre 8 et 15,5m, les inter-réflexions contribuent de 45 à 69% de l'absorption d'énergie solaire contre moins de 30% pour la configuration orange. De même la facette la plus haute voit la contribution des inter-réflexions être multipliées par deux ou trois entre 15h et 21h pour une réflectivité solaire passée de 0,53 à 0,83 pour les façades et de 0,6 à 0,83 pour la chaussée. L'absorption de l'énergie solaire aux façades nord-est de ces deux stratégies présente une évolution similaire avec une importance encore plus accrue des inter-réflexions de part leur orientation.

Durant la période d'hiver, pour la stratégie orange standard avec la chaussée en grés, les angles solaires plus faibles entraînent une contribution plus faible des inter-réflexions à l'éclairement total absorbé et ce sur l'ensemble des surfaces. L'interprétation est la même pour toutes les configurations simulées. Dans le cas de la stratégie « rue blanche », le pic d'ensoleillement engendré par les inter-réflexions sur la façade NE dépasse celui dû au direct pour la facette du haut. Sur la façade SO, la facette du haut absorbe 72% d'énergie solaire

supplémentaire par rapport à toutes les autres facettes, ceci étant due à l'interaction entre la course du soleil et le ratio géométrique.

Potentiel saisonnier d'énergie solaire absorbée

La variation de la configuration des propriétés radiatives aux surfaces d'une rue canyon modifie le potentiel d'apports solaires aux façades des bâtiments en été comme en hiver. Les Figure 123a et 124b présentent la densité d'énergie solaire absorbée par facette sur la façade SO pour chaque configuration simulées une période de chauffage (21 décembre au 3 mars) et une période de climatisation (21 juillet au 1er octobre).

a) Période estivale **b) Période hivernale**

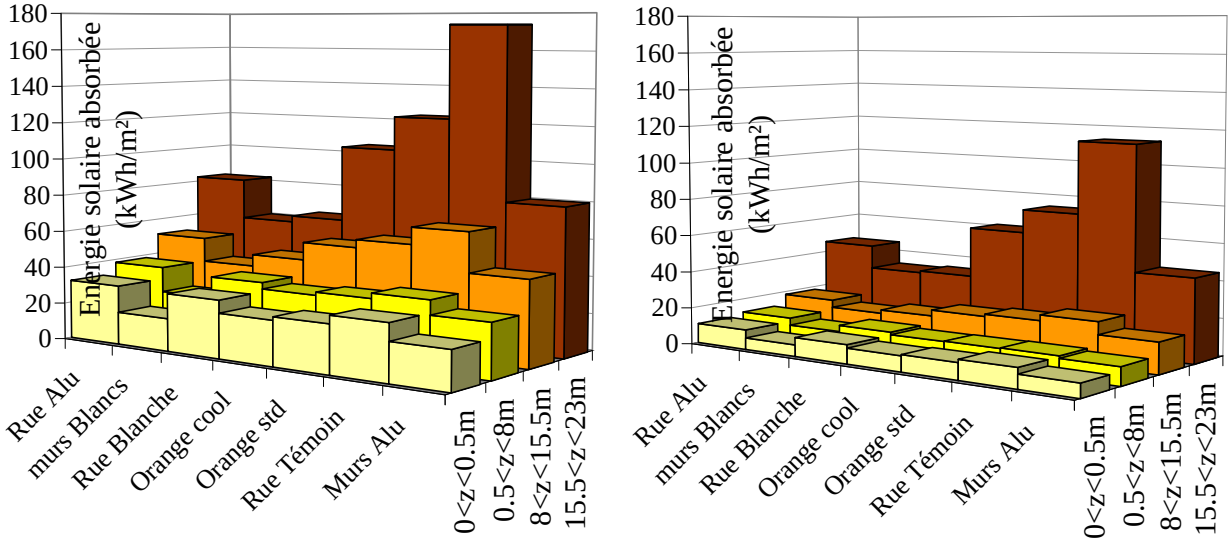


Figure 123 : Énergie solaire absorbé (kWh/m².72jours) par chaque stratégie en fonction de la position en altitude de la facette considérée sur la façade SO

Pour le ratio d'aspect étudie, les 2 premiers tiers de la façade SO absorbent en moyenne 37 (« rue blanche ») à 70% (rue témoin) moins d'énergie solaire que le haut de la façade en été et de 59 à 85% moins en hiver. Pour les rues profondes, la diminution des apports solaires par le traitement des façades sera donc essentiellement axée sur le haut de la rue dépendamment de sa morphologie et de son orientation. Par rapport à la rue témoin, le piégeage radiatif estival par la façade sud-est peut être diminué de 23 à 56%, respectivement pour les façades orange standard et blanches et de 29 à 62% en hiver.

Si on compare la densité d'énergie absorbée au cours de l'été par les 6 configurations par rapport à la rue témoin, on voit que :

- Elle augmente pour le premier tiers des rues où la chaussée est traitée (1 à 5%)
- Elle diminue pour le premier tiers de 8 à 33% pour les autres stratégies
- Elle diminue de 14 à 44%pour toutes les stratégies pour le 2ème tiers
- Elle diminue de 29 à 65% en haut de façade

La configuration où seules les façades sont peintes en blanc a le potentiel maximum de réduction d'apports solaires. Le produit cool permet une réduction de 4 à 15% de ce potentiel de bas en haut de la façade SO par rapport à la peinture orange standard. Le tableau 15 présente une comparaison entre la somme de l'énergie solaire absorbée par les deux façades pour les 6 stratégies comparée à notre configuration témoin pour les deux saisons définies.

Tableau 15 : pourcentage d'énergie solaire absorbée sur les 2 façades par chaque stratégie comparée à la rue témoin

stratégies	**Hiver**	**été**
Murs blancs	-52.4%	-50.9%
Rue blanche	-46.0%	-41.9%
murs basse E	-40.4%	-38.8%
Rue basse E	-35.4%	-31.6%
Murs Orange « cool »	-27.1%	-25.8%
Murs Orange « Standard »	-18.8%	-17.8%

La diminution du piégeage radiatif obtenu par l'application des différentes stratégies est légèrement plus importante en pourcentage lors de la période d'hiver que pendant la période d'été. Mais dans la configuration témoin, les 2 façades absorbent en tout 157 kWh/m² en été contre 67 kWh/m² en hiver (~45%).

4.2.4. Évolution de la température de surface

Les découpages des surfaces de la rue pour le calcul ont déjà été expliqués dans le paragraphe précédent. Les façades sont partagées en quatre surfaces, une petite bande jouxtant le sol correspondant à une zone critique pour les inter-réflexions et pouvant être considérée comme les

fondations du bâtiment. Puis trois bandes de 7,5m de haut pouvant chacune être considérée comme correspondante à deux étages et donc deux locaux superposés. Les figure 124 (a) and (b) illustrent les évolutions des températures sur les facettes basse (0,5 à 8m) et haute (15,5 à 23m) de la façade SO pour les 2 jours les plus chauds de la période estivale pour les sept variantes de configuration des propriétés radiatives aux surfaces de la rue (conférer tableau 14). Le pic journalier de température de l'air enregistré à la station météorologique se matérialise avant celui de la température des surfaces présentes à l'intérieur du canyon. La température reflète l'effet de l'inertie thermique massique du canyon, de l'absorption solaire et des rejets anthropiques qui participent au phénomène de microclimat dans le canyon.

0,5 à 8m (a) **15,5 à 23m (b)**

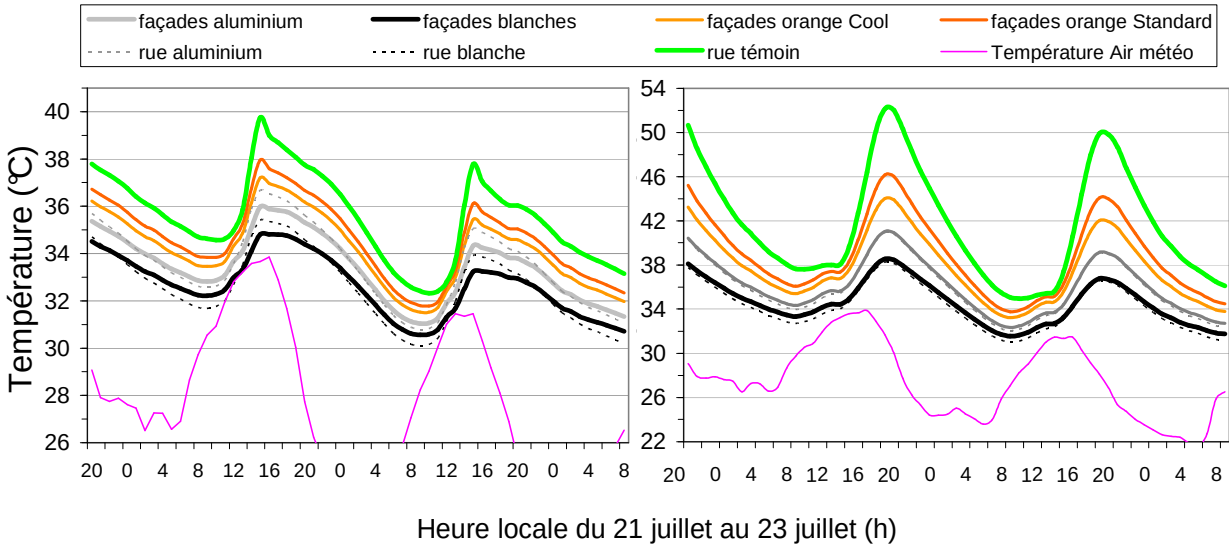


Figure 124 : Évolution des températures de surface des facettes 0,5 à 8m (a) et 15.5 à 23m (b) pour la façade SO et pour toutes les stratégies

Dans la figure 124 (a), tant que les surfaces basses sont soumises au rayonnement direct, pour les configurations avec une chaussée fortement réflective, une part importante du rayonnement incident au sol est directement reflétée sur le bas de la façade. De ce fait, durant la journée, les températures de ces surfaces atteignent des valeurs plus élevées que dans les cas où le sol est moins réflectif. Dans la figure 124(b), les températures suivent l'évolution dictée par l'absorption du flux solaire. Comme dans le cas précédent, les peintures présentant la réflectivité solaire la plus forte ont la température de surface la plus fraîche. La contribution des inter-réflexions provenant du sol est moins marquée pour les surfaces hautes et les configurations avec sol peint demeurent toujours plus fraîches que les stratégies au sol non peint.

La température de l'air de référence pris à la station météorologique indique des températures élevées avec en moyenne 27,9°C et une pointe à 36,6°C. La température de surface maximum simulée pour la surface basse évolue entre de 36 et 41,5°C et entre 39,3 et 54,6°C pour la partie haute. Pendant la nuit, les températures en bas de la façade sont toujours plus élevées que celles du haut de la façade (1 à 2,5°C), alors que dans le cas de la plateforme expérimentale, on avait le phénomène inverse. Cette différence peut être expliquée par la différence d'inertie des bâtiments, par l'apport anthropique modélisé qui sévit surtout la nuit et à la modélisation de l'ICU par le bouclage par itération des équations bilans pour atteindre l'équilibre thermique. Une comparaison précise des différences de températures de surfaces diurne et nocturne entre les 7 stratégies révèle que la différence est plus importante pour les facettes du haut (5°C la nuit, 15°C le jour) que pour les facettes du bas (3°C la nuit, 5°C le jour). Les facettes du haut ont bien évidemment une exposition plus prolongée durant la journée et de plus par leur facteur « vue du ciel » sont soumises à un meilleur rafraîchissement par échanges radiatifs GLO avec la voûte céleste

Durant la journée, la température de surface est principalement influencée par l'éclairement solaire absorbé. Donc l'utilisation de revêtements de surface de réflectivité solaire plus élevée pour réduire les échanges par conduction dans le bâti et les échanges convectifs en surface se justifie. Néanmoins, d'un point de vue de la température de surface des bâtiments, l'utilisation d'une chaussée réflective n'est pas justifiée puisque des températures plus élevées peuvent apparaître sur les surfaces soumises à un taux d'inter-réflexions plus élevé (1er tiers des façades). La peinture aluminium qui est affublée d'une basse émissivité aux grandes longueurs d'ondes (0,51) ne présente pas de comportement différent des autres peintures lors des deux périodes modélisées.

4.2.5. Comparaison des économies d'énergies réalisées sur l'année

Dans notre cas d'étude, la demande énergétique des locaux situés dans les deux bâtiments est directement liée aux flux conduits par la façade et aux apports par ventilation dont la prise d'air est située en façade. Le pourcentage de réduction de la consommation énergétique de locaux situés sur la façade sud-ouest de notre rue canyon calculée pour les différentes configurations des propriétés radiative par rapport à la rue témoin est illustré dans la figure 125. Cette réduction de la consommation a été évaluée en fonction de la hauteur à laquelle se trouvent

les locaux examinés et ce pour la période estivale (a) puis pour une économie annuelle nette entre les pertes survenant en hiver et les bénéfices réalisés en été (b).

(a) – économie en climatisation **(b) – économies nette annuelle**

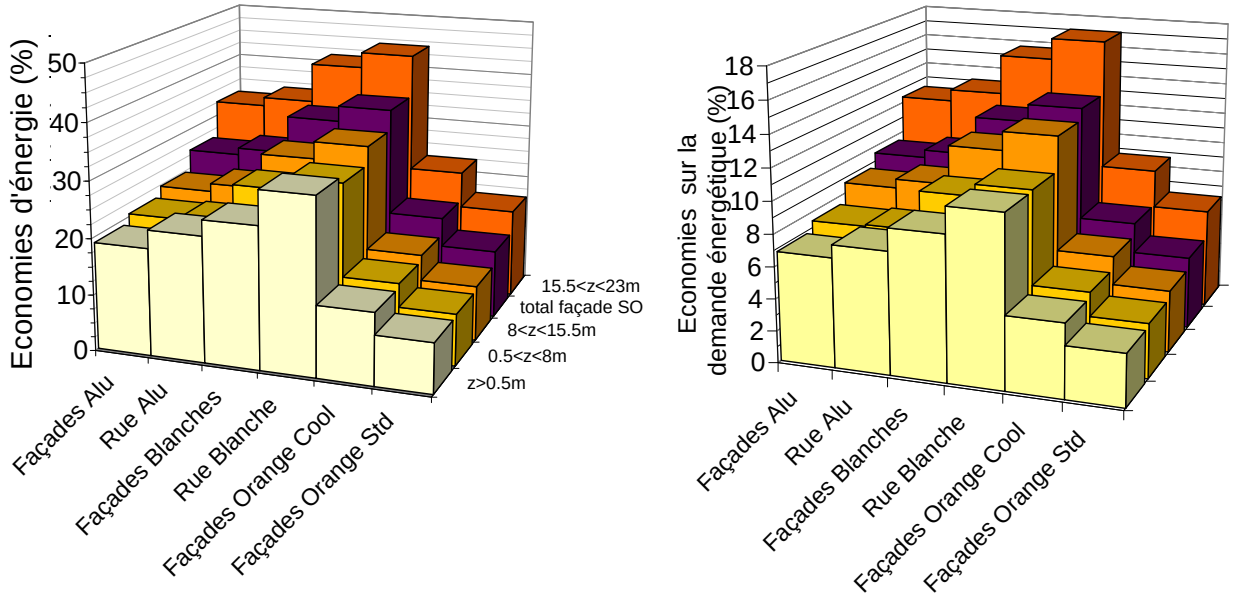


Figure 125 : Économies sur l'énergie de climatisation requise au cours de l'été et sur la consommation énergétique totale sur les deux saisons pour les 6 stratégies comparées à la rue témoin et selon la position du local sur la hauteur de la façade

Préalablement à la figure 125, la consommation énergétique nette à été calculée en kWh/m^3 de local conditionné sur les périodes de référence. Pour la saison de chauffage et de climatisation, la demande d'énergie pour le conditionnement des locaux diminue avec leur position sur l'échelle de la hauteur. La configuration « rue blanche » permet 29,8 à 44,3% d'économie sur la demande en climatisation pour les locaux situés sur la surface SO comparé à la rue témoin (et 29,1 à 39,9% pour la façade NE). On remarque une réduction des écarts sur la demande annuelle entre le haut et le bas de la façade lorsqu'on augmente la réflectivité solaire des façades (10,5% pour la rue témoin, 2,5% pour les murs blancs). De même pour la chaussée peinte, ce ratio de différence haut/bas diminue encore (1,5% pour la rue blanche).

La consommation en climatisation est fortement influencée par la part d'ensoleillement direct, diffus et réfléchis. Les économies maximums se font sur les surfaces les plus élevées. Néanmoins, la différence d'économie entre le haut et le bas des façades n'est pas aussi importante que la différence d'énergie solaire absorbée observée auparavant (paragraphe 4.2.3). Ceci est

dû à la température d'air à l'entrée d'air dans la rue qui n'est pas la même dans tout le volume de la rue. Les gains nets annuel produits par la configuration « rue blanche » (13,6%) deviennent même plus rentable que la configuration murs blancs (12,5%). Les simulations ont laissé voir les performances que l'on pourrait espérer des préparations « cool », comparées à celle d'une peinture standard ayant même coloris. Pour un gain de réflectivité de 0,1 sur tout le spectre solaire suite à la préparation avec les pigments « cool ». L'amélioration sur la demande énergétique nette évolue entre 2 (bas de la façade) et 3,5% (haut de la façade) et entre 4,2 et 7.8% pour la saison estivale. Les économies nettes obtenues entre le coût additionnel dû à la préparation « cool » et le prix de l'énergie doit être mis en balance pour déterminer l'intérêt économique du produit.

La consommation énergétique d'été est aussi influencée par les changements de température de l'air, la capacité thermique de la structure et les caractéristiques et la position du condenseur du système de climatisation (ici situé en façade). Cependant, ces simulations représentaient le maximum de performance énergétique atteignable, pour ce ratio d'aspect, en termes de réduction des apports solaires par la façade puisque l'éclairement produit par Solène représentait un ciel clair sans nuage tout au long des 2 saisons. Néanmoins, on peut espérer des gains énergétiques légèrement plus élevés pour un ensoleillement réel puisque l'hiver sera empreint de ciels couverts.

La figure 126 illustre l'évolution de la demande énergétique cumulée pour l'ensemble des locaux situés dans le bâtiment SO par m² de façade pour trois jours d'été.

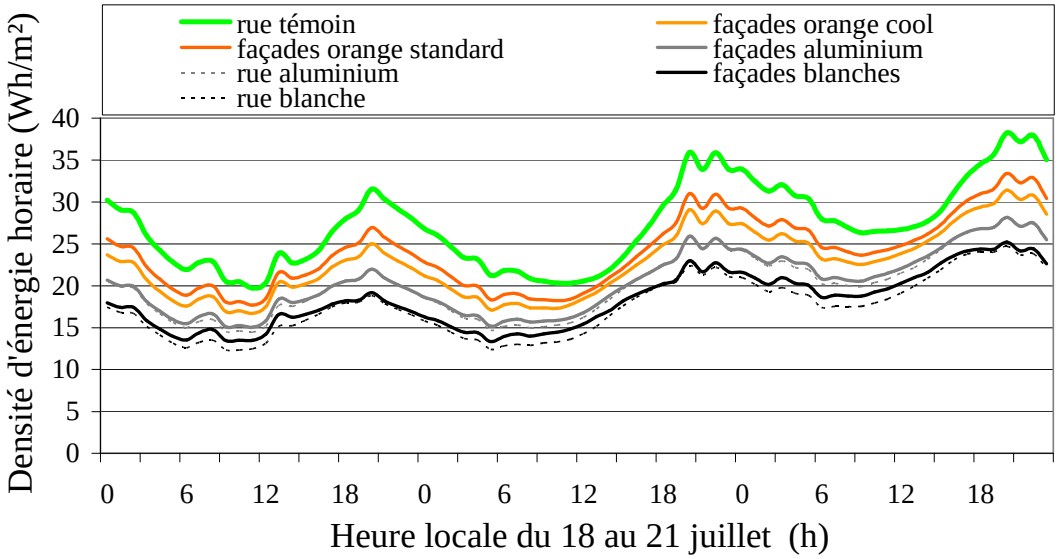


Figure 126 : Comparaison de la demande énergétique d'été pour l'ensemble des locaux situés sur la façade SO du 18/07/2001 au 20/07/2001 en fonction des stratégies

Ces valeurs représentent donc également la valeur du rejet de chaleur anthropique qui impacte sur le bilan thermique de l'air circulant dans la rue canyon. Pour une température de consigne intérieure de 25°C, et pour toutes les configurations testées, la demande de rafraîchissement est continue. Le pic se situe vers 19-20 heures puis la consommation décroit lentement jusqu'au levé du soleil. Le graphique indique également que les performances des stratégies sol peint et sol non peint sont semblables lors du pic d'appel de puissance. Les condenseurs des systèmes de climatisation, positionnés sur la surface extérieure des locaux climatisés, agissent tels une source interne au mur extérieur et comme un échangeur avec le volume d'air contigu venant de la rue dès qu'ils rafraîchissent l'espace intérieur. La climatisation s'impose donc comme un cercle vicieux qui participe à l'auto-entretient de l'ICU. De ce fait les fluctuations de la température de l'air circulant dans la rue pendant la nuit sont essentiellement dues au fonctionnement des condenseurs.

4.2.6. Température de l'air circulant dans le canyon et atténuation de l'ICU

La température d'îlot de chaleur urbain est habituellement définie comme la différence de température entre les données enregistrées dans une station météorologique dans les environs ruraux et la température de l'air circulant en dessous de la canopée urbaine. Dans le cadre de

cette étude, et par les restrictions liées au maillage que nous avons définis lors de la modélisation de la rue canyon, le volume d'air situé entre 0,5 et 8 mètres sur la bande de largeur 1m au centre de la rue canyon a été considéré comme la zone de vie. Les températures à l'intérieur de ce volume on été pondérées sur les surfaces au sol correspondantes et moyennées afin d'être comparées à la température météorologique. Leur différence a été arbitrairement désignée comme notre température d'ICU. Les études sur le confort demandent plus de précision (température radiante moyenne) mais notre température peut représenter une première estimation du confort thermique extérieur de notre rue canyon. La figure 127 représente la température d'ICU obtenue pour la rue témoin et les autres configurations du canyon pendant trois jours de la période estivale et trois jours de la période hivernale.

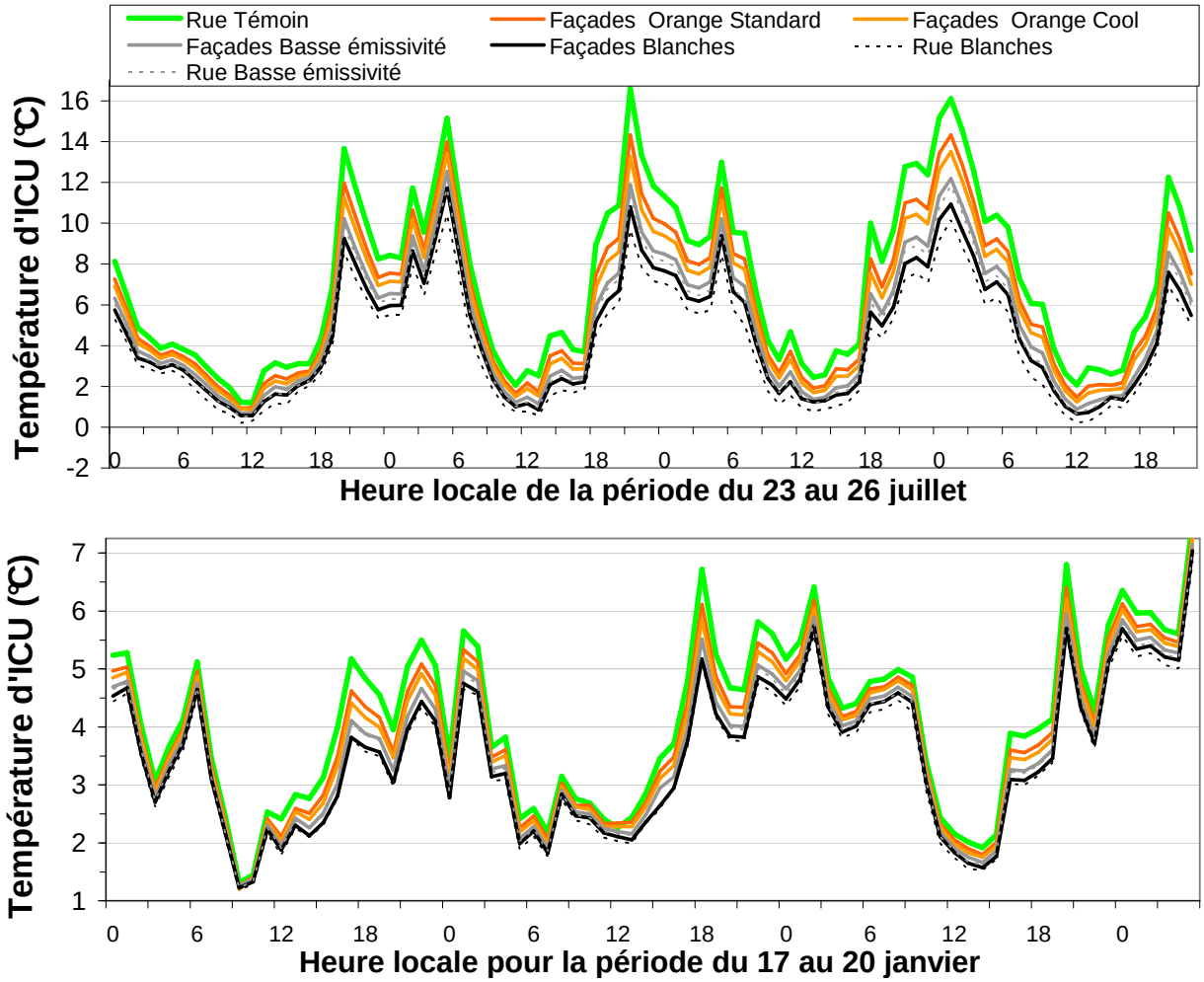


Figure 127 : Évolution de la température d'ICU estivale et hivernale entre l'air au centre du canyon et l'air mesuré à la station météorologique pour les 7 configurations

L'intensité d'îlot de chaleur urbain simulée tend vers 15,7°C pour le 24 juillet 2001 à 21h00, pour la rue témoin, c'est la différence la plus importante sur la période d'été étudiée. En comparaison, au même jour, la stratégie « murs blanc » entraîne une réduction de 5,6°C. La combinaison des murs peints en blanc associé à la chaussée blanche permet une baisse de 6,7°C. Dans la configuration « témoin », la température de l'air maximale atteinte dans la zone de vie est de 42,8°C, soit 5,4°C supérieure à celle de notre configuration « rue blanche ». La température mesurée dans le canyon et la température météorologique sont en déphasage de plus de 7heures en été. Les fluctuations de la température sont principalement provoquées par l'évolution de la vitesse et de la direction du vent dans le canyon. Comme l'indique la littérature, l'ICU est plus important durant la nuit lorsque la température de l'air circulant au dessus de la canopée urbaine se rafraîchit et que les températures des surfaces à l'intérieur de la rue tardent à se refroidir.

Pendant l'hiver, l'îlot de chaleur atteint tout de même 12°C, l'écart sur les températures entre les différentes stratégies est moins important mais les tendances reste les mêmes. Globalement, les inversions jour / nuit observées sur la température de surface entre les stratégies avec et sans chaussée peinte pour les peintures blanche et aluminium ne se retrouve pas sur la température de l'air. Les valeurs moyenne et maximale pour chaque configuration pour les simulations de saison d'hiver et d'été sont regroupées dans le tableau 16.

Tableau 16 : Température d'ICU simulée pour les 7 configurations

Configuration	**Rue Témoin**	**Façades Orange Standard**	**Façades Orange Cool**	**Façades Basse émissivité**	**Rue Basse émissivité**	**Façades blanches**	**Rue Blanche**
			Période estivale				
T_{ICU} max	16.6	14.3	13.5	12.5	11.8	11.7	12.0
T_{ICU} moyenne	5.2	4.7	4.2	3.7	3.4	3.2	2.8
			Période hivernale				
T_{ICU} max	12.5	12.4	12.3	12.6	12.1	12.1	12.0
T_{ICU} moyenne	3.45	3.24	3.15	3.32	2.89	2.78	2.94

L'intensité d'ICU simulée est plus importante que les valeurs réelles enregistrées au cours des campagnes de mesures dans les grandes métropoles (Santamouris et al. 2003). Parmi les raisons de cette différence constatée, on peut signaler est sans doute que la température est la moyenne de l'air circulant sous la canopée, et que l'air en partie haute est souvent plus frais et rabaisse la moyenne finale.

4.3. Sensibilité de l'énergie solaire absorbée à la distribution des propriétés radiatives des rues canyons, au ratio d'aspect et à l'orientation

Le ratio géométrique, l'orientation et la latitude géographique de la rue canyon sont aussi des paramètres qui caractérisent l'absorption du rayonnement solaire dans une rue canyon. Afin de bien comprendre quels sont les effets combinés de la configuration de la réflectivité solaire aux surfaces d'une rue canyon et de ces trois paramètres, nous avons réalisé une étude en faisant varier un paramètre à la fois au cours de la période estivale (Tableau 17).

Tableau 17 : géo-localisations, ratio et orientation des rues pour l'étude paramétrique

Localisation : Latitude (longitude)	**Ratio H/W**	**Orientation**
Marseille (France) : 43.18°N (5.23°E)	4,3	Axe Nord-Sud
La Rochelle (France) : 46.10°N (1.09°O)	2,4	Axe Est-Ouest
Séville (Espagne) : 37.23°N (5.58°O)	1,7	Axe NO-SE
-	1	Axe NE-SO

Quatre orientations principales ont été attribuées à l'axe de nos rues simulées. Pour les ratios géométriques *H/W*, on conserve la hauteur des façades (17m) et on a fait varier la largeur de notre rue témoin afin d'obtenir différents ratios.

La rue témoin a été considérée avec deux façades revêtues d'une peinture bleue classique de réflectivité solaire 0,18 et d'une chaussée en asphalte claire et usée par le temps de réflectivité 0,56. La première stratégie comparée a deux façades recouvertes d'une peinture bleue « cool » de réflectivité 0,33[16]. La seconde stratégie est plus extrême d'un point de vue du con-

[16] Valeur prise d'après une caractérisation optique réalisée à l'université d'Athènes, (Synnefa et al. 2007)

fort visuel, les façades et la chaussée sont recouvertes d'une peinture blanche acrylique et latex de réflectivité 0,85. D'après les expériences menées précédemment (4.2.3) cette stratégie donne les meilleurs résultats quant à la réduction du flux solaire absorbé aux façades d'une rue canyon en période d'été. Les façades ont été découpées en quatre surfaces lors de notre préparation du modèle de rue canyon, une de 0,5m de hauteur, puis 3 de 5,5 m. La chaussée est découpée en 3 facettes de taille variable et 2 facettes de 0,5m pour les bords.

4.3.1. Effet de la combinaison orientation et stratégie de peinture appliquée à une rue canyon spécifique

Pour une rue canyon de ratio *H/W*, 1,7 et située à Marseille, on considère l'énergie solaire absorbée par m² sur une période de simulation allant du 15 juin 2005 au 15 août 2005. La figure 128 représente l'énergie solaire absorbée par unité de surface pendant la période estivale pour la rue canyon en version témoin puis avec la stratégie « rue blanche » appliquée en fonction de la position de la surface d'absorption sur la façade et de l'orientation de l'axe de la rue.

(a) Rue témoin (« bleu ») **(b) Stratégie « blanc »**

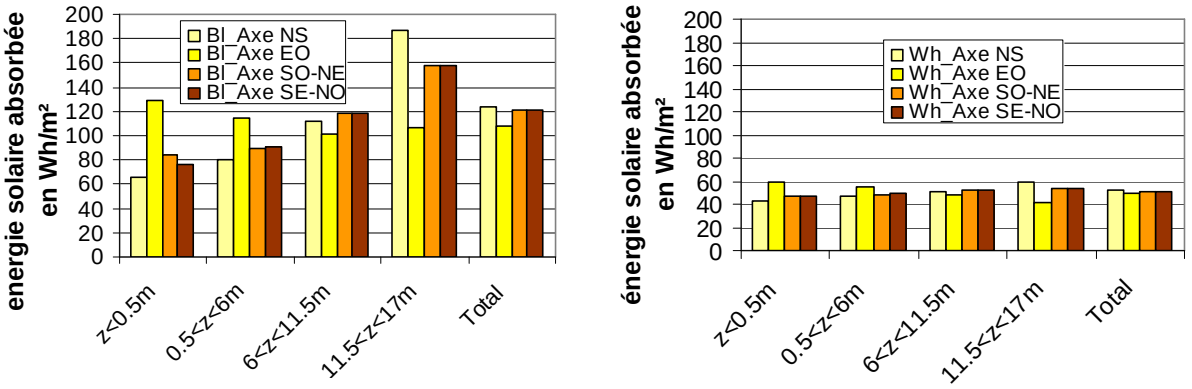


Figure 128 : énergie solaire moyenne absorbée par les 2 façades d'une rue canyon en Wh/m² au cours de la période estivale pour la rue témoin et la stratégie « blanc » en fonction de la position de la surface d'absorption sur la façade et de l'orientation de l'axe de la rue

Pour la rue bleue témoin, (figure 128-a), le descripteur le plus variable en fonction de l'orientation est la différence d'énergie solaire absorbée entre le haut et le bas de la façade. Cette différence est de 65% pour l'orientation NS et atteint -18% pour l'orientation EO. La stratégie « bleu cool » non présentées ici montre quand à elle une réduction de 1 à 4% de cette différence haut/bas. Les orientations SO-NE et NO-SE ont une répartition de l'éclairement

absorbé similaire à l'orientation NS, pour une différence de 47 à 51 % entre haut et bas. La rue blanche (figure 128-b) montre la même évolution, excepté que l'orientation E-O est celle qui montre la plus grande différence haut/bas (30%). Les autres orientations présentent une différence de 11 à 28%.

Pour une rue canyon de ratio géométrique 1,7 située à Marseille, la densité d'énergie solaire absorbée par les 2 façades de la rue témoin en fonction de l'orientation de l'axe est réduite :

- de 8 à 8,5% pour la rue « bleu cool » (ρ_{SOLAIRE} +15% pour les façades)
- de 54,4 à 58,3% pour la stratégie rue « blanche », (ρ_{SOLAIRE} +67% pour les façades et +29% pour la chaussée)

La réduction maximale intervenant pour l'orientation NS, et la minimale étant conférée à la rue d'orientation EO. On peut conclure que l'influence de l'orientation de la rue et de la configuration des propriétés radiatives sur le piégeage radiatif n'est pas significative. En revanche chaque orientation réagit de manière différente.

La figure 129 illustre les effets concédés par l'orientation et la configuration des propriétés radiatives sur la densité d'énergie absorbée au cours des deux mois d'étude. Les différentes facettes pour les deux façades et la chaussée composant les rues sont représentées avec un axe orienté nord-sud (façades Est / ouest), est-ouest (façades Nord / Sud) puis nord-est / sud-ouest (façades Nord-ouest / Sud-est).

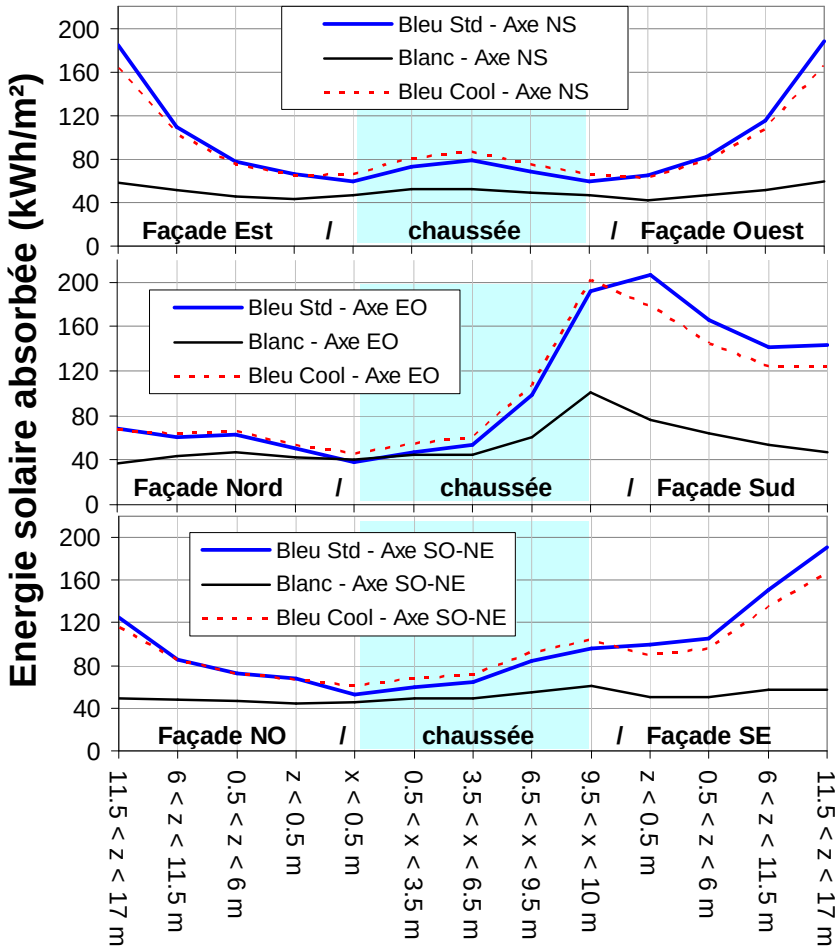


Figure 129 : évolution de l'énergie solaire absorbée moyennée pour les 2 façades et la chaussée d'une rue canyon pour 3 orientations en fonction de la stratégie radiative utilisée

Pour toutes les orientations, on remarque qu'en augmentant la réflectivité solaire des façades, la chaussée absorbe plus d'énergie (+10/11%). Pour les façades Est et ouest de la « rue blanche », l'importance des inter-réflexions dans le canyon entraîne que l'énergie absorbée en haut des façades est pratiquement équivalente (moins de 10% d'écart) à celle absorbée au centre de la chaussée avec environ 55kWh/m².

Pour des façades orientée Nord, la densité d'énergie absorbée pour les surfaces pour la stratégie « bleu cool » par rapport à la configuration témoin augmente de 4,7 en bas, 6,5% au milieu et diminue de 1.1% en haut de la façade nord, la valeur maximale est en haut avec 67kWh/m². Pour la stratégie «rue blanche », une inversion de l'amplitude d'énergie absorbée à lieu entre la 2ème et 3ème surface, la réduction observée par rapport à la rue témoin va de 16 à 27% sur le bas à 46% sur le haut de la façade. La facette la plus basse fait état de la densité

d'énergie solaire maximale absorbée avec 47kWh/m².

Pour la façade orientée sud, la densité d'énergie solaire absorbée est maximale sur le bas de la façade, avec 180kWh/m² absorbé par la stratégie « bleu cool », puis décroit sur le haut. Par rapport à la rue témoin, la réduction l'énergie absorbée va de 12 à 13.5%. Même tendance pour la stratégie « blanc », avec un maximum en surface basse (76.5kWh/m²). Les configurations réfléchissantes peuvent être utilisées pour réduire les inégalités d'absorption entre les 2 façades : l'écart de flux absorbé pour les facettes opposées est de 53 à 75% pour la rue témoin, entre 46 et 70% pour le « bleu cool » et entre 18 et 44% pour le « blanc ».

Pour les rue canyon orientée NE/SO ou NO/SE, l'application d'un revêtement plus réfléchissant aux parois influence généralement moins la diminution de l'énergie solaire absorbée aux façades NO ou SE (moins de 8%) qu'à leur opposée (9 à 13%). En revanche l'application d'une chaussée et de façades blanches entraîne respectivement une diminution de 63% aux façades NO ou SE et de 57% au SO et NE. L'orientation a une influence sur la performance des configurations des propriétés radiatives particulièrement sur la distribution des apports solaires sur la hauteur des façades.

4.3.2. Effet de la combinaison entre le ratio d'aspect *H*/*W* et la stratégie de peinture appliquée dans la rue

Quatre ratios d'aspect pour un environnement dense et confiné (écoulements « rasants ») ont été concoctées selon les exigences du maillage, la hauteur des murs a été conservé constante et en faisant varier seulement la largeur de la rue. De plus on a tenu à garder la largeur initiale de la première bande surfacique constituant la chaussée (0.5m) par conséquent uniquement les trois bandes surfaciques constituant le maillage central varient (1, 2, 3, et 5,33m) donnant cours aux quatre ratios *H/W* choisis 4,3, 2,4, 1,7 et 1.

La figure 130 présente l'effet du ratio géométrique sur la densité d'énergie solaire absorbée par les 3 configurations de propriétés radiatives dans une rue canyon d'axe Nord/Sud pendant deux mois d'été. Le graphique de gauche rassemble les résultats obtenu pour une rue quatre fois plus haute que large et celui de gauche pour une rue aussi haute que large.

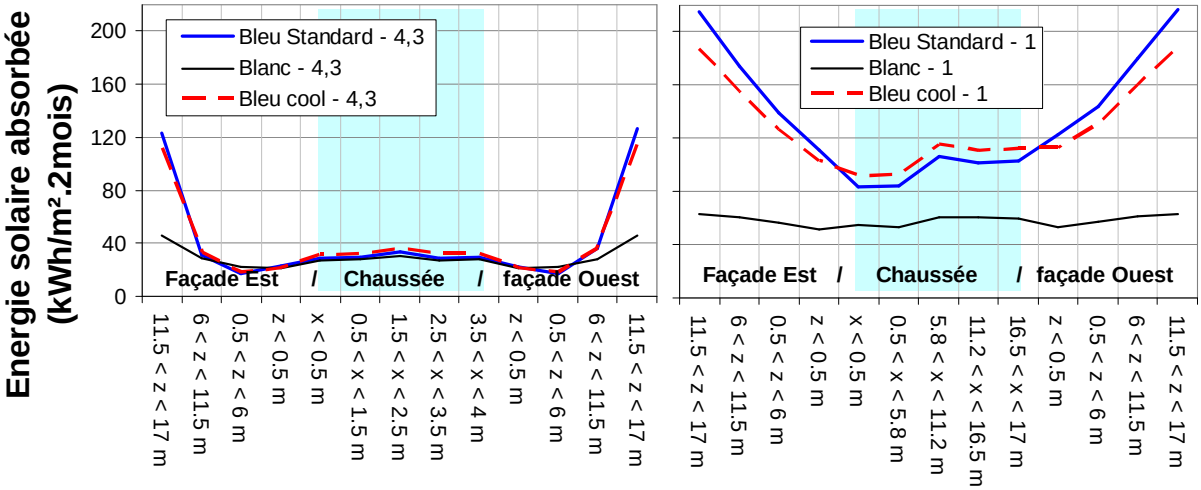


Figure 130 : Influence du ratio *H/W* sur l'énergie solaire absorbée par les différentes surfaces de façades orientées Est / Ouest pour les trois configurations radiatives

La densité d'énergie solaire absorbée par les surfaces d'une rue canyon est d'autant plus importante que la rue est large (ratio *H/W* faible), les apports solaires aux façades augmentent de 28 à 68% pour les configurations bleues, et de 14 à 47% pour la rue blanche avec un gain maximum sur le tiers inférieur. Dans une rue d'axe N/S, pour le rapport d'aspect égal à 4,3 le piégeage radiatif pour les 2 façades par rapport au bleu témoin diminue de 45% en configuration blanche et de 5-6% en bleu cool. Ces diminutions relatives sont à tempérer par les écarts entre le haut est le bas des façades :

- Augmente de 25 à 29%sur le bas des façades pour la solution extrême « rue blanche »
- Diminue de 7 à 69% sur les 2/3 supérieurs des façades
- Augmente sur les 2 premiers tiers de 1 à 5% pour la solution bleue cool
- Diminue sur le dernier tiers de 9 à 10%

Au chaussée, le piégeage augmente de 8 à 10% en bleu cool et diminue de 5 et 11% pour le blanc, mais ces changement correspondent à moins de 5kWh/m².2mois.

Pour le ratio *H/W* égal à 1, la diminution du piégeage radiatif en façade est de 66% et 11% pour la rue blanche et les façades bleues cool respectivement. Les densités d'énergie solaires absorbées aux surfaces de la rue blanche présentent une évolution quasi linéaire avec une réduction plus importante en haut qu'en bas de la rue (-40% en chaussée, et de -59 à -71% sur les façades). Pour le bleu cool, le piégeage augmente en chaussée (+10%) et diminue sur toute la façade (9-13%).

La figure 131 montre les modifications obtenues sur des rues de même dimensions géométriques orientée selon un axe Est / Ouest.

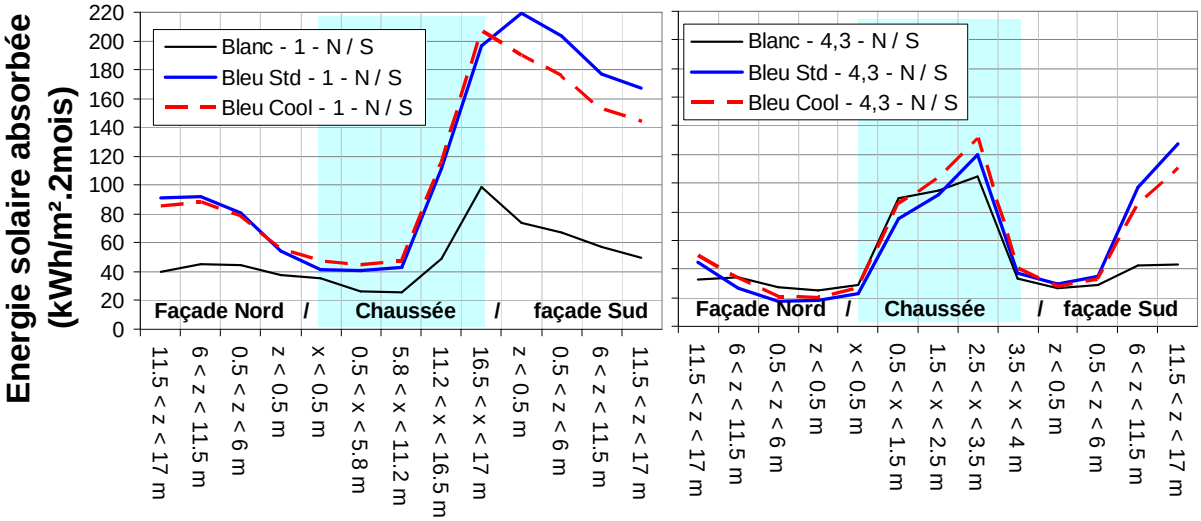


Figure 131 : Influence du ratio sur l'évolution de l'énergie absorbée par les 2 façades en fonction de la hauteur pour la rue « témoin » et la stratégie « blanc »

La stratégie témoin, dans un canyon de ratio 1, absorbe de 219 à 167kWh/m² sur la période simulée pour la façade sud et de 54 à 91kWh/m² pour la façade nord dans le sens de la hauteur. La densité d'énergie solaire absorbée par rapport à la rue témoin est :

- pour la façade Nord, réduite de 31 à 50% dans le sens de la hauteur pour la stratégie « rue blanche » et de 0 à 2% pour la stratégie « bleu cool ».
- pour la chaussée, réduite de 58% et augmentés de 14% respectivement.
- pour la façade sud, réduite de à 66% à 70% pour la rue blanche et de 14% pour le bleu cool.

Pour les rues profondes (ratio 4,3), les gains imputables à la stratégie radiative sont moins définissables, la rue témoin absorbe de 30 à 127kWh/m² au sud et de 18 à 45kWh/m² au nord. Au Nord, la façade blanche voit son énergie solaire absorbée augmenter de 58 et 27% sur les deux premiers tiers de la hauteur et diminuer de 28 % sur le dernier tiers. La stratégie bleu cool quant à elle augmente de 20 et 26% et de 9% en haut de façade. Au sud, la réduction évolue de 9 à 66% pour le blanc et de 7 à 13% pour le bleu cool, l'énergie absorbée par la chaussée s'élève de 1% et 12% respectivement.

Une diminution du ratio *H/W* entraîne une réduction de l'énergie solaire absorbée par les 2 façades au cours de la période estivale. Si l'on prend la rue canyon de ratio égal à 1 en référence, la stratégie « blanc » permet une diminution de 14 à 47% de l'énergie totale absorbée, tandis que la configuration des propriétés radiatives propre à la rue témoin donne une réduction allant de 30 à 67% lorsque le ratio augmente.

4.3.3. Ratios géométrique et localisation géographique

La figure 132 représente l'évolution de la densité d'énergie solaire absorbée pour les 2 façades d'une rue canyons de ratio *H/W* égal à 4,3 puis à 1 selon la stratégie utilisée et aussi selon la localisation du canyon (Marseille et Séville).

a) ratio H/W = 4,3 **b) ratio H/W =1**

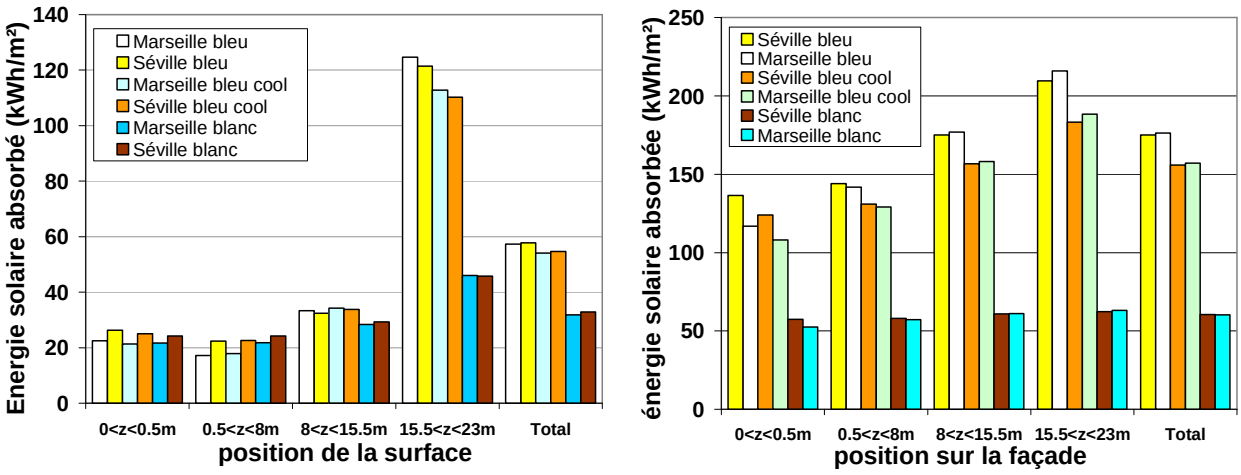


Figure 132 : Évolution de l'énergie solaire absorbée par l'ensemble constitué par les facettes de même hauteur d'une rue d'axe NS selon 3 configurations et 2 latitudes géographiques

La figure 132-a, et la figure 132-b montrent que pour un ratio donné, quelle que soit la stratégie radiative utilisées, la différence de densité d'énergie absorbée pour chaque facette due à la latitude géographique est très faible, et d'autant plus sur l'ensemble des 2 façades. Pour le ratio égal à 1 et la stratégie « blanc » cette croissance est très faible.

L'exercice suivant a consisté à faire varier la latitude géographique d'une rue de ratio géométrique 1,7 et dont les façades s'orientent au Nord et au Sud. La figure 133 compare les réductions de la densité d'énergie solaire obtenues par les configurations blanche et bleu cool com-

parée à la rue témoin en pourcentage pour les trois latitudes choisies. Les valeurs négatives représentent une diminution de l'énergie solaire absorbée et sont représentées vers le haut.

a) Blanc – axe E/O – *H/W* 1,7 **b) Bleu cool – axe E/O – *H/W* 1,7**

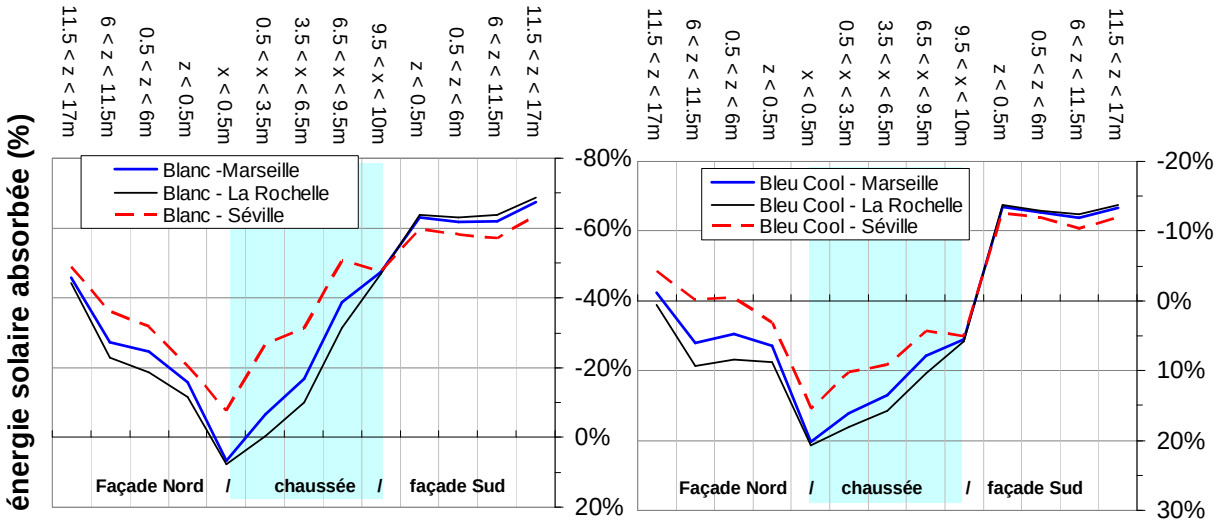


Figure 133 : Pourcentage d'énergie absorbée par les stratégies « blanche » et « bleu cool » pour une rue canyon localisé à différentes latitudes comparé à la stratégie témoin

En descendant dans les latitudes sud, la chaussée est la surface qui prédomine dans l'absorption de l'énergie solaire, alors qu'à La Rochelle, celle-ci se fait essentiellement au niveau des façades. La stratégie blanche, étant appliquée à la chaussée comme aux façades, obtient ainsi un meilleur rendement à Séville sur une rue canyon où le flux solaire total absorbé est principalement lié aux inter-réflexions (façades opposées orientée Nord et Sud). Séville obtient ainsi un pourcentage d'énergie solaire absorbée 19% plus faible que La Rochelle sur l'ensemble de la chaussée, de 13% à 5% de bas en haut de la façade Nord et plus fort de 7 à 5% de bas en haut de la façade Sud. Cette tendance se retrouve pour la configuration bleu cool avec des écarts de 9 à 5% sur la façade Nord, une chaussée qui absorbe plus la rue témoin avec -6% d'énergie absorbée à Séville par rapport à La Rochelle et une façade Sud avec 1 à 2% de moins pour la Rochelle. La contribution du rayonnement direct dans le flux absorbé, est plus forte dans le bas du canyon pour la Rochelle, en particulier pour la façade située au sud. La durée d'ensoleillement est aussi moins importante à Séville mais plus intense, en particulier au zénith solaire.

La figure 134a et la figure 133b permettent d'illustrer cette même différence de performance des configurations radiatives appliquées en fonction de la latitude du canyon, pour une orien-

tation Nord / sud son axe et surtout pour deux typologies différentes, un canyon large (*H/W* égal 1) et un canyon plus étroit (*H/W* égal 4,3). Les latitudes étudiées dans ces graphiques ont été limitée à celles de Séville et Marseille.

a) Blanc – *H/W* 4,3 – Axe Nord/Sud **b) Bleu Cool – *H/W* 4,3 – Axe Nord/Sud**

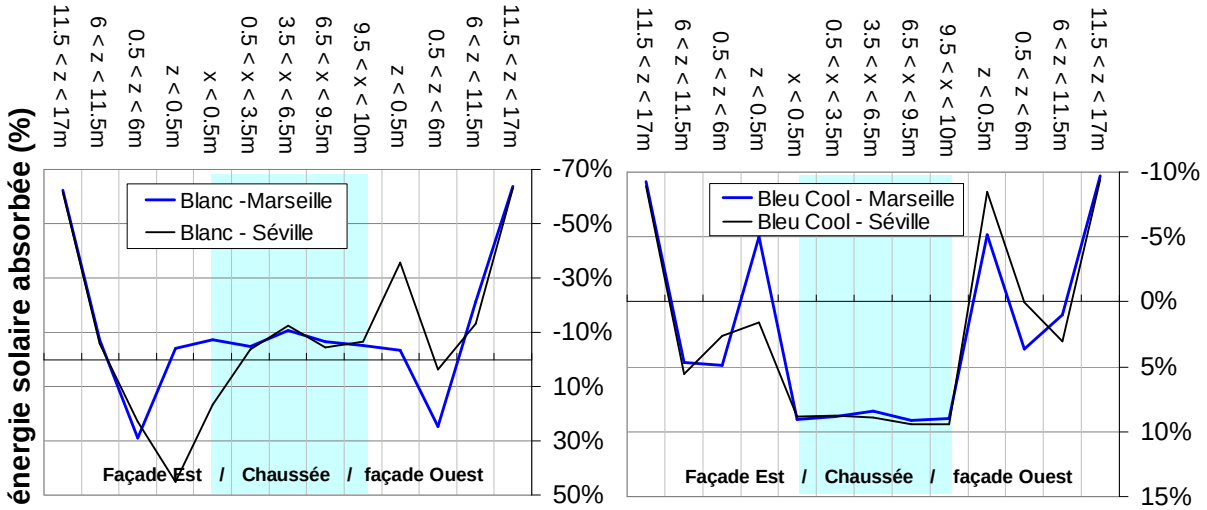


Figure 134 : Pourcentage d'énergie solaire absorbée par les surfaces d'une rue canyon étroite pour les stratégies « blanche» et « bleu cool » comparées à la rue témoin pour deux latitudes

Les différences de flux solaire absorbé les plus importantes d'une localisation géographique à l'autre dans le cas d'une rue profonde sont essentiellement centrées sur les facettes basses des façades et sur la chaussée jouxtant ces façades dans le cas de la rue « blanche ». Pour la latitude de Marseille par rapport à Séville, le piégeage radiatif induit par la configuration est :

- A l'*est*, réduit de 6% en bas de façade, augmenté de 1% en haut
- Pour la chaussée, les écarts sont inférieur à 4% d'écart en moyenne, avec une différence maximale à l'approche de la façade est (13%).
- A l'ouest, il est réduit de 30% en bas de façade et augmentée d'à peine 1% en haut.

Pour la stratégie bleu cool, les performances sont très similaires au niveau de la chaussée est diffère uniquement de 2 à 4% au bas des façades.

Pour un ratio géométrique *H/W* inférieur (égale à 1), l'effet de la latitude géographique sur la densité d'énergie absorbée aux façades est pratiquement nulle (0,8% de différence pour 6° de latitude). Au niveau de la chaussée et des coins façades / chaussées, le piégeage radiatif augmente de 1 à 5% pour la rue blanche et 0,5 à 2,3% pour la stratégie bleu cool.

Les résultats de ces simulations des densités d'énergie solaire dans les rues canyons ont donné des indications sur le comportement des performances thermiques liées à la configuration des propriétés radiatives aux surfaces. L'orientation et le ratio géométrique semble avoir un impact privilégié mais la localisation géographique est aussi à prendre en compte pour les rues d'axe orienté différemment que Nord / Sud. D'autres simulations seront nécessaires pour affiner ces théories. L'inclusion des vitrages en façades dans ces simulations revêt aussi une importance capitale puisque qu'ils joueront un rôle de piège définitif pour l'énergie solaire pénétrant dans le canyon.

4.4. Conclusions sur les simulations et futurs développements du modèle

La modélisation des toitures couplées au local a mis en valeur les densités de flux de chaleur escomptées pour différentes valeurs d'absorptivité solaire. Pour une toiture-terrasse sans isolation à La Rochelle, l'application d'un revêtement noir cool de ρ_{SOL} égal à 0.25 à la place d'un revêtement noir standard (ρ_{SOL} = 0.05) permet de diminuer les consommations annuelles de 7% (32 kWh/m² de toiture.an). En revanche pour la référence d'isolation thermique RT2005, on obtient des résultats faibles avec 9,5% par an de gain sur la consommation énergétique (3,6 kWh/m² de toiture.an).

Le piégeage radiatif entraîné par sept configurations particulières des propriétés radiatives aux surfaces d'une rue canyon a été étudié avec Solene. Les simulations d'ensoleillement sur un cas de rue canyon sans vitrage de ratio géométrique H/W égal à 3,3 à Athènes ont permis de mettre en avant que les rues où la chaussée était traitée en même temps que les façades augmentaient la part de l'éclairement solaire absorbé par les façades. La part de l'éclairement solaire absorbé imputable aux inter-réflexions selon la configuration étudiée varie de 8% (rayonnement direct) à 98% (rayonnement diffus), son importance requiert la prudence quand à l'interaction des revêtements à fort albédo avec les vitrages. L'augmentation des inter-réflexions pourrait en effet augmenter les apports solaires dans les locaux.

Les résultats de l'étude d'ensoleillement ont été utilisés en données d'entrées pour un code de transfert thermoaéraulique couplé entre les bâtiments d'une rue canyon et son microclimat (logiciel Simcanyon disponible au LEPTIAB). Cette modélisation complète l'expérience ClimaBat en ajoutant l'effet des charges anthropiques dans la scène urbaine. Le modèle a été

adapté pour l'analyse des performances énergétiques des bâtiments relatives à l'utilisation de produits cool et colorés cool sur les façades dans un environnement dense.

L'effet des revêtements sur les bâtiments non-isolés a été souligné par l'évolution des températures de surfaces, des consommations énergétiques et de la température de l'air dans la rue. L'impact maximal peut être caractérisé par le passage d'une rue témoin d'apparence grise (ρ_{SOL} = 0.2) à une stratégie extrême où la chaussée et les façades sont peintes en blanc (ρ_{SOL} = 0.83). Les températures de surface maximale diminuent de 5 à 14°C de bas en haut de la façade. La consommation énergétique d'été diminue de 30 à 40% de bas en haut de la façade, et si on y ajoute les pertes d'énergie sur la consommation de chauffage, on atteint un gain net de 10 à 18%.

La température d'ICU modélisée au bas de la rue est relativement proche des valeurs observées dans les campagnes expérimentales rapportées dans la littérature, avec des températures d'ICU estival de 3 à 16°C pour la rue témoin avec un pic qui se modélise entre 20h et 4h du matin. L'utilisation d'une stratégie « blanche » par rapport à la rue témoin estime la possibilité de réduire la température d'air estivale moyenne dans la rue de 2,4°C pour une application à grande échelle.

Le modèle nécessite néanmoins des développements supplémentaires pour pouvoir réaliser des estimations plus réalistes et adaptées à des bâtiments réels. Des étapes sont d'ores et déjà entreprises tels que l'ajout des toitures et de vitrages dans le bilan des locaux.

Enfin une étude paramétrique sur les facteurs géométriques, géographiques et d'orientation de la rue a permis de mettre en évidence leur influence dans le piégeage radiatif dû à la distribution des propriétés radiatives dans le canyon. Les résultats obtenus ont montré que les apports solaires aux surfaces d'une rue urbaine peuvent se révéler assez différents selon la configuration des propriétés radiatives aux surfaces combinés avec ces 3 paramètres. Les stratégies à fort albédo peuvent être privilégiées dans les rues d'axe Est/Ouest ou dans les rues à fort rapport d'aspect pour répartir la distribution de l'éclairement absorbé entre les deux façades et dans le sens de la hauteur. Dans cette étude on a observé pour des localisations dans les latitudes moyennes (37 à 43°), les canyons situés dans les latitudes sud absorbent plus d'énergie solaire au niveau de la chaussée, une réflectivité importante devrait y être privilégiée pour diminuer le piégeage radiatif (-19% d'énergie solaire absorbée aux façades à Séville par rapport à La Rochelle pour une rue « blanche »). Dans les latitudes plus au nord nord, l'utilisation de

revêtement de façade à forte réflectivité solaire est plus efficace, le piégeage radiatif par les façades observées pour un bleu cool par rapport à un bleu standard était 6% moins élevé à La Rochelle qu'à Séville.

Conclusion et perspectives

Le chapitre bibliographique a permis de mettre en évidence les processus physiques impliqués dans les phénomènes de confinement thermoaéraulique au sein des structures urbaines denses qui cumulées à l'échelle d'une ville se manifestent par l'îlot de chaleur urbain. Le recoupement des travaux d'observations et de modélisations ont fixé notre choix d'étude sur une structure générique des tissus urbains type canyon urbain que l'on retrouve dans les latitudes moyennes, et qui observée pour un rapport d'aspect géométrique H/W supérieur à 0,54, est représentative du cœur du phénomène d'îlot de chaleur nocturne.

Le confinement géométrique de cette forme d'étude pose la question de l'applicabilité des différentes stratégies existantes pour l'atténuation des consommations énergétiques liées à l'îlot de chaleur urbain. Les développements récents menés sur la production de peintures blanches et colorées fortement réfléchissantes dans les proches infrarouges, leur simplicité de mise en œuvre pour des applications de conception ou de rénovation, nous ont conforté dans l'étude du traitement des propriétés radiatives des surfaces urbaines. Les performances des toitures cool sont exemplaires pour les structures dont l'emprise au sol est supérieure à la surface des façades, mais le piégeage radiatif entre les façades des rues canyons de notre étude rend le résultat moins évident. Dès lors, un travail d'analyse, par l'approche expérimentale, de l'impact des configurations des propriétés radiatives des façades des bâtiments dans un environnement urbain dense sur leur demande énergétique a été entrepris. De plus, l'objectif a été focalisé sur l'analyse performance des produits colorés cool par rapport à des produits de teinte homologue de fabrication standard.

Le premier chapitre rapporte les résultats obtenus suite au traitement de mesures issues d'un banc expérimental extérieur conçu pour caractériser le bilan thermique d'une surface plane, ce qui nous a permis dans un premier temps de comparer en simultané les températures de surface de 4 paires d'échantillons de peintures colorées cool et de peintures standards, ainsi qu'un blanc et un échantillon aluminium à basse émissivité GLO appliquées à 10 éléments plan durant 1 an. Les réflectivités solaires des échantillons de peintures appliquées sur des

plaques de cuivre lisses avant exposition ont préalablement été mesurées en laboratoire selon le protocole décrit dans la Norme ASTM E903-96 avec un spectrophotomètre UV / VIS / PIR à sphère intégrante et une surface de réflectivité référence de type PTFE. La différence de réflectivité solaire initiale entre les paires cool/standard étudiées se trouve entre 0,11 et 0,24. Les réflectivités solaires des échantillons ont aussi été mesurées pour une application à un substrat rugueux, du type revêtement bitumineux d'étanchéité de toiture, montrant une baisse de la réflectivité comparée au substrat lisse pouvant dépasser les 50%. Cette remarque est à prendre en compte lors de l'application aux matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment. L'émissivité de grandes longueurs d'onde des surfaces ont aussi été mesurée avec un émissiomètre portatif de type AE donnant des valeurs entre 0,84 et 0,91 pour les peintures mates et 0,36 pour l'échantillon aluminium.

L'étude en fréquences cumulées des températures de surfaces prises par les peintures en exposition sur leur support a montré que les éléments recouverts de peintures cool étaient plus fraîches que ceux peints avec des produits standards pendant plus de 80% de la période diurne. Les températures de surface se rangeant entre 0 et 4°C pour les plus petites différences de réflectivités solaires et entre 0 et 8°C pour les plus grandes, ces résultats étant de bonnes augures avant leur application à l'enveloppe d'un bâtiment réel mais à relativiser de par la baisse de la réflectivité solaire qui peut être entrainée par le vieillissement et l'encrassement des surfaces extérieures. Le traitement des mesures nocturnes n'a pas montré de différences de température significatives pour les peintures colorées (<0,5°C) mais une différence de 0 à 2°C pour l'échantillon aluminium pour l'ensemble de la période de mesure.

Cette dégradation des propriétés radiatives a été estimée par un calcul d'optimisation des termes du bilan énergétiques mesurés sur le banc aux surfaces des 10 échantillons. Les réflectivités solaires fixes pour chaque disque et un coefficient d'échanges convectifs pour l'ensemble du support fonction de la vitesse du vent ont été déterminés pour une période de 6 mois englobant l'évolution des propriétés radiatives et les variations du spectre solaire dues aux conditions atmosphériques. Le coefficient d'échanges convectifs en fonction de la vitesse du vent, tracé selon un profil linéaire ou un profil logarithmique, concordait bien avec les données de la littérature, en particulier le profil logarithmique avec un exposant proche de 0,5. Les réflectivités solaires ajustées ont montrés une diminution du coefficient de 15 à 30% pour les échantillons colorés et de moins de 10 % pour les échantillons blancs et aluminium par rapport aux mesures spectrophotométrique en laboratoire des échantillons non exposés. Cette

divergence peut être liée aux deux phénomènes cités au dessus mais aussi aux hypothèses de la méthode. Devant la taille des échantillons, nous n'avons pas précisément modélisé les effets de convection naturelle mais ceux-ci peuvent s'avérer un peu plus important que prévu, ce qui pourrait expliquer la difficulté à ajuster le bilan à la surface de l'échantillon basse émissivité GLO. Une méthode similaire a été proposée en perspective (ANNEXE 3) pour évaluer ce terme plus précisément. Une autre perspective pour affiner les calculs consisterait à moyenner les flux du bilan, températures et vitesses du vent sur 10 à 30 secondes plutôt que d'utiliser des mesures instantanées afin de prendre en compte les constantes de temps de réponse des plaques de cuivre aux différents phénomènes.

Le deuxième chapitre relate les étapes de conception d'une maquette de scène urbaine constituée de 4 rues canyons à l'échelle 1/10ème développée pour étudier l'effet des propriétés radiatives des façades d'une rue sur la distribution des températures de surfaces et d'air dans et à l'extérieur des bâtiments dans une configuration quasi-réelle. Pour s'approcher de cette réalité, des études de similitudes ont été réalisées, pour finalement conserver celles essentielles à modéliser les phénomènes mis en jeu dans l'étude des propriétés radiatives et des transferts thermiques dans les bâtiments. Les similitudes d'échanges par rayonnement ont été appliquées par la conservation des caractéristiques géométriques dans la réduction d'échelle et par l'utilisation de revêtement de surface pour les bâtiments (peintures). Le rapport des échanges de chaleur superficiels sur le transfert par conduction de l'enveloppe des maquettes est proche de celui d'un bâtiment réel à inertie légère (parpaings creux et 1/6ème de surface vitrée). En revanche, la similitude d'écoulement aéraulique n'est pas respectée puisque nous travaillons en milieu extérieur. En revanche, la similitude d'écoulement aéraulique n'est pas respectée puisque nous travaillons en milieu extérieur.

Les thermocouples en surface extérieure et intérieure du bâti ont été disposés selon l'axe symétrique transversal des 4 rues pour s'affranchir des effets de bords sur les échanges radiatifs et le brassage turbulent. Des thermocouples sur l'air protégés par des protections radiatives ont été montés selon le même axe et dans les bâtiments pour mesurer l'évolution de l'air aux abords des surfaces. Les mesures réalisées sur une phase de calibration de 2 mois où les propriétés radiatives des enveloppes étaient identiques nous ont permis d'observer l'effet de confinement thermique propre à la géométrie canyon ainsi que la distribution des températures de surface régulée par la présence ou non de masques proches sur les surfaces étudiées.

Les surfaces faisant face à l'environnement naturel ont montré les plus forts gradients de température durant les cycles journaliers, avec une température maximale lors des angles solaires bas et une température minimale durant la nuit de par leur facteur de forme ouverts sur l'une des faces. Le confinement thermique nocturne observé à l'intérieur des canyons a donné lieu à des différences de températures entre le haut et le bas de la rue allant jusqu'à 2°C pour les surfaces et 1°C sur l'air. Par ailleurs, la distribution des températures de surfaces et d'air dans les bâtiments s'est montrée conforme à la densité d'énergie solaire absorbée par chaque facette du bâti préalablement calculée avec Solene. Les différences de température ambiante maximale à l'intérieur de chaque maquette ont atteint 3,5 à 5°C selon l'emplacement de celle-ci par rapport aux masques solaires proches et lointains, et pour différents moments de la période diurne. La nuit, lorsque l'énergie stockée dans le bâti pendant la journée a été dissipée par rayonnement GLO et par la convection (5-6h après le couché de soleil), toutes les températures d'une rue à l'autre redevenaient plus ou moins similaires. On a constaté tout de même une légère supériorité de température sur l'ambiance du second bâtiment (noté B) en partant de l'ouest, de par sa position en interaction directe avec le bâtiment (noté A) le plus chaud au coucher de soleil, et de par son potentiel de rafraîchissement par échange radiatif inférieur à celui-ci (différence de facteur de forme relatif à leur façade ouest, celui de A est ouvert sur l'environnement ~0,5 et celui de B est limité par le canyon, ~0,25).

Ces 3 dernières remarques sont restées valables pour la période de mesure suivante, où 3 configurations de propriétés radiatives aux façades ont été étudiées simultanément : 2 façades marron standards, 2 façades marron cool et 2 façades asymétriques. A l'application, les deux peintures utilisées avaient une teinte similaire, et un albédo respectif de 0,38 et 0,15, mais après quelques semaines d'exposition au soleil et aux intempéries, la peinture standard a commencé à s'éclaircir, et donc à gagner en réflectivité dans le spectre des visibles. Le traitement statistique des mesures de températures en fréquences cumulées a permis de dégager les tendances des performances thermiques relatives à ces différentes configurations des revêtements de façade. Par rapport au bâtiment A (Peinture standard), désigné comme témoin, les résultats annonçaient une absorption journalière inférieure de 570 Wh/m².jour pour le bâtiment B (façade *ouest* standard, façade *est* cool), de 800 Wh/m².jour pour le bâtiment C (2 façades cool) et de 266 Wh/m².jour pour le bâtiment D (façade *est* standard, façade *ouest* cool). La baisse des températures de surface et d'air sur la scène urbaine relative à cette différence d'énergie solaire surfacique absorbée ne s'est pas avérée flagrante. Et ce d'une part à cause de

l'augmentation constatée de la réflectivité solaire du produit standard, d'autre part à cause de l'effet de confinement déjà fortement marqué, lié à l'agencement géométrique de notre série de rues. La comparaison des températures dans les 3 rues d'une période de mesure à l'autre ont néanmoins montré des modifications des performances, avec une réduction de la durée où les bâtiments composant la rue cool étaient plus chaud que la rue témoin (-7 et -10%), et une augmentation de cette durée pour le bâtiment standard de la rue asymétrique (+7%). Les différences maximales de température n'ont pas notablement évoluées, mais ce phénomène peut être aussi mis sur le compte de la différence de saison pour les 2 périodes de mesure (mai-juillet et juillet-septembre). Ces différences observées de performance entre ces 2 peintures proches permet d'envisager des améliorations du confort thermique dans les bâtiments traités.

Des perspectives d'amélioration du dispositif technique ont été citées dans le chapitre, notamment avec l'ajout d'un masque solaire proche à l'ouest de la rue témoin pour lui confirmer son statut de référence. Du point de vue de la campagne expérimentale, une différence d'albédo plus extrême entre les revêtements étudiés (un noir et un blanc par exemple) pourrait nous aider à établir les performances seuils que l'on peut attendre des stratégies radiatives aux surfaces des canyons. L'application de l'algorithme d'ajustement des réflectivités solaires et des coefficients de convection pourrait être réalisée pour les différentes surfaces de l'enveloppe. Pour ce faire, il faudrait ajouter des capteurs mesurant le flux solaire dans les canyons pour des positions autres que l'horizontale. De plus, les capteurs de flux radiatif se sont révélés fragiles pour nos applications extérieures et leur utilisation devra être repensée.

L'étude expérimentale sur les canyons était représentative d'une unique configuration géométrique de rue, et de plus ne permettait pas de simuler les consommations énergétiques et les apports anthropiques d'une scène urbaine réelle. Les temps nécessaires à l'obtention des données pour l'étude de la variation des températures pour plusieurs types de revêtement (réflectivité solaire) étant assez important, l'utilisation de code numérique de simulation énergétique du bâtiment s'est avérée moins coûteuse en temps. Le dernier chapitre a donc été consacré à l'estimation des consommations énergétiques et du piégeage radiatif selon la valeur des propriétés optiques aux surfaces du bâti de l'environnement urbain.

La première étude concerne l'étude des gains sur le flux de chaleur traversant une,paroi non influencée par les inter-réflexions radiatives (toiture par exemple), escomptés suite à l'application d'une peinture blanche (α_{SOL} = 0,15) et d'une peinture noire colorée cool (α_{SOL} =

0,75) par rapport à une surface de référence noire (α_{SOL} = 0,95). Les performances énergétiques obtenues ramenée au m² de toiture-terrasse pour le climat de La Rochelle, sont plutôt bonnes pour une paroi béton non isolée, avec une consommation énergétique annuelle réduite de 32 et 103 kWh/m².an respectivement soit de 7 et 34% par rapport à la toiture peinte en noir. Pour un élément de toiture isolée selon la RT2005, la réduction relative en pourcentage est globalement la même mais la valeur absolue est réduite à 3,6 et 5,6kWh/m².an.

L'étude numérique avec l'outil Simcanyon, disponible au LEPTIAB, modélisant le couplage entre les consommations énergétiques des bâtiments formant une rue canyon et les conditions thermoaéraulique du volume d'air contenu sous la canopée urbaine ont permis d'ajouter la description du second terme d'apport cyclique journalier régissant l'îlot de chaleur urbain dans les constructions denses, les sources anthropiques.

L'estimation de l'impact de la répartition des propriétés radiatives aux surfaces d'une rue a été réalisée à travers une étude paramétrique sur 6 configurations de réflectivité solaire et d'émissivité GLO impliquant le traitement des chaussées et des façades pour un cas de rue canyon réelle à Athènes. Ce cas d'étude a été choisi car il avait déjà permis les prémisses d'une validation du code numérique (Bozonnet 2005) quant à sa reproduction des écoulements dominants et des champs de température dans la rue comparée à des données expérimentales réalisées lors du projet européen Urbvent (Georgakis et al. 2006). La rue, de longueur 200m, a un ratio H/W égal à 3,3 et les bâtiments ne sont pas isolés conformément aux constructions des années 70-80 à rénover à Athènes et des condenseurs type split pour les systèmes de conditionnement d'air ont été localisés en façade. L'étude des performances a été focalisée sur la réduction de la température des surfaces, de la température de l'air extérieur et des consommations énergétiques en chauffage et rafraîchissement des bâtiments constituant la rue. Les performances maximales par rapport à la rue témoin sont accomplies par l'application d'une peinture blanche sur la chaussée et les façades de la rue (chaussée : $\Delta\rho_{SOL}$ = +0,29, façades : $\Delta\rho_{SOL}$ = +0,63). Les températures ont pu être réduites de 5°C aux surfaces basses des façades, à 14°C en haut de celles-ci en plein été. La diminution correspondante de la consommation énergétique en froid a été évaluée entre 30 et 40% du bas vers le haut. Mais si on cumule ce gain avec les consommations accrues durant la période d'hiver, le gain net affiché s'étend de 11 à 18%. La diminution de la température de l'air moyennée sur le volume d'air compris entre 0,5 et 8m dans l'ensemble de la rue (de hauteur totale 23m), a été évaluée à 2,4°C en moyenne et 4,6°C. La stratégie avec seuls les murs peints en blanc a des résultats

très proches, avec moins de 0,4°C d'écart et même une réduction maximale plus élevée de 0,3°C. La représentation du phénomène d'îlot de chaleur et des pics de puissance associés à la demande en climatisation suivaient bien les données de la littérature, avec un pic de consommation en fin de soirée (19-20h) et la température d'îlot de chaleur qui atteint son maximum entre 23h et 3h du matin.

L'efficacité d'une peinture préparée cool de teinte orange sur son homologue de préparation traditionnelle a été estimée, le gain de réflectivité solaire étant de 0,1. L'amélioration induite par son utilisation sur la demande énergétique nette annuelle évolue entre 2 (bas de la façade) et 3,5% (haut de la façade) et entre 4,2 et 7.8% pour la consommation en climatisation. La réduction de la température sur le volume de la rue peut tout de même atteindre 1°C sur le pic maximal et 0,5°C en moyenne sur la période estivale. Les différences de températures observées en façade se rapproche plus des mesures de notre banc expérimental avec des différences maximums oscillant entre 1 et 4°C. Ces simulations ont confirmé le potentiel de la modification des propriétés radiatives des façades dans un milieu urbain dense. Les peintures colorées cool ont aussi un potentiel non négligeable quand la couleur est exigée au sein de l'environnement urbain.

Le dernier travail identifie la variation du piégeage radiatif induite par 2 stratégies de distribution des réflectivités solaires dans un canyon par rapport à une rue de référence selon le rapport d'aspect géométrique de la rue (H/W de 1 à 4,3), la latitude (37 à 43°) et l'orientation de la rue (E/O, N/S, NE/SO, SE/NO)). Les stratégies envisagées ont été l'augmentation de la réflectivité solaire des façades par une peinture cool de couleur équivalent ($\Delta\rho_{SOL}$ = +0,17) et une stratégie extrême avec la chaussée et les façades peintes en blanc (chaussée : $\Delta\rho_{SOL}$ = +0,29, façades : $\Delta\rho_{SOL}$ = +0,67). Les conclusions étant que pour une latitude fixée :

- L'orientation de la rue pour un ratio fixé joue peu sur le piégeage radiatif pour les 2 façades (rapporté par m²) réalisé par modification des propriétés radiatives par rapport à la rue canyon à raison d'une variation de 0,5% les performances réalisées par les façades cool et de 3,8% pour la configuration blanche.
- La variation du ratio *H*/*W* entre 1 et 4,3 agit sur la réduction des densités d'énergie solaire piégées par les façades d'une rue canyon d'axe E/O définie par sa configuration de propriétés radiatives par rapport à la rue référence à raison de 6% pour le bleu cool et 49% pour le blanc. En axe N/S, l'évolution est de 33% et de 3,5% respectivement.

La variation de la latitude entre 37 et 43° pour un ratio fixé à 1 agit sur la réduction des densités d'énergie solaire piégées par les façades d'une rue canyon d'axe E/O définie par sa configuration de propriétés radiatives par rapport à la rue référence à raison de 1,6 à 7% pour le bleu cool et 6 à 9,5% pour le blanc. Pour tous ces paramètres, la variation principale se retrouve dans la distribution des densités d'énergie solaire absorbées selon la hauteur des surfaces considérées. Et donc chaque configuration de rue canyon peut recevoir un traitement radiatif approprié selon les locaux que l'on cherche à protéger et ce souvent au détriment d'autres surfaces.

En perspectives de ce travail, le modèle d'interactions thermoaéraulique entre la rue canyon et son microclimat devrait être calibré sur les résultats de mesures obtenus sur la plateforme expérimentale ClimaBat. Pour ce faire, il faudrait étudier les profils de vents au dessus de la canopée et dans les rues de la scène urbaine réduite afin d'établir un profil empirique des écoulements dominants. Une première approche a déjà été réalisée à l'aide du logiciel QUIC-URB, qui permet de modéliser les écoulements en 3D autour de formes urbaines simples en utilisant des algorithmes empiriques et l'hypothèse de conservation de masse (Rockle 1990). De plus l'approfondissement de l'étude menée sur l'obtention des coefficients de convection surfaciques par des bilans énergétiques ponctuels aux façades, chaussées et toitures de notre scène urbaine pourrait nous fournir les éléments pour ajuster les équations empiriques liant le coefficient de convection à la vitesse du vent.

Si cette démarche d'optimisation et de comparaison nous mène jusqu'à la validation du code numérique, nous pourrions envisager d'enrichir le modèle pour des bâtiments réalistes comprenant vitrages, gains internes, liaisons thermiques et aérauliques entre locaux. La définition des consommations énergétiques et des rejets anthropiques correspondant gagneraient en précision et on pourrait appliquer le modèle à la comparaison des performances de différentes stratégies de traitement de l'îlot de chaleur urbain au sein d'une rue canyon (moyennant l'ajout d'autres équations dans certains cas comme le transport d'humidité par la végétalisation).

Références

Adnot, J., S. Alvarez, et al. (2004). Cooling the Cities - Rafraîchir les villes. Paris, Presses de l'Ecole des mines ISBN 2-911762-54-1.

Aida, M. and K. Gotoh (1982). "Urban albedo as a function of the urban structure — A two-dimensional numerical simulation." Boundary-Layer Meteorology **23**(4): 415-424.

Akbari, H. (2005). Energy Saving Potentials and Air Quality Benefits of Urban Heat Island Mitigation. EPA. EPA, http://www.epa.gov/hiri/impacts/index.htm.

Akbari, H. (2010). Urban Heat Island Effects and Mitigation Techniques. C. s. Slides. La Rochelle, France.

Akbari, H., S. Bretz, et al. (1997). "Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs." Energy and Buildings **25**(2): 117-126.

Akbari, H., L. Gartland, et al. (1998). Measured energy savings of light colored roofs: Results from three California demonstration sites. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA.

Akbari, H., S. Konopacki, et al. (1999). "Cooling energy savings potential of reflective roofs for residential and commercial buildings in the United States." Energy **24**(5): 391-407.

Akbari, H., R. Levinson, et al. (2005). "Monitoring the energy-use effects of cool roofs on California commercial buildings." Energy and Buildings **37**(10): 1007-1016.

Akbari, H., S. Menon, et al. (2009). "Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO2." Climatic Change **95**(3-4).

Akbari, H., M. Pomerantz, et al. (2001). "Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas." Solar Energy **70**(3): 295-310.

Alexandri, E. and P. Jones (2008). "Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates." Building and Environment **43**(4): 480-493.

Ali-Toudert, F. and H. Mayer (2007). "Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons." Solar Energy **81**(6): 742-754.

Allard, F. and C. Ghiaus (2005). Natural Ventilation in the Urban Environment : Assessment and Design London, earthscan ISBN 9781844071296.

Antoine, M.-J. and D. Groleau (1998). Assessing solar energy and environmental variables in urban outdoor spaces : a simulation tool. Eurosolar, 5th european conference on solar energy in architecture and urban plan, Bonn, Germany.

Assimakopoulos, V. D., C. Georgakis, et al. (2006). "Experimental validation of a computational fluid dynamics code to predict the wind speed in street canyons for passive cooling purposes." Solar Energy **80**(4): 423-434.

Berdahl, P., H. Akbari, et al. (2008). "Weathering of roofing materials - An overview." Construction and Building Materials **22**(4): 423-433.

Berdahl, P. and S. E. Bretz (1997). "Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials." Energy and Buildings **25**(2): 149-158.

Best, M. J. (2006). "Progress towards better weather forecasts for city dwellers: from short range to climate change." Theoretical and Applied Climatology **84**(1): 47-55.

Blocken, B. and J. Carmeliet (2005). "High-resolution wind-driven rain measurements on a low-rise building--experimental data for model development and model validation." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **93**(12): 905-928.

Bougiatioti, F., E. Evangelinos, et al. (2009). "The summer thermal behaviour of "skin" materials for vertical surfaces in Athens, Greece as a decisive parameter for their selection." Solar Energy **83**(4): 582-598.

Bourbia, F. and H. B. Awbi (2004). "Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate: Part 1: Air and surface temperature measurements." Renewable Energy **29**(2): 249-262.

Bouyer, J. (2009). L'impact de l'aménagement urbain sur la consommation énergétique des bâtiments. Architecture. Nantes, CERMA. **Thèse de doctorat**.

Bozonnet, E. (2005). Impact des microclimats urbains sur la demande énergétiques des bâtiments : Cas de la rue canyon. UFR Sciences fondamentales et sciences pour l'ingénieur. La Rochelle, Université de La Rochelle. **Thèse de doctorat:** 175.

Bozonnet, E., R. Belarbi, et al. (2005). "Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach." Solar Energy **79**(1): 10-24.

Bozonnet, E., R. Belarbi, et al. (2007). "Thermal Behaviour of buildings: modelling the impact of urban heat island." Journal of Harbin Institute of Technology **14**(Sup. (2007)): 19-22.

Brau, J., P. Depecker, et al. (1984). Modélisation thermique des bâtiments. Le point sur les avantages et inconvénients des différentes méthodes. AUGC, Cachan

Brown, D. (1997). An improved meteorology for characterizing atmospheric boundary layer turbulence dispersion. Department of Mechanical and Industrial Engineering. Urbana-Champaign, University of Illinois.

Bruse, M. and H. Fleer (1998). "Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model." Environmental Modelling and Software **13**(3-4): 373-384.

Chain, C. (2004). Caractérisation spectrale et directionnelle de la lumière naturelle Application à l'éclairage des bâtiments. mécanique, énergétique, génie civil, acoustique. Lyon, INSA. **doctorat**.

Cheng, V., E. Ng, et al. (2005). "Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate." Solar Energy **78**(4): 528-534.

Christen, A. and R. Vogt (2004). "Energy and radiation balance of a central European city." International Journal of Climatology **24**(11): 1395-1421.

Clear, R. D., L. Gartland, et al. (2001). An empirical correlation for the outside convective air-film coefficient for horizontal roofs, Lawrence Berkeley National Laboratory.

Codato, G., A. P. Oliveira, et al. (2008). "Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil." Theoretical and Applied Climatology **93**(1): 57-73.

Conti, S., P. Meli, et al. (2005). "Epidemiologic study of mortality during the Summer 2003 heat wave in Italy." Environmental Research **98**(3): 390-399.

Corburn, J. (2009). "Cities, climate change and urban heat island mitigation: Localising global environmental science." Urban Studies **46**(2): 413-427.

Davies, M., P. Steadman, et al. (2008). "Strategies for the modification of the urban climate and the consequent impact on building energy use." Energy Policy **36**(12): 4548-4551.

Doulos, L., M. Santamouris, et al. (2004). "Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials." Solar Energy **77**(2): 231-249.

Dousset, B. and F. Gourmelon (2003). "Satellite multi-sensor data analysis of urban surface temperatures and landcover." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **58**(1-2): 43-54.

Dupont, S. (2001). Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO. P. Mestayer. Nantes, Université de Nantes, Nantes, FRANCE.

Eliasson, I., B. Offerle, et al. (2006). "Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon." Atmospheric Environment **40**(1): 1-16.

Erell, E. (2008). The application of urban climate research in the design of cities. Advances in building energy research. earthscan, earthscan. **2:** 95-121.

Erell, E. and T. Williamson (2006). "Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station." International Journal of Climatology **26**(12): 1671-1694.

Fanger, P. O. (1972). Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen, Denmark, DANISH TECHNICAL PRESS. ISBN 0070199159.

Gagge, A. P., A. P. Fobelets, et al. (1986). "A standard predictive index of human response to the thermal environment." ASHRAE transactions **92**(2B): 709-731.

Georgakis, C. and M. Santamouris (2006). "Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes." Energy and Buildings **38**(4): 367-376.

Georgakis, C. and M. Santamouris (2008). "On the estimation of wind speed in urban canyons for ventilation purposes--Part 1: Coupling between the undisturbed wind speed and the canyon wind." Building and Environment **43**(8): 1404-1410.

Geros, V., M. Santamouris, et al. (1999). "Experimental evaluation of night ventilation phenomena " Energy and Buildings **29**(2): 141-154.

Giridharan, R., S. S. Y. Lau, et al. (2007). "Urban design factors influencing heat island intensity in high-rise high-density environments of Hong Kong." Building and Environment **42**(10): 3669-3684.

Gomes, L., M. Mallet, et al. (2008). "Effects of the physical and optical properties of urban aerosols measured during the CAPITOUL summer campaign on the local direct radiative forcing." Meteorology and Atmospheric Physics **102**(3): 289-306.

Griggs, E. I., T. R. Sharp, et al. (1989). Guide for Estimating Differences in Building Heating and Cooling Energy Due to Changes in Solar Reflectance of a Low-Sloped Roof. Oak Ridge, USA, Oak Ridge National Laboratory-Energy Division

Grimmond, C. S. B., H. A. Cleugh, et al. (1991). "An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes." Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere **25**(3): 311-326.

Grimmond, C. S. B. and T. R. Oke (2002). "Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS)." Journal of Applied Meteorology **41**(7): 792-810.

Gueymard, C. A. (2006). "Reference solar spectra: Their evolution, standardization issues, and comparison to recent measurements." Advances in Space Research **37**(2): 323-340.

Harlan, S. L., A. J. Brazel, et al. (2006). "Neighborhood microclimates and vulnerability to heat stress." Social Science & Medicine **63**(11): 2847-2863.

Hassid, S., M. Santamouris, et al. (2000). "The effect of the Athens heat island on air conditioning load." Energy and Buildings **32**(2): 131-141.

Hotchkiss, R. S. and F. H. Harlow (1973). Air pollution transport in street canyons, Prepared by Los Alamos National Laboratory for U.S. Environmental Protection Agency.

Hsieh, C.-M., T. Aramaki, et al. (2007). "The feedback of heat rejection to air conditioning load during the nighttime in subtropical climate." Energy and Buildings **39**(11): 1175-1182.

Huang, H., R. Ooka, et al. "CFD analysis on traffic-induced air pollutant dispersion under non-isothermal condition in a complex urban area in winter." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics **96**(10-11): 1774-1788.

Ichinose, T., K. Shimodozono, et al. (1999). "Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo." Atmospheric Environment **33**(24-25): 3897-3909.

Idczak, M., P. Mestayer, et al. (2007). "Micrometeorological Measurements in a Street Canyon during the Joint ATREUS-PICADA Experiment." Boundary-Layer Meteorology **124**(1): 25-41.

IEA (2008). Chapter 8 : Energy use in cities. World Energy Outlook 2008. I. E. Agency. Paris, International Energy Agency**:** 179-193.

Inagaki, A. and M. Kanda (2008). "Turbulent flow similarity over an array of cubes in near-neutrally stratified atmospheric flow." Journal of Fluid Mechanics **vol. 615**: 101-120.

Incropera, F. P., D. P. De Witt, et al. (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, john Wiley & Sons ISBN *978-0-471-45728-2.

Johansson, E. (2006). "Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco." Building and Environment **41**(10): 1326-1338.

Kanda, M. (2006). "Progress in the scale modeling of urban climate: Review." Theoretical and Applied Climatology **84**(1): 23-33.

Kanda, M., T. Kawai, et al. (2005). "A Simple Energy Balance Model for Regular Building Arrays." Boundary-Layer Meteorology **116**(3): 423-443.

Kikegawa, Y., Y. Genchi, et al. (2006). "Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning." Applied Energy **83**(6): 649-668.

Kikegawa, Y., Y. Genchi, et al. (2003). "Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands." Applied Energy **76**(4): 449-466.

Kjaersgaard, J. H., F. L. Plauborg, et al. (2007). "Comparison of models for calculating daytime long-wave irradiance using long term data set." Agricultural and Forest Meteorology **143**(1-2): 49-63.

Klein, P., B. Leitl, et al. (2007). "Driving physical mechanisms of flow and dispersion in urban canopies." International Journal of Climatology **27**(14): 1887-1907.

Kobus, C. J. (2005). "Utilizing disk thermistors to indirectly measure convective heat transfer coefficients for forced, natural and combined (mixed) convection." Experimental Thermal and Fluid Science **29**(6): 659-669.

Kobus, C. J. and G. L. Wedekind (2001). "An experimental investigation into natural convection heat transfer from horizontal isothermal circular disks." International Journal of Heat and Mass Transfer **44**(17): 3381-3384.

Kollie, T. G., F. J. Weaver, et al. (1990). "Evaluation of a commercial, portable, ambient-temperature emissometer." Review of scientific instruments CODEN RSINAK **61**(n°5): pp. 1509-1517

Kolokotroni, M., I. Giannitsaris, et al. (2006). "The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies." Solar Energy **80**(4): 383-392.

Kolokotroni, M. and R. Giridharan (2008). "Urban heat island intensity in London: An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer." Solar Energy **82**(11): 986-998.

Kondo, Y. (2006). Current state and future prospect of Cool Roofs in Japan. International Workshop on Countermeasures to Urban Heat Islands. J. M. o. L. IEA, Infrastructure and Transport. Tokyo.

Krayenhoff, E. and J. Voogt (2007). "A microscale three-dimensional urban energy balance model for studying surface temperatures." Boundary-Layer Meteorology **123**(3): 433-461.

Krüger, E. L. and D. Pearlmutter (2008). "The effect of urban evaporation on building energy demand in an arid environment." Energy and Buildings **40**(11): 2090-2098.

Landsberg, H. E. (1981). The urban climate. New-York, A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, Publishers ISBN 0-12-435960-4.

Levinson, R., H. Akbari, et al. (2005). "Inclusion of cool roofs in nonresidential Title 24 prescriptive requirements." Energy Policy **33**(2): 151-170.

Levinson, R., P. Berdahl, et al. (2005). "Solar spectral optical properties of pigments--Part I: model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements." Solar Energy Materials and Solar Cells **89**(4): 319-349.

Levinson, R., P. Berdahl, et al. (2005). "Solar spectral optical properties of pigments--Part II: survey of common colorants." Solar Energy Materials and Solar Cells **89**(4): 351-389.

Levinson, R., P. Berdahl, et al. (2005). "Effects of soiling and cleaning on the reflectance and solar heat gain of a light-colored roofing membrane." Atmospheric Environment **39**(40): 7807-7824.

Li, X., Z. Yu, et al. (2005). "Numerical analysis of outdoor thermal environment around buildings." Building and Environment **40**(6): 853-866.

Lun, I., A. Mochida, et al. (2009). Progress in Numerical Modelling for Urban Thermal Environment Studies ABER 3, Advances in Building Energy Research. M. Santamouris, Earthscan. **3:** pp. 147-188(42)

Martin, M. and P. Berdahl (1984). "Characteristics of infrared sky radiation in the United States." Solar Energy **33**(3-4): 321-336.

Masson, V. (2000). "A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models." Boundary-Layer Meteorology **94**(3): 357-397.

Matzarakis, A. and B. Amelung (2008). Physiological Equivalent Temperature as Indicator for Impacts of Climate Change on Thermal Comfort of Humans. Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health**:** 161-172.

Mills, G. (2008). "Micro- and mesoscale climatology." Progress in Physical Geography **32**(3): 293-301.

Mills, G. M. (1993). "Simulation of the energy budget of an urban canyon--I. Model structure and sensitivity test." Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere **27**(2): 157-170.

Mitalas, G. P. and D. G. Stephenson (1967). "Room thermal response factors." ASHRAE Trans. **73** (3): p. 1.

Murakami, S. (2006). Technology and Policy Instruments for Mitigating the Heat Heat-island Effect. International Workshop on Countermeasures to Urban Heat-Islands. Tokyo, IEA with the Japanese Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Nakamura, Y. and T. R. Oke (1988). "Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon." Atmospheric Environment (1967) **22**(12): 2691-2700.

Niachou, K., I. Livada, et al. "Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions--Part I: Air and surface temperatures." Building and Environment **In Press, Corrected Proof**.

Niachou, K., I. Livada, et al. "Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions. Part II: Airflow analysis." Building and Environment **In Press, Corrected Proof**.

Nichol, J. E., W. Y. Fung, et al. (2009). "Urban heat island diagnosis using ASTER satellite images and [`]in situ' air temperature." Atmospheric Research **94**(2): 276-284.

Nicholson, S. E. (1975). "A pollution model for street-level air." Atmospheric Environment (1967) **9**(1): 19-31.

Nyuk Hien, W. and C. Yu (2009). Tropical Urban Heat Islands : Climate, Buildings and Greenery. Oxon, Taylor and Francis, Routledge, UK ISBN 978-0-415-41104-2.

Offerle, B., I. Eliasson, et al. (2007). "Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon." Boundary-Layer Meteorology **122**(2): 273-292.

Offerle, B., C. S. B. Grimmond, et al. (2006). "Temporal variations in heat fluxes over a central European city centre." Theoretical and Applied Climatology **84**(1): 103-115.

Oke, T. R. (1987). Boundary layer climates, University press, Cambridge ISBN 0 415 04319 0.

Oke, T. R. (1988). "Street design and urban canopy layer climate." Energy and Buildings **11**(1-3): 103-113.

Oliveira Panão, M. J. N., H. J. P. Gonçalves, et al. "Numerical analysis of the street canyon thermal conductance to improve urban design and climate." Building and Environment **In Press, Corrected Proof**.

Padet, J. (1997). Principes des transferts convectifs. Toulouse ISBN 2-84054-050-9.

Papadopoulos, A. M. (2001). "The influence of street canyons on the cooling loads of buildings and the performance of air-conditioning systems " Energy and Buildings **Volume 33**(Issue 6): Pages 601-607

Parker, D. S. and J. S. F. Barkaszi (1997). "Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida." Energy and Buildings **25**(2): 105-115.

Parker, D. S., J. K. Sonne, et al. (2002). Comparative Evaluation of the Impact of Roofing Systems on Residential Cooling Energy Demand in Florida. 2002 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in buildings, Pacific, California.

Pearlmutter, D., P. Berliner, et al. (2007). "Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyons." Building and Environment **42**(6): 2396-2409.

Pérez-García, M. (2004). "Simplified modelling of the nocturnal clear sky atmospheric radiation for environmental applications." Ecological Modelling **180**(2-3): 395-406.

Pigeon, G., A. Lemonsu, et al. (2008). "De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville." La Météorologie **62**: PP. 39-47.

Radziemska, E. and W. M. Lewandowski (2001). "Heat transfer by natural convection from an isothermal downward-facing round plate in unlimited space." Applied Energy **68**(4): 347-366.

Robinson, D., N. Campbell, et al. (2007). "SUNtool - A new modelling paradigm for simulating and optimising urban sustainability." Solar Energy **81**(9): 1196-1211.

Rockle, R. (1990). Bestimmung der Stomungsverhaltnisse im Bereich komplexer Bebauungsstrukturen., Germany.
Sailor, D. J. and N. Dietsch (2007). "The urban heat island Mitigation Impact Screening Tool (MIST)." Environmental Modelling & Software **22**(10): 1529-1541.
Santamouris, M. (2001). Energy and Climate in the Urban Built Environment. Londres, James & James, Science Publishers ISBN 1873936907.
Santamouris, M. and C. Georgakis (2003). "Energy and indoor climate in urban environments: Recent trends." Building Services Engineering Research and Technology **24**(2): 69-81.
Santamouris, M., N. Papanikolaou, et al. (2001). "On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings." Solar Energy **70**(3): 201-216.
Santamouris, M., K. Pavlou, et al. (2007). "Recent progress on passive cooling techniques: Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households." Energy and Buildings **39**(7): 859-866.
Spronken-Smith, R. A. and T. R. Oke (1999). "Scale Modelling of Nocturnal Cooling in Urban Parks." Boundary-Layer Meteorology **93**(2): 287-312.
Spronken-Smith, R. A., T. R. Oke, et al. (2000). "Advection and the surface energy balance across an irrigated urban park." International Journal of Climatology **20**(9): 1033-1047.
Stathopoulou, M. and C. Cartalis (2007). "Daytime urban heat islands from Landsat ETM+ and Corine land cover data: An application to major cities in Greece." Solar Energy **81**(3): 358-368.
Streutker, D. R. (2003). "Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas." Remote Sensing of Environment **85**(3): 282-289.
Swaid, H. (1993). "The role of radiative-convective interaction in creating the microclimate of urban street canyons." Boundary-Layer Meteorology **64**(3): 231-259.
Synnefa, A., M. Santamouris, et al. (2007). "Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions." Energy and Buildings **39**(11): 1167-1174.
Synnefa, A., M. Santamouris, et al. (2007). "On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment." Solar Energy **81**(4): 488-497.
Synnefa, A., M. Santamouris, et al. (2006). "A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment." Solar Energy **80**(8): 968-981.
Taha, H. (1997). "Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin." Atmospheric Environment **31**(11): 1667-1676.
Taha, H. (2008). "Meso-urban meteorological and photochemical modeling of heat island mitigation." Atmospheric Environment **42**(38): 8795-8809.
Taha, H. (2008). "Urban Surface Modification as a Potential Ozone Air-quality Improvement Strategy in California: A Mesoscale Modelling Study." Boundary-Layer Meteorology **127**(2): 219-239.
Tamura, T., J. Nagayama, et al. (2006). LES Estimation of Environmental Degradation at the Urban Heat Island due to Densely-Arrayed Tall Buildings 17th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, San Diego, CA.
Theodosiou, T. (2009). "Green Roofs in Buildings: Thermal and Environmental Behaviour." Advances in Building Energy Research **3**: 271-288.

Voogt, J. A. and T. R. Oke (1998). "Radiometric Temperatures of Urban Canyon Walls obtained from Vehicle Traverses." Theoretical and Applied Climatology **60**(1): 199-217.

Voogt, J. A. and T. R. Oke (2003). "Thermal remote sensing of urban climates." Remote Sensing of Environment **86**(3): 370-384.

Walton, G. N. (1983). Thermal Analysis Research Program Reference Manual. W. National Bureau of Standards, DC, 20234 Washington, DC, National Bureau of Standards. **NBSIR 83-2655**.

Watkins, R., J. Palmer, et al. (2002). "The balance of the annual heating and cooling demand within the London urban heat island " Building Services Engineering Research and Technology **23**(4): 207-213

Williamson, T. J. and E. Erell (2001). Thermal performance simulation and the urban microclimate:measurements and prediction. Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brazil.

Yamagata, H., M. Yoshizawa, et al. (2008). "Heat island mitigation using water retentive pavement sprinkled with reclaimed wastewater." Water Science & Technology **57**(5): 763–771.

Yamartino, R. J. and G. Wiegand (1986). "Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence and pollution concentration fields within an urban street canyon." Atmospheric Environment(20): 2137-2156.

Yezioro, A., I. G. Capeluto, et al. (2006). "Design guidelines for appropriate insolation of urban squares." Renewable Energy **31**(7): 1011-1023.

Zinzi, M., A. Fanchiotti, et al. (2007). Use of cool roof to reduce the energy demand and consumption of commercial buildings at Mediterranean latitudes. International Conference "Sustainable Building 2007", South Europe, in house publishing.

ANNEXES 1: Correction de la température du ciel

L'ensemble des grandeurs physiques mesurées ont été échantillonnées toutes les 15 minutes, puis toutes les 10. Le capteur CG3 (pyrgéomètre), composé d'un corps noir, génère une tension U_{emf} proportionnelle à l'échange radiatif GLO (thermiques) entre celui-ci et l'objet lui faisant face. Ce qui implique la génération d'un voltage positif à la station d'acquisition lorsque l'objet visé est plus chaud que le capteur abrité par le CNR1 et un voltage négatif lorsque cet objet est plus froid. Par conséquent, si nous utilisons notre pyrgéomètre de manière à mesurer le flux thermique GLO émis par le ciel (ou le sol), on doit prendre en compte le flux émis par le capteur lui-même. La température du capteur $T_{capteur}$ (en K) est mesurée par une sonde platine Pt100 intégrée au corps du CNR1, et sa valeur instantanée en degrés Celsius est reportée tous les quarts d'heure sur les données de la centrale de mesures. Nous en déduisons donc le rayonnement atmosphérique incident E_{ciel} par la formule :

$$E_{ciel} = U_{emf} / S + \sigma \cdot T_{capteur}^4 \qquad \text{Équation 39}$$

Avec S, la sensibilité du capteur, σ, la constante de Stefan-Boltzmann. Les différentes acquisitions de données qui ont été lancées jusqu'au 20 juin 2009 ont montrées des températures du ciel étonnamment hautes (42 à 78°C), celle-ci normalement comprise entre -20 et 20°C selon la couverture nuageuse. Afin de comprendre les fluctuations réelles du flux atmosphérique GLO incident, et de corriger les mesures de la première année d'expérience, nous avons utilisé un modèle simple de description de l'équilibre énergétique entre l'atmosphère et la surface terrestre (Pérez-García 2004). En l'absence de tout autre mécanisme de transfert de chaleur, la température d'un corps noir idéal en équilibre avec la surface « fictive » du ciel atteindrait une température fictive équivalente appelée, T_{ciel} définie comme :

$$T_{ciel} = \left(\frac{R\downarrow}{\sigma} \right)^{1/4} \qquad \text{Équation 40}$$

σ la constante de Stefan-Boltzmann et R l'éclairement atmosphérique GLO incident. T_{ciel} (K) peut aussi s'exprimer comme une fonction de la température sèche au sol, T_{bs} (K) par l'équation suivante :

$$T_{ciel} = \varepsilon_{ciel}^{1/4} . T_{bs} \qquad \text{Équation 41}$$

En utilisant le concept d'émissivité équivalente du ciel, définie comme l'émissivité d'un corps gris à la même température que l'air au niveau du sol.

$$\varepsilon_{ciel} = \frac{R\downarrow}{\sigma T_{bs}^4} \qquad \text{Équation 42}$$

On peut alors considérer que pour un ciel clair, sans nuage la température du ciel est inférieure à celle de l'air ambiant et au contraire, elle s'en rapprochera pour un ciel entièrement couvert avec ε_{ciel} égale à 1. La Figure 135 montre cette évolution pour un capteur qui fonctionne. Des formules simplifiées pour estimer l'émissivité du ciel, en particulier en situation dégagée ont été déterminées par de nombreux auteurs (fin de l'ANNEXE 1) fonctions de la température de bulbe humide et de la pression de vapeur au sol. Des coefficients peuvent y être apposés en cas de ciel couvert reliés aux types de nuage et à la couverture nuageuse du ciel, mais ce sont des informations dont nous ne disposons pas.

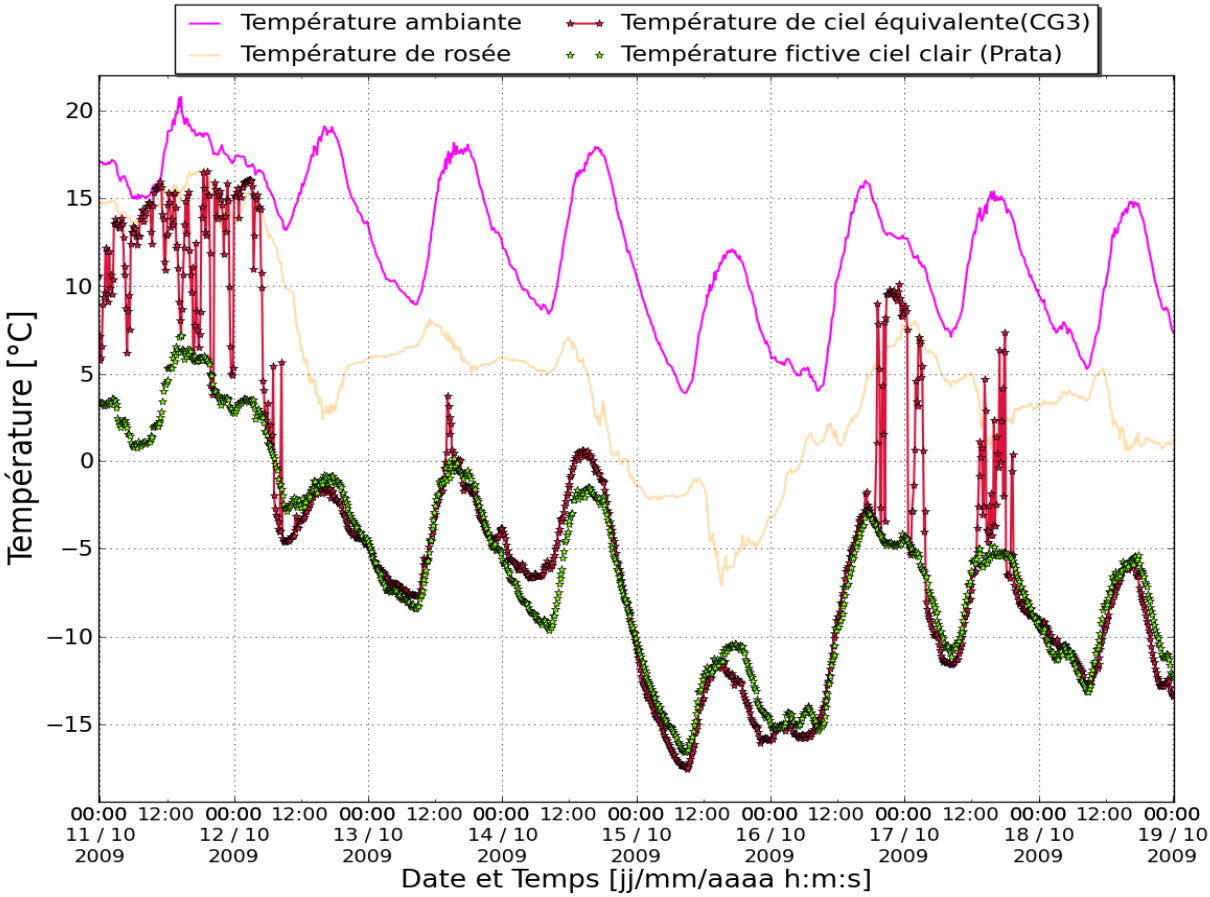


Figure 135 : Evolution des températures sèches et de bulbe humide de l'air ambiant ainsi que de la température du ciel mesurée et calculée (pour un ciel clair)

La Figure 136 montre l'évolution de ce flux incident atmosphérique en fonction du rayonnement solaire, on remarque que la valeur calculée du flux GLO par le modèle de Prata produit une bonne prédiction pour les jours de ciels clairs. Ce modèle donne les meilleurs résultats avec celui de Brown pour La Rochelle.

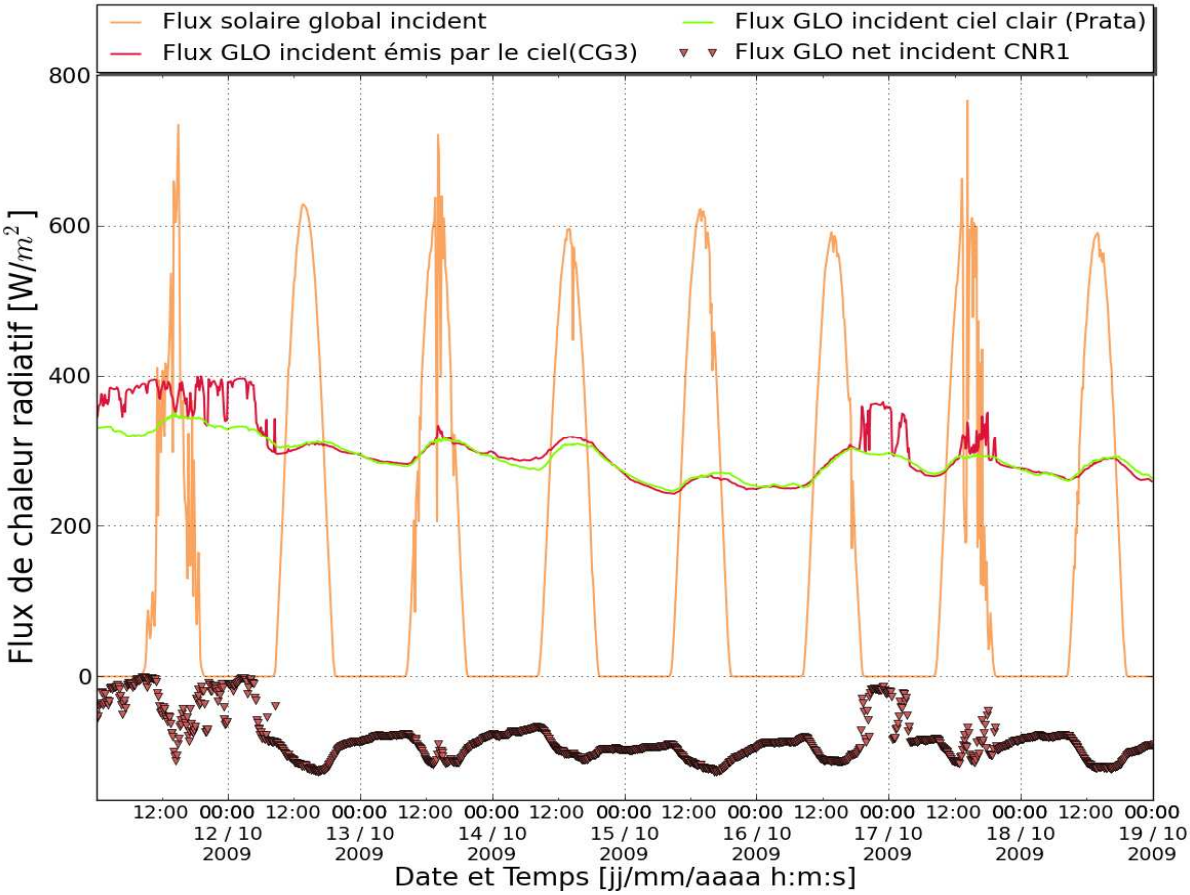


Figure 136 : Évolution des flux solaire et atmosphérique incidents ainsi que le flux atmosphérique calculé (pour un ciel clair), et le flux net GLO au corps noir constituant le capteur de flux.

Le flux net incident au CNR1 montre la valeur du flux net GLO au capteur radiatif (corps noir dans les GLO, insensibles aux CLO) celui-ci est constamment négatif pour les ciels dégagés et égal à zéros pour les périodes nuageuses.

Dans l'optique de corriger la température du capteur, nous avons tracé son évolution en fonction de la température de l'air et du flux de chaleur radiatif CLO incident (Figure 137). La droite grise représente l'égalité de température entre l'air et le capteur. Pendant la nuit, le cap-

teur est toujours quelques dixièmes de degrés inférieures. Pour des ensoleillements inférieurs à 150 W/m², la température varie entre -0.5 et +0.5°C par rapport à l'air.

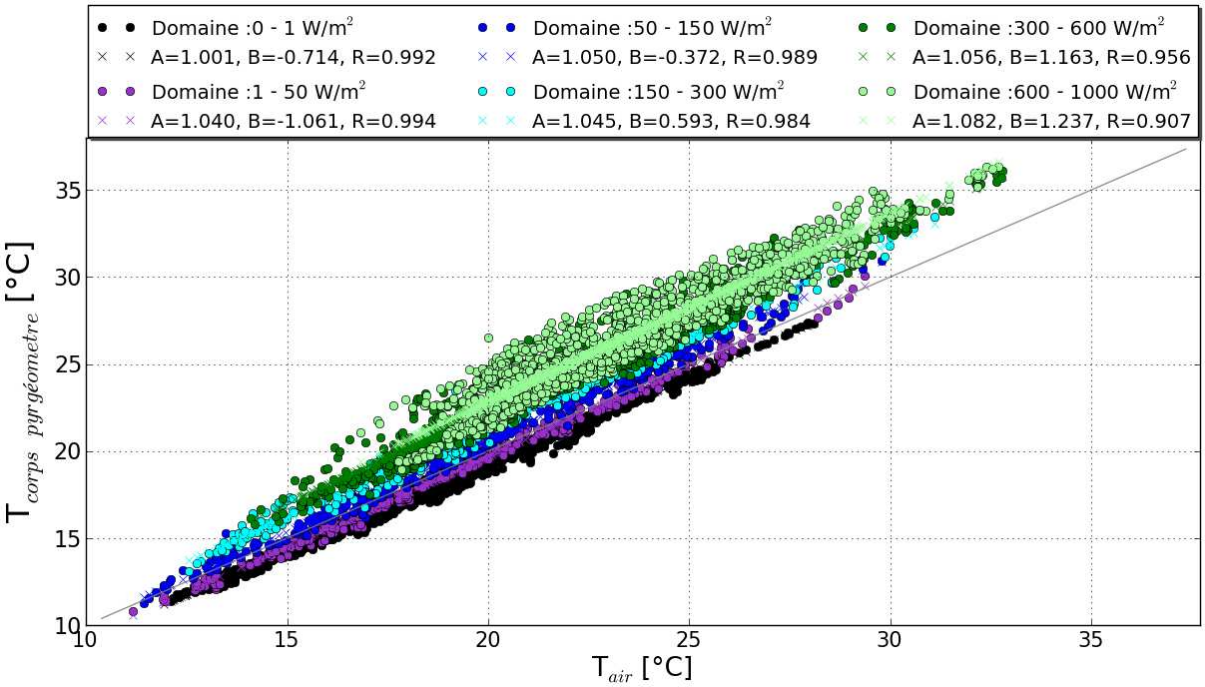


Figure 137 : Évolution de la température du capteur en fonction de la température de l'air et du domaine de flux radiatif CLO incident

Pour les valeurs d'ensoleillement supérieures, sa température fluctue entre 1 et 3 °C au dessus de celle de l'air. Ces variations montrent une sensibilité du capteur à la température du boitier le contenant, ou alors une légèrement sélectivité absorbante du corps noirs dans une partie du spectre CLO. Ce qui ne devrait pas être si l'appareil était parfaitement conçu. La solution exacte serait de faire un bilan énergétique complet du corps noir en connaissant le montage exact de l'appareil. La correction du capteur selon la température de l'air et le flux solaire incident ne s'est pas montrée satisfaisant, les points expérimentaux et le modèle de Prata ne sont pas bien en phase pour les journées de ciel clair. Kjaersgaard et al. (2007) suggèrent que les modèles simplifiés sont incapables de reproduire exactement le comportement radiatif de la voûte céleste.

ANNEXE 2 : Modèles de ciels clairs

Le coefficient d'émissivité atmosphérique est évalué par des modèles pour ciel clair imputables à Walton Walton 1983, Martin et Berdahl Martin et al. 1984 ou Brown Brown 1997 qui sont fonction de la température d'air ambiant et de son humidité relative.

(11) $$\varepsilon_{ciel} = 0.787 + 0.764 \ln\left(\frac{T_{dp}}{273.15}\right)$$ Équation 43

(2) $$\varepsilon_{ciel} = 0.711 + 0.764 \cdot T_1 (0.56 + 0.73.T_1)$$
$$T_1 = 0.01(T_{dp} - 273.15)$$ Équation 44

(12) $$\varepsilon_{ciel} = 0.65 + 0.41 \cdot P_v^{0.9} \exp\left(\sum_{i=1}^{3} A_i (T_a - 240)^i\right)$$ Équation 45

$$Où \quad A_1 = -0.0103, \quad A_2 = -6.1\times10^{-6}, \quad A_3 = 6.1\times10^{-6}$$

Pv est en kPa, le terme de pression de vapeur saturante peut se retrouver grâce à nos mesures d'humidité et de température faites sur l'air grâce à la formule :

$$HR(\%) = \frac{P_v}{P_v(sat)} \times 100$$
$$\log_{10}(P_v sat(\theta)) = \frac{7{,}625 \times \theta}{241 + \theta} + 2{,}7877$$ Équation 46

Cette formule est valable pour des températures, θ, situées entre 0 et 50°C, et la pression de vapeur saturante est obtenue en Pascal. Martin et Berdahl donnent aussi des formules relatives à des ciels couverts mais elles demandent d'importantes connaissances météorologiques et une observation assidue (forme et hauteur des nuages). Certaines stations météorologiques font ce genre de relevés. Pour la température de rosée nous avons utilisé la formule de Manius-Tetens :

$$T_{dp} = \frac{b \cdot \alpha(T, HR)}{a - \alpha(T, HR)}$$
$$avec: \quad \alpha(T, HR) = \frac{a \cdot T}{b + T} + \ln RH$$
$$a = 17{,}27 \quad et \quad b = 237{,}7 \quad [°C]$$ Équation 47

ANNEXE 3 : Moyenne des vitesses et directions du vent

Ainsi, le calcul des moyennes le plus classique pourrait se faire sur un cercle trigonométrique en considérant des vecteurs vitesses du vent indépendant de la direction. La direction formerait un angle β avec la direction 0° synonyme de vent du Nord. On calculerait alors un angle moyen en moyennant les cosinus et sinus des angles mesurés sur la période considérés

$$A = \left(\frac{\sum_{i}^{n} \cos(\beta_i)}{n} \right) . \vec{x}$$ Équation 48

$$B = \left(\frac{\sum_{i}^{n} \sin(\beta_i)}{n} \right) . \vec{y}$$ Équation 49

La vitesse moyenne est ensuite obtenue en faisant la norme de la somme des vecteurs individuels représentés dans un espace normé.

$$V = \sqrt{\left(V.\sin\left(\beta_{moyen}\right)\right)^2 + \left(V.\cos\left(\beta_{moyen}\right)\right)^2}$$ Équation 50

Notre deuxième solution qui semble plus intéressante pour comparer à des valeurs en flux d'air du type de celles que nous réalisons dans le modèle zonal sur les rues canyons consiste à traiter des moyennes de direction du vent en pondérant par la vitesse.

$$\vec{A} = \left(\frac{\sum_{i}^{n} V_i \times \cos(\beta_i)}{\sum_{i}^{n} V^i} \right) . \vec{x} \quad et \quad \vec{\mathbf{B}} = \left(\frac{\sum_{i}^{n} V_i \times \sin(\beta_i)}{\sum_{i}^{n} V^i} \right) . \vec{y}$$ Équation 51

$$V_{moy} = \sqrt{(A)^2 + (B)^2}$$

$$\underbrace{Sin\left(\alpha_{moy}\right) = \frac{B}{V} \quad et \quad Cos\left(\alpha_{moy}\right) = \frac{A}{V}}_{\alpha_{moy}}$$

Cette solution ne s'adapte pas au banc toiture bien qu'elle puisse être intéressant pour obtenir le flux réel d'air ayant transité au dessus de nos échantillons.

ANNEXE 4 : méthode de détermination du coefficient d'échanges convectifs

Théorie

La convection inclus le transfert d'énergie dégagé par le mouvement d'un volume de fluide considéré (advection) et par le mouvement aléatoire des molécules du fluide (conduction ou diffusion). Les concepts de couche limite thermique et de couche limite de vitesse (CL) sont centraux aux échanges de chaleur par convection entre une surface et un écoulement passant au dessus de celle-ci. Pour les objet de type plaques planes, des corrélations semi-empiriques ont été développées en laboratoire avec un écoulement directionnel et un débit d'air constant celles-ci sont rappelées dans le Tableau 18 (Formules de Mac Adams (Incropera et al. 2007),Kobus 2005 , Radziemska et al. 2001).

Tableau 18: corrélations pour le flux de chaleur convectif lié à l'écoulement d'air

Type de convection	Domaine d'applicabilité	Nombre de Nusselt (Nu)
naturelle	$\Delta T>0$, $Ra < 10^7$ (laminaire)	$0.54*Ra_D^{1/4}$
	$\Delta T>0$, $10^7 < Ra < 10^{10}$ (turbulent)	$0.15*Ra_D^{1/3}$
	$\Delta T>0$, $10^2 < Ra < 10^5$ (Kobus et al. 2001)	$1.759*Ra_D^{0.15}$
	$\Delta T<0$, $10^5 < Ra < 10^{10}$	$0.27*Ra_D^{1/4}$
	$\Delta T<0$, $10^4 < Ra < 10^5$ (Radziemska et al 2001)	$0.68*Ra_R^{1/5}$
forcée	$Re < 10^5$ (laminaire)	$0.332*Re_x^{1/2}Pr^{1/3}$
	$10^5 < Re < 10^8$ (turbulent)	$0.0296*Re_x^{4/5}Pr^{1/3}$

Pour la convection forcée, la longueur caractéristique, *x* dans le tableau ci-dessus est la distance moyenne des bords d'attaque de la plateforme au point auquel le nombre de Reynolds est évalué. Le poids relatif de la convection forcée et de la convection naturelle dans l'échange de chaleur convectif est exprimé par la quantité Gr/Re^2 avec *Gr*, le nombre de Grashof, qui est décrit comme une mesure du ratio entre les forces liées au gradient thermique et les forces d'inertie. On s'attend à une domination de la convection naturelle lorsque $Gr/Re^2 >> 1$, de la convection forcée lorsque $Gr/Re^2 << 1$ et d'importance égale pour un coef-

ficient sans dimension ≈ 1. Dans les 2 premiers cas, le terme faible peut être éliminé mais la littérature ne fournit que très peu d'information quant à la démarche à suivre pour leur combinaison dans ce dernier cas. La voie la plus simple est l'addition des termes.

Ajustement des données expérimentales par la méthode de minimisation

A la manière décrite dans le paragraphe 0, le terme situé à droite de l'équation 52 est minimisé par l'ajustement du coefficient h_C aux données expérimentales situées dans le membre de gauche.

$$\alpha_{sol} \cdot E_{sol} + \varepsilon_{GLO}\left(E_{GLO} - \sigma \cdot T_S^4\right) = h_C \cdot \left(T_S - T_{air}\right) \qquad \text{Équation 52}$$

Nous allons utiliser la méthode choisie par Clear et al (Clear et al. 2001) après considération des possibilités, Ils ont choisi les 2 fonctions suivante pour établir l'ajustement de leur modèle de convection (ajustement par la méthode des moindres carrés ou par minimisation):

$$\begin{aligned} f_1\left(h_n, h_f\right).\Delta T &= \left[A.h_n + B.h_f\right].\Delta T \quad (a) \\ f_2\left(h_n, h_f\right).\Delta T &= \left[\eta.A.h_n + B.h_f\right].\Delta T \quad (b) \end{aligned} \qquad \text{Équation 53}$$

$$avec \quad \eta = \frac{\ln\left(1 + {Gr_x}/{\mathrm{Re}_x^2}\right)}{1 + \ln\left(1 + {Gr_x}/{\mathrm{Re}_x^2}\right)}$$

Les coefficients h_n et h_f sont obtenus d'après les nombres de Nusselt semi-empirique calculé dans le tableau 18, et l'équation (a) suppose les 2 termes comme additif. Si les corrélations du tableau 18 ainsi que les hypothèses d'additivité sont vérifiées, les coefficients *A* et *B* devraient prendre une valeur de 1, signifiant ainsi que les équations pour une plaque plane sont applicables à un élément de toiture, si leur valeur est plus importante, elles serviront de correctifs pour appliquer les corrélations empiriques pour notre banc. L'équation (b) suppose que les termes forcé et naturel sont également additifs, mais que l'effet du à la poussée thermique est supprimé lorsque le nombre de Reynolds atteint des valeurs considérables.

En combinant les expressions pour la convection naturelle et la convection forcée, ils obtiennent les équations générales pour le coefficient de transfert convectif :

Tableau 19 : Expressions du coefficient de transfert convectif moyenné sur une surface horizontale pour toutes les directions du vent pour une forme rectangulaire ou circulaire.

Domaine du ΔT	Domaine de x	h_x	
$\Delta T \geq 0$	$x \geq x_c \approx 0$	$\eta.\frac{k}{L_n}.0{,}15.Ra_{L_n}^{1/3} + \frac{k}{x}.R_f.0{,}0296\,\mathrm{Re}_x^{4/5}.\mathrm{Pr}^{1/3}$	Convection naturelle & convection forcée turbulente
$\Delta T < 0$	$x < x_c$ $\approx 5\mathrm{x}10^5\mu/(\rho w)$	$\eta.\frac{k}{L_n}.0{,}27.Ra_{L_n}^{1/4} + \frac{k}{x}.R_f.0{,}332\,\mathrm{Re}_x^{1/2}.\mathrm{Pr}^{1/3}$	Convection naturelle & convection laminaire turbulente
	$x \geq x_c$ $\approx 5\mathrm{x}10^5\mu/(\rho w)$	$\eta.\frac{k}{L_n}.0{,}27.Ra_{L_n}^{1/4} + \frac{k}{x}.R_f.0{,}0296\,\mathrm{Re}_x^{4/5}.\mathrm{Pr}^{1/3}$	Convection naturelle & convection forcée turbulente

Dans cette table, *k* est la conductivité thermique de l'air, *Ln* est la longueur caractéristique à considérer pour la convection naturelle, donnée comme le ratio de la surface de toiture sur le périmètre de toiture, et *x* est la longueur caractéristique pour le phénomène de convection forcée.

Analyse du coefficient de convection ajusté

Nous avons réalisé l'ajustement avec les valeurs expérimentales des disques peints de couleurs différentes, cette exercice n'a pour but que de valider la méthode est n'a pas caractère de valeur juste puisque le résultat est entachés par l'erreur faite sur la connaissance des absorptivités CLO et GLO.

Si l'on considère une ligne tracée selon la direction du vent sur la surface du support, on peut considérer la longueur caractéristique comme la longueur du bord d'attaque au centre de nos disques. La Figure 138 représente le résultat de l'ajustement pour l'ensemble des disques avec le membre de gauche de l'équation 29 en ordonnées et la valeur du flux convectif $h\,\Delta T$ sur l'axe des abscisses. Les données expérimentales ajustées en rouge sont celles où le ΔT est négatif, et positif en cyan. Les carrés verts sont le résultat du modèle ajusté avec la valeur des coefficients affichée sous la forme A x $h_{\text{naturel théorique}}$ + B x $h_{\text{forcé théorique}}$.

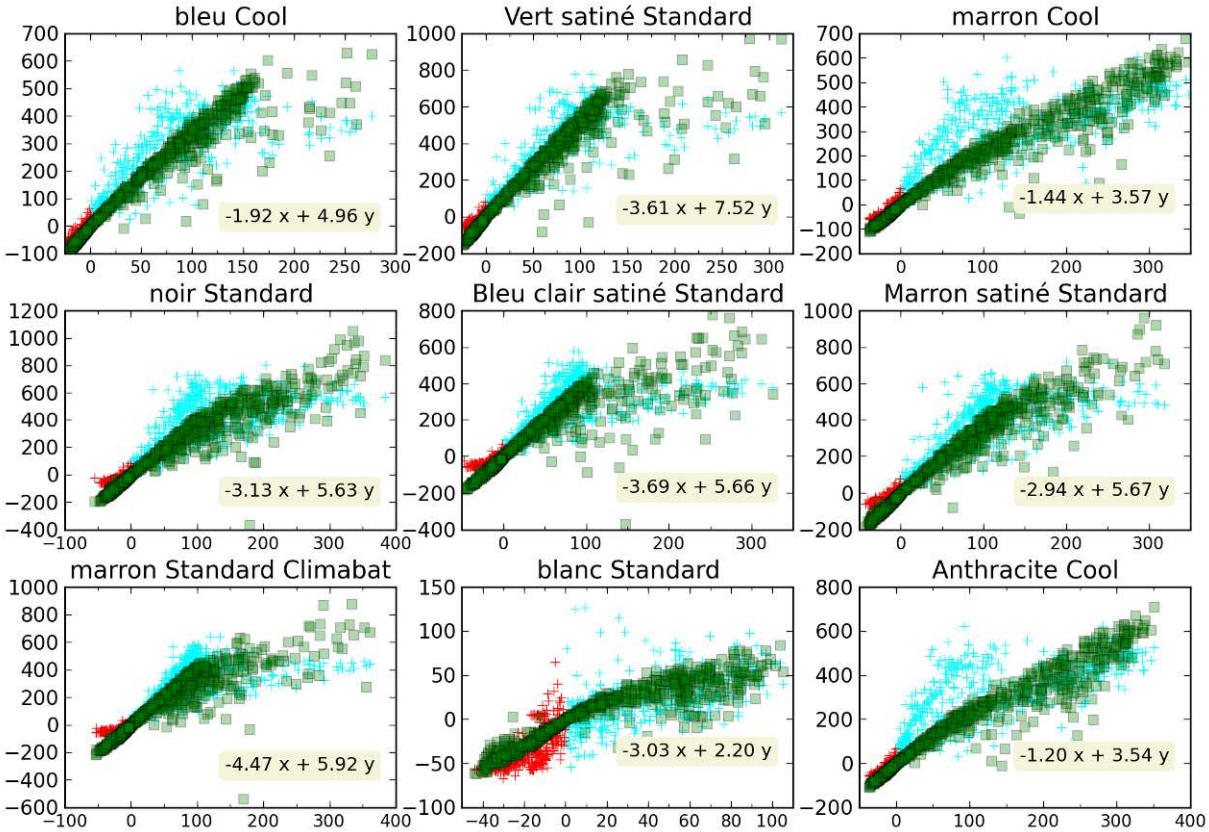


Figure 138 : Ajustement de la fonction avec une longueur caractéristique considérée comme la longueur du bord d'attaque au centre de nos disques et sans coefficient Gr/Re^2

Le premier coefficient, x, relatif à la convection naturelle est négatif, ceci est dû au fait que la convection naturelle est faible devant la convection forcée, ce terme peut probablement être éliminé. En revanche, les autres coefficients, y, devant le terme de convection forcé sont relativement élevés, ce qui pourrait indiquer que l'on utilise pas les bons régimes d'écoulement pour nos équations. Une deuxième possibilité est de prendre le diamètre nominal des disques comme longueur caractéristique.

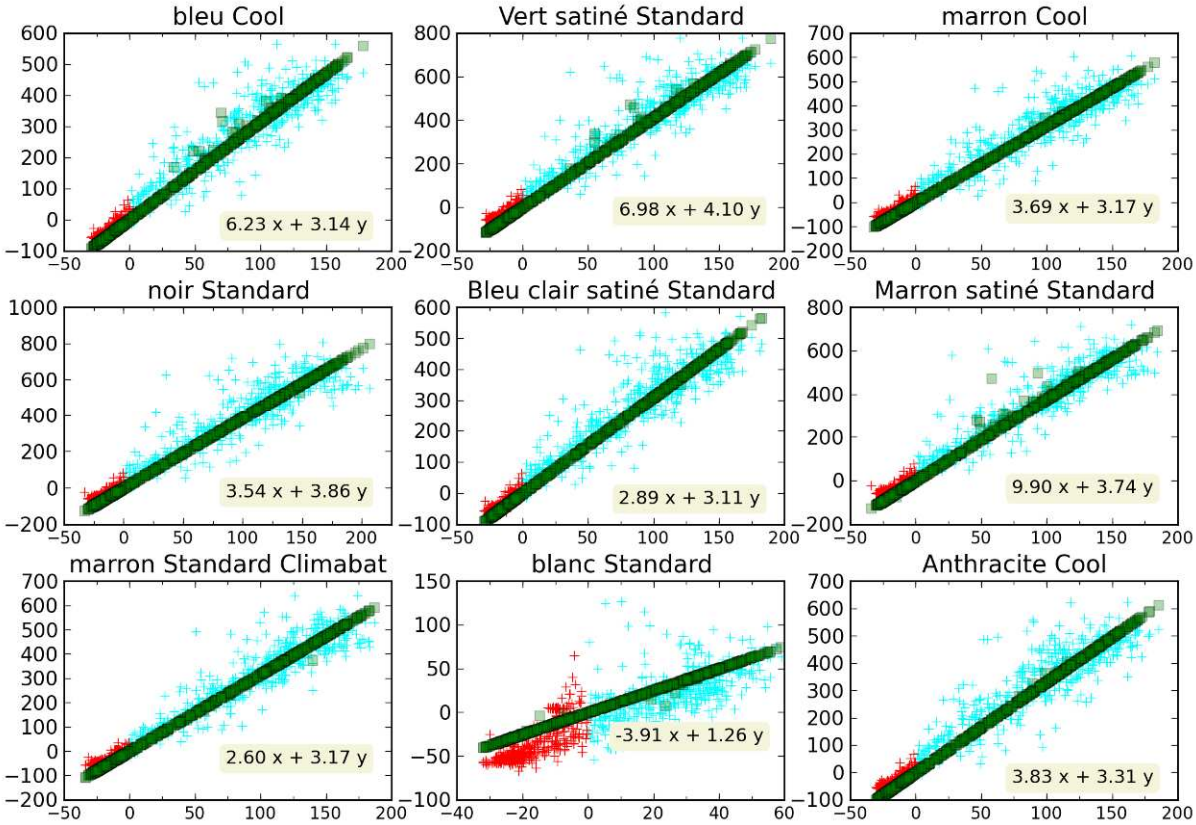


Figure 139: ajustement aux moindres carrés avec le diamètre des disques en longueur caractéristique indépendante de la direction du vent, et avec le coefficient Gr/Re^2

Résumé :

Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense

L'interaction des phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans un tissu urbain avec les apports anthropiques participent à l'îlot de chaleur urbain et à la dégradation de la performance énergétique des bâtiments. L'objectif de cette étude est de définir l'impact de la modification des propriétés radiatives aux façades des bâtiments réalisée par l'utilisation de revêtements sélectifs colorés récemment développés pour les toitures. Les flux sensibles et l'effet sur les bâtiments sont étudiés pour une morphologie caractéristique des milieux urbains denses, la rue canyon.

Un suivi expérimental mené sur des surfaces élémentaires de propriétés radiatives différentes nous a permis de développer par une méthode d'optimisation un procédé de détermination simultané du coefficient de convection et des absorptivités solaires effectives sur la période de mesure. L'utilisation de peintures sélectives dans la configuration canyon retenue est ensuite analysée expérimentalement. Une maquette (1/10ème) de scène urbaine a été conçue sur la base de 5 rangées de cuves de béton creux qui ont fait l'objet de mesures de températures et de flux radiatifs. Le traitement des mesures pour un revêtement uniforme a permis de caractériser les évolutions de champs de températures liés à cette forme urbaine. Par la suite, trois configurations de propriétés radiatives aux façades ont été étudiées simultanément et ont permis d'analyser les modifications spécifiques sur les champs de température de surfaces et d'air. Afin d'estimer les économies d'énergie réalisables sur un bâtiment réel ainsi que l'impact sur son environnement proche, une étude paramétrique des revêtements de façade et de la chaussée a été effectuée par des simulations de l'interaction du bâti et du microclimat. Les méthodes et expériences établies dans cette étude nous permettent d'envisager le développement du traitement des façades et de la caractérisation de leurs performances globales.

Mots clés : caractérisation des propriétés radiative, microclimat urbain, rue canyon, maquettes expérimentale

Summary:

Analysis of façade radiative properties for building energy efficiency in a dense urban environment

Modified heat and mass transfer in the urban built and anthropogenic loads contribute to the urban heat island phenomenon as to the deterioration of building energy efficiency. The scope of this study is to define the impact implied by the modification of facade radiative properties that can be achieved by using selective cool-colored coatings initially developed for roofing. Sensible heat transfers and consequences on building comfort are studied through a characteristic morphology from dense urban environment, the street canyon.

Monitoring of surface energy budget on elementary discs of different radiative properties allowed us to develop, through optimisation method, a process to determine simultaneously the effective solar absorptivities and a convective heat transfer coefficient on the measurement period. The following step consists in an experimental analysis of cool selective paints in the chosen canyon configuration. A reduced-scale model (1/10th) of an urban scene has been designed with 5 rows of hollow concrete tanks that had temperatures and radiative fluxes monitored. Measured data for uniform coatings allowed highlighting the temperature evolution linked to the particular urban form. Afterwards, three facades radiative properties configurations have been studied simultaneously and allowed the analysis of those specific modifications on air and surface temperature fields. Lastly, in order to estimate energy consumption savings on real scale buildings as well as the impact on the near urban environment, a parametric study on coating of facades and roads has been performed through simulation taking into account interactive heat transfers between the built environment and the microclimate. The experiments and methods designed along the study permit to consider façade coating development and global efficiency characterization.

Keywords: Radiative properties, reduce scale model, urban microclimate, selective cool paints, street canyon

Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité : Agro-industrie et Bâtiment (LEPTIAB)
Avenue Michel Crépeau
17042 LA ROCHELLE CEDEX 1