

UNIVERSITE LOUIS PASTEUR STRASBOURG I
Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg

Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection
UMR 7005

THESE

Présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Louis Pasteur Strasbourg I

par

Nicolas RINGENBACH

**BILAN RADIATIF ET FLUX DE CHALEUR
EN CLIMATOLOGIE URBAINE :
MESURES, MODELISATION ET VALIDATION SUR STRASBOURG**

Jury :

Dominique GROLEAU	rapporteur externe
Lütz JAEGER	rapporteur externe
Joseph KLEINPETER	examineur
Jean-Luc MERCIER	rapporteur interne
Georges NAJJAR	examineur
Patrice PAUL	invité
Marc-Philippe STOLL	directeur de thèse

AVANT PROPOS

Que toutes les personnes et organismes qui ont aidé de près ou de loin au déroulement et à l'aboutissement de ce travail trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance. Je tiens à remercier tout particulièrement :

M. M.P. Stoll, Professeur ULP et directeur du TRIO pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et dirigé ce travail avec une remarquable attention. Le temps consacré et la qualité de ses conseils ont énormément contribué à l'aboutissement de ce travail.

M. G. Najjar, Maître de conférence ULP ; pour la co-direction de cette thèse, l'énergie considérable déployée au cours de la campagne de mesures, et l'aide précieuse apportée tout au long de ce travail

F. Nerry (CR1/CNRS) et J. Labed-Nachbrand (Maître de conférence ULP) pour leur gentillesse, leur soutien précieux, et l'aide indispensable apportée pour le traitement des données de télédétection.

J. Colin pour ses conseils en informatique et sa disponibilité.

P. Kastendeuch (Maître de conférence ULP), D. Viville, R. Luhahe, J. Bernard, A. De Hatten, C. Wang qui, au même titre que les personnes précitées, ont participé de manière active à la campagne de mesures.

Les personnes qui ont mis les sites de mesures à notre disposition : M. J.L. Mercier pour la Faculté de Géographie, M. F. Kern pour le PEGE, M. M. Cara pour l'IPG et Mme M.C. Cretton pour l'INSA.

Tous ceux qui nous ont prêté du matériel afin de mener à bien notre campagne de mesures : M. A. Target (ASPA), M. J. Galle, P. Lesobre et M. A. Coppalle (CORIA- Rouen), M. J.C. Lagouarde (INRA Bordeaux), M. J.P. Combe et M. J.M. Rosant (ECN- Nantes).

Aux sociétés Campbell Scientific (M. N. Crescenzo) et Kipp&Zonen (M. J.P. Oliver) pour l'aide et la mise à disposition de matériel.

M. D. Steiger (technicien à l'ASPA) pour l'aide très précieuse apportée lors de la réalisation de la campagne de mesures.

M. D. Groleau (CERMA- Nantes) pour la mise à disposition du modèle SOLENE, la formation dispensée, sa participation et son implication active ainsi que pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

M. P. Grussenmeyer et M. S. Guillemin (INSA) pour l'aide qu'ils ont apporté dans la réalisation du modèle géométrique.

Mme T. Neusch (INSA) pour l'aide apportée dans la classification à partir des images aéroportées.

M. F. Fiedler, Professeur à la retraite de Institut Météorologique de Karlsruhe d'avoir mis à notre disposition un banc de radiosondages et l'intérêt porté à notre campagne de mesures et à l'exploitation des résultats.

Messieurs D. Groleau, L. Jaeger, J. Kleinpeter, J.L. Mercier et P. Paul d'avoir bien voulu accepter de faire partie du jury et de l'intérêt porté à ce travail.

L'ensemble de mes collègues du TRIO, ainsi que tous les doctorants et stagiaires que j'ai croisé tout au long de mon travail pour leur collaboration amicale et l'ambiance sympathique que j'ai trouvé au laboratoire.

Mme O. Opériol pour le soin et les conseils prodigués lors de la reproduction de cette thèse.

Ma famille, mes amis et Maria pour leur soutien tout au long de ce travail de thèse.

Enfin, tous ceux qui ont vu de près ou de loin ce travail et qui n'ont pas été cités ci-dessus.

INTRODUCTION GENERALE	1
1- Etat de l'art	5
1.1 Synthèse bibliographique : de la climatologie à la climatologie urbaine	5
1.1.1 Influence d'une ville sur son environnement.....	5
1.1.2 L'îlot de chaleur urbain.....	6
1.1.2.1 Caractéristiques temporelles et spatiales	6
1.1.2.2 L'atmosphère urbaine	8
1.1.3 Bilan radiatif au-dessus d'une ville.....	10
1.1.3.1 Domaine du visible	11
1.1.3.2 Domaine de l'infrarouge	12
1.1.4 Le bilan d'énergie	13
1.1.4.1 L'énergie anthropique (F).....	13
1.1.4.2 Flux de chaleur dans le sol et les bâtiments (G)	14
1.1.4.3 Flux de chaleur latente (LE)	14
1.1.4.4 Flux de chaleur sensible (H)	14
1.2 Problèmes rencontrés en climatologie urbaine et les voies de recherche	15
1.2.1 Mesures : campagne et base de données.....	15
1.2.2 Modélisation	16
1.3 Modèles : synthèse bibliographique des modèles développés pour la climatologie urbaine.....	16
1.3.1 LUMPS	17
1.3.2 TEB.....	18
1.3.3 SOLENE	19
1.4 Campagnes.....	20
2- Campagne Strasbourg 2002.....	23
2.1 Objectifs spécifiques de la campagne	23
2.2 Les campagnes antérieures sur Strasbourg et la région	24
2.3 Sites de mesures.....	25
2.3.1 Critères et choix des sites.....	25
2.3.2 Description des sites	27
2.3.2.1 Le site « rue de l'Argonne »	27
2.3.2.2 Le site « PEGE »	27
2.3.2.3 Les sites « IPG » et « INSA »	28
2.4 Mesures	28
2.4.1 Les mesures stationnelles.....	28
2.4.2 Les mesures mobiles.....	29
2.4.3 Télédétection : objectifs et moyens.....	31
2.4.3.1 Mesures avion : campagne HYSENS / DAIS.....	31
2.4.3.2 Mesures hélicoptères : moyens utilisés.....	31
2.4.3.3 Mesures sols associées.....	32
2.4.3.4 Caractérisation atmosphérique : radiosondages	33
2.5 Base de données.....	34
2.5.1 Le système de gestion de base de données	34
2.5.2 Le service web sécurisé	35
3- Résultats expérimentaux : présentation et commentaires.....	37
3.1 Mesures micro-météorologiques.....	37
3.1.1 Température de l'air.....	37
3.1.2 Tension de vapeur d'eau	38
3.1.3 Vitesse du vent.....	38
3.2 Flux radiatifs	39

3.2.1 Le rayonnement solaire.....	39
3.2.1.1 Le rayonnement global incident.....	39
3.2.1.2 Le rayonnement réfléchi mesuré horizontalement.....	41
3.2.1.3 Le rayonnement réfléchi mesuré verticalement.....	42
3.2.1.4 Estimations d'albédo.....	44
3.2.2 Le rayonnement infrarouge.....	45
3.2.2.1 Echelle du canyon.....	46
3.2.2.2 Echelle du fragment urbain.....	48
3.2.3 Le rayonnement net.....	49
3.2.4 Les températures de brillance.....	51
3.3 Flux d'énergie.....	52
3.3.1 Rue de l'Argonne.....	52
3.3.2 Flux de chaleur sensible mesurés au PEGE et à l'IPG.....	53
3.4 Paramètres géophysiques : réflectances spectrales, albédo, température, émissivité.....	54
3.4.1 Température de brillance.....	54
3.4.1.1 Température de l'eau.....	54
3.4.1.2 Température de l'asphalte (PEGE).....	55
3.4.1.3 Parvis de la Faculté de Droit.....	56
3.4.2 Réflectances.....	57
3.4.3 Albédo.....	59
3.4.4 Emissivité.....	59
3.4.4.1 PEGE et Rue de l'Argonne.....	59
3.4.4.2 Surfaces identifiables sur les images.....	60
3.4.4.3 Emissivité relative à la bande 8-14µm.....	61
3.5 Télédétection : bilan des acquisitions.....	62
4- Télédétection.....	65
4.1 Objectifs : échelle du quartier avec mesures terrain associées.....	65
4.2 Mesures hélicoptères quartier.....	66
4.2.1 Capture des images.....	66
4.2.2 Passage des comptes numériques aux températures de surface.....	67
4.2.3 « Corrections atmosphériques » sur les mesures sol.....	68
4.2.4 Re-étalonnage de la caméra.....	70
4.2.5 Images : génération de mosaïques et vérification des températures.....	72
4.3 Mesures aéroportées sur l'agglomération.....	73
4.3.1 Prétraitement des images DAIS.....	73
4.3.1.1 Corrections atmosphériques.....	73
4.3.1.2 Re-étalonnage, vérifications.....	74
4.3.2 Paramètres géophysiques (ou thermo-optiques).....	78
4.3.2.1 Domaine réflectif.....	78
4.3.2.2 Domaine infrarouge thermique.....	78
4.3.2.3 Cartes d'albédo et d'émissivité.....	80

5- SOLENE.....	85
5.1 Description du modèle	85
5.1.1 La géométrie	85
5.1.2 Les descripteurs	87
5.1.3 Simulation	87
5.2 Ce qui doit être renseigné, et comment.....	88
5.2.1 Etapes préliminaires.....	88
5.2.1.1 Aspects géométriques et masques	88
5.2.1.2 Les facteurs de forme.....	88
5.2.1.3 Le modèle de ciel	89
5.2.1.4 Détermination du rayonnement solaire incident	89
5.2.2 Paramètres d'entrée et préparation d'une simulation.....	90
5.2.2.1 Constitution de la base des matériaux :	90
5.2.2.2 La fonction transitoire-h-option Ic.....	90
5.3 Le déroulement de la simulation.....	92
5.3.1 Flux solaire net.....	92
5.3.2 Températures équivalentes.....	93
5.3.3 Flux en grande longueur d'onde	93
5.3.4 Température de surface.....	94
5.3.5 Etude de la convergence des températures	96
5.4 Quelles sont les « sorties ».....	97
6- Comparaison modèle/mesures intra-canopée	99
6.1 Domaine du rayonnement global	99
6.1.1 Le rayonnement global incident.....	99
6.1.2 Choix des albédos et rayonnement réfléchi.	100
6.1.2.1 Fond du canyon.....	101
6.1.2.2 Albédo des façades claires.....	102
6.1.2.3 Façade ESE du bâtiment de la faculté de géographie	104
6.1.3 Conclusions sur le domaine du rayonnement global	105
6.2 Domaine du rayonnement infrarouge (LW)	105
6.2.1 Test de sensibilité des données d'entrée	105
6.2.1.1 Le paramètre convectif hc	106
6.2.1.2 Les propriétés thermiques des matériaux	107
6.2.2 Choix des propriétés thermiques des matériaux : cas particulier du fond du canyon.	108
6.2.3 Analyse des mesures radiométriques EVEREST (rue et mur)	112
6.2.3.1 Température de surface de la rue	113
6.2.3.2 Température de surface de la façade	114
6.2.4 Analyse des thermographies des murs.....	115
6.2.5 Analyse du flux infrarouge (LW)	117
6.3 Conclusion sur le domaine du rayonnement infrarouge	118

7- Télédétection, modèle et mesures intégrées	121
7.1 Renseigner SOLENE par télédétection.....	121
7.2 Comparaison des sorties température de surface et rayonnement net avec les valeurs obtenues par télédétection.....	122
7.2.1 Les températures de surface.....	122
7.2.2 Le rayonnement net.....	123
7.3 Grandeurs intégrées spatialement	125
7.3.1 Comparaison mesures mâts/sorties SOLENE	125
7.3.1.1 Rayonnement global réfléchi	125
7.3.1.2 Rayonnement infrarouge émis par la surface	126
7.3.2 Comparaison mesures mâts/images DAIS.....	127
7.3.2.1 Albédo.....	128
7.3.2.2 Température de surface.....	129
7.3.2.3 Le rayonnement net	131
7.4 Retour sur le flux de chaleur sensible.....	132
7.4.1 Site de la rue de l'Argonne	133
7.4.2 Le site du PEGE.....	134
7.4.3 Le site de l'IPG	137
7.5 Variabilité spatiale du rayonnement net à l'échelle de l'agglomération.....	139
CONCLUSION GENERALE.....	143
BIBLIOGRAPHIE	147
Annexe A Rappels : radiométrie et télédétection.....	151
A.1 Radiométrie.....	151
A.1.1 Luminance - Eclairage.....	151
A.1.2 Réflexion du rayonnement.....	152
A.1.3 Emission de rayonnement	152
A.1.4 Relations liées à la conservation de l'énergie	153
A.2 Radiomètres et instruments.....	154
A.2.1 Principe	154
A.2.2 Etalonnage et manipulation des signaux d'un radiomètre à bande large.....	155
A.3 Mesures par télédétection	156
A.3.1 Rôle de l'atmosphère	156
A.3.2 Corrections atmosphériques.....	157
A.3.3 Problématique de la mesure dans l'infrarouge.....	158
Annexe B Profils verticaux de l'atmosphère	161
Annexe C Estimation de l'effet de miroitement	165

INTRODUCTION GENERALE

Contexte général

Une masse d'air lors de son déplacement peut voir ses propriétés physiques, considérées comme homogènes, être influencées par les surfaces au dessus desquelles elle se déplace. La présence d'une ville va influencer les caractéristiques de la masse d'air en introduisant une rugosité aérodynamique de la surface du fait de la géométrie et la densité du bâti, mais aussi en imperméabilisant des surfaces, en réduisant la végétation, et en modifiant l'occupation du sol par rapport à ses alentours.

Ces modifications de l'environnement climatique sont à l'origine de nombreuses études depuis une trentaine d'années, notamment dans les grandes villes d'Amérique du Nord. Il faut savoir qu'aujourd'hui 45% de la population mondiale vit dans des villes, avec une fraction bien plus élevée dans les pays développés (75%), et que ces chiffres ne cessent d'augmenter (Arnfield, 2002). Il est donc légitime de s'intéresser au cadre de vie de cette population, et plus particulièrement vis à vis des problèmes de pollution, qui ont préoccupé les responsables politiques ces dernières années, en raison de leurs conséquences socio-économiques.

Comment une zone urbaine étendue dense affecte-t-elle la circulation atmosphérique dans la basse troposphère ? quels sont les facteurs qui conduisent à la formation de ce qu'il est convenu d'appeler l'îlot de chaleur urbain qui est la marque de la spécificité des échanges d'énergie entre la surface urbaine et la couche limite ? de quelle façon doit-on paramétrer les surfaces urbaines dans les modèles de circulation à l'échelle régionale ? sont des questions auxquelles il n'est pas possible actuellement de donner des réponses claires. Dans la dernière décennie, les alertes répétées aux pics de pollution par l'ozone et autres polluants ont attiré l'attention des pouvoirs publics et des responsables politiques sur l'importance d'une connaissance approfondie du climat urbain et de ses conséquences sur la qualité de l'air. Les questions évoquées ci-dessus sont donc des questions d'actualité dont l'intérêt tient à l'importance socio-économique des manifestations de la pollution de l'air, dont la prévision et la prévention passe par une meilleure connaissance des mécanismes qui la relie à l'îlot de chaleur, et à la nécessité d'améliorer les performances des modèles de prévision météorologique à l'échelle régionale.

Problématique de recherche

Ces questions sont aussi d'authentiques questions de recherche puisqu'il s'agit *in fine* d'aboutir à un schéma de paramétrisation de surface permettant de coupler de façon efficace une aire urbaine à un modèle atmosphérique, en l'occurrence un modèle non-hydrostatique bien adapté aux échelles en jeu. Avec la complexité du milieu urbain et l'impossibilité de multiplier les sites d'observation, la recherche en climatologie urbaine procède de la combinaison de mesures de terrains sur des sites ponctuels ou d'extension limitée, et du développement de modèles, dans une première phase validés par les mesures, utilisés ensuite conjointement avec la télédétection pour réaliser le changement d'échelle vers le couplage de l'agglomération et de son environnement régional.

Ce couplage est assuré par les échanges d'énergie entre la surface et la basse atmosphère en contact, échanges d'énergie sous forme de flux radiatifs, de flux convectifs et de flux de chaleur liés au changement de phase de l'eau. Les techniques modernes permettent actuellement des mesures des différents flux à l'échelle ponctuelle, mais leur représentativité spatiale dans une agglomération urbaine est à priori limitée et certainement mal connue.

Un élément clé du problème est le bilan radiatif dont la détermination précise conditionne l'accès aux autres termes du bilan d'énergie dont certains, comme le flux de chaleur dans le sol ne sont pas mesurables directement. Ces bilans dépendent étroitement des propriétés de l'atmosphère et des caractéristiques de la surface étudiée notamment l'albédo, la réflectance et l'émissivité. Or dans les

zones urbaines, l'atmosphère est le plus souvent polluée et les caractéristiques de la surface sont fortement liées à la nature des matériaux et la géométrie et présentent de ce fait une forte variabilité spatiale. Le bilan radiatif est aussi la porte d'entrée de la télédétection par le biais notamment de la détermination de l'albédo et de la température de surface.

Ce travail de thèse a donc été focalisé en priorité sur le bilan radiatif, sa mesure et sa modélisation à différentes échelles. Il se propose de contribuer à l'approfondissement des connaissances des mécanismes d'échange d'énergie entre la canopée urbaine et la couche limite urbaine en suivant une démarche de mesures et modélisation couplée à une utilisation de la télédétection pour la nécessaire validation. Il s'oriente autour d'une campagne de mesures des différents flux effectuée en juillet et août 2002 sur le site de la ville de Strasbourg à l'échelle d'un canyon urbain puis celle du « quartier ». Cette dernière, qui peut être considérée comme une agrégation de plusieurs canyons juxtaposés, permet d'appréhender l'hétérogénéité spatiale à une échelle intermédiaire entre celle du canyon et de l'agglomération entière. Ainsi, à une échelle que l'on peut qualifier de locale, c'est à dire à l'intérieur d'une rue, les différents termes du bilan radiatif, les flux de chaleur sensible et les paramètres climatologiques standards (température de l'air, humidité, vitesse du vent...) sont mesurés à plusieurs niveaux de hauteur. Des capteurs placés au sommet de mâts dont la hauteur est supérieure à celle du niveau des toits mesurent les mêmes paramètres, mais intègrent une plus grande surface : ces mesures sont représentatives de l'échelle du quartier. Ces paramètres sont enregistrés en continu pendant six semaines.

Lors de journées bénéficiant de conditions atmosphériques très favorables, ces mesures continues sont complétées par des acquisitions aéroportées. Les moyens de télédétection mis en oeuvre comportent des séquences de couverture de l'agglomération à une résolution spatiale de quelques mètres et sur l'ensemble du domaine optique par un système imageur aéroporté, des cartographies par caméra thermique hélicoptère de la température de surface sur les sites tests à une résolution sub-métrique, mais aussi des mesures terrain de validation et de caractérisation de l'atmosphère. La télédétection est la seule technique permettant en ce qui concerne les paramètres géophysiques de surface, d'assurer le changement d'échelle, de l'échelle locale jusqu'à celle englobant l'ensemble de l'agglomération dans son contexte régional ; c'est aussi, du fait d'une approche image, la seule méthode d'investigation d'un système hétérogène comme le milieu urbain. La télédétection est un outil nécessaire, car elle permet de valider les sorties des modèles utilisés, soit pour l'évaluation des paramètres de surface relatif à la canopée urbaine, soit pour calculer les flux, et donc la pertinence des paramétrisations et le poids relatif des différentes variables.

La modélisation des flux s'appuie, dans le cadre de cette thèse, sur le modèle SOLENE, élaboré par le CERMA (Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture) de Nantes, appliqué au modèle 3D de la géométrie urbaine. SOLENE permet notamment de simuler pour tous les points de la géométrie reproduite les différents flux du bilan radiatif et la température de surface. Il est particulièrement bien adapté à l'espace urbain et la validation de ses sorties sera effectuée à partir des mesures locales et par télédétection. Afin d'y parvenir, nous proposons de mettre en regard les mesures des paramètres et grandeurs effectuées sur nos différents sites de mesures et les sorties du modèle. Il s'agit d'examiner si le modèle est capable de restituer exactement les grandeurs mesurées, et en particulier leurs variations temporelles.

Objectifs spécifiques du travail et plan du mémoire

Le travail a été organisé autour des objectifs suivants : documenter de façon aussi complète que possible le site d'étude, réaliser une base de données des paramètres et grandeurs physiques grâce à une campagne de mesures terrain couplée à des acquisitions de télédétection, analyser et interpréter ces mesures dans le cadre d'un modèle physique du bilan radiatif et du bilan d'énergie.

Le mémoire est divisé trois grandes parties :

- la première partie consacrée à une synthèse bibliographique et à la préparation de la campagne de mesures et sa mise en oeuvre. Après avoir traité les modifications liées à une ville sur son

environnement climatique, ainsi que des problèmes rencontrés en climatologie urbaine et des voies de recherche proposées, nous allons procéder à une présentation de la campagne de mesures. Celle-ci se déroule du 7 juillet au 20 août 2002, période pendant laquelle des paramètres et grandeurs physiques sont mesurés en continu. Parallèlement, des mesures de télédétection à différentes échelles sont réalisées lors de conditions météorologiques favorables.

- la deuxième partie expose les résultats obtenus ; d'une part sur les différents sites fixes, en l'occurrence les paramètres micro-météorologiques, les termes des bilans radiatif et d'énergie ; d'autre part les acquisitions obtenues par télédétection ainsi que les mesures de contrôle réalisées au sol. Dans le premier cas, nous souhaitons illustrer le comportement journalier des paramètres mesurés et les variations d'un site à l'autre. Dans le second cas, nous revenons sur les traitements effectués sur les images, en particulier les ré-étalonnages à partir des mesures de contrôle réalisées au sol ainsi que les algorithmes utilisés pour obtenir les grandeurs recherchées telles l'albédo ou la température de surface.

- la troisième partie présente le modèle SOLENE, dans lequel on introduit la géométrie urbaine restituée pour des secteurs correspondant à nos sites de mesure. On peut alors procéder à la comparaison entre les mesures réalisées pendant la campagne, dans un premier temps à l'intérieur de la canopée, puis à l'échelle du quartier. Cette partie se consacre justement au passage de l'échelle locale à l'échelle d'un secteur urbain et aborde rapidement l'échelle de l'agglomération entière. Ce changement d'échelle se fait par le biais de la télédétection, dont nous confrontons les résultats avec ceux obtenus par la modélisation et par les mesures intégrées.

Un bilan de l'ensemble du travail, les objectifs réalisés, les problèmes rencontrés, et les perspectives ouvertes sont évoqués dans la conclusion générale.

1- Etat de l'art

Depuis une trentaine d'année, des nombreux travaux de recherche en climatologie urbaine se sont succédés, selon deux types d'approches, largement complémentaires :

- les méthodes descriptives, qui consistent en une acquisition de paramètres climatologiques standard (température de l'air, humidité, vitesse du vent...), et qui les traitent de manière essentiellement statistique.
- les méthodes physiques, qui s'appuient sur la modélisation pour interpréter les paramètres et comportements climatiques tels qu'ils résultent des mesures et observations.

La finalité de ces recherches est de comprendre les mécanismes d'interaction entre une zone urbaine et la circulation dans les basses couches de l'atmosphère, afin de pouvoir améliorer les prévisions de modèles météorologiques à échelle locale et régionale, et ainsi de mieux appréhender les problèmes de pollution et de transport de polluants.

1.1 Synthèse bibliographique : de la climatologie à la climatologie urbaine

1.1.1 Influence d'une ville sur son environnement

L'agglomération urbaine se caractérise et se différencie des zones non et faiblement bâties, par :

- la production d'énergie anthropique, quantité d'énergie due au chauffage des habitations, à la circulation automobile, et aux industries. Cette grandeur est étroitement liée à la taille et la densité de la ville, sa fonction et son industrialisation, ainsi qu'à la zone climatique et aux besoins en chauffage.
- la réduction de la vitesse du vent dans les basses couches, en général en raison d'une augmentation de la rugosité de surface causée par les constructions. Ainsi, par exemple, à Londres, qui dispose d'un réseau de stations assez dense en comparaison avec celui des autres villes, sur une période allant de 1961 à 1970, la vitesse moyenne du vent est souvent de 20 à 30% plus faible qu'en dehors de la ville (Lee, 1984). Néanmoins, lors de conditions anticycloniques très stables, la vitesse du vent peut localement être plus élevée en ville qu'à la périphérie. Ceci peut s'observer lorsque le vent pénètre dans des rues parallèles au flux de circulation atmosphérique, qui vont donc le canaliser et l'accélérer par effet Venturi. Selon Oke (1978), un gradient de température entre la couche urbaine et la couche rurale suffisamment fort pourrait donner naissance à des brises soufflant de la campagne et convergeant vers le centre ville, de la même manière que sont générées les brises de mer.
- la nette diminution de l'évapotranspiration, due à la réduction de la végétation, ainsi qu'à l'imperméabilisation de la majorité des surfaces. Un bassin urbain répond donc plus vite aux précipitations, et les sorties d'eau par ruissellement y sont plus importantes : le stockage d'eau est moins important qu'à la campagne. Le réseau d'évacuation des eaux usées en soustrait un volume considérable.
- Un important stockage de chaleur en journée en raison des propriétés thermiques des matériaux des constructions. De plus, la verticalité des façades des immeubles augmente les surfaces d'échange de rayonnement par rapport à ce que l'on peut trouver en campagne. Les matériaux vont stocker cette énergie en journée puis la restituer la nuit.

L'importance de ces différents processus est fonction de la saison, des caractéristiques de la surface urbaine et des conditions météorologiques. Ainsi, à titre d'exemple, on comprendra aisément que la production d'énergie due au chauffage des habitations prédomine en hiver, et que l'évapotranspiration est plus élevée après un épisode pluvieux.

Tous ces facteurs sont responsables de caractéristiques spécifiques sur l'environnement climatique de la ville, dont la manifestation la plus visible est l'îlot de chaleur urbain.

1.1.2 L'îlot de chaleur urbain

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène essentiellement nocturne qui fait que la température de l'air observée dans une zone bâtie est significativement plus élevée que celle observée dans les zones rurales environnantes. Les conditions idéales à la formation d'un îlot de chaleur urbain bien caractérisé sont des conditions anticycloniques stables, un ciel parfaitement dégagé et des vents très faibles. Les différences de température entre la ville et les espaces ruraux l'entourant peuvent alors être considérables, dépassant les 10 degrés pour les grandes agglomérations. Pour la ville de Strasbourg, on enregistrait par exemple une différence de 8°C quelques heures après le coucher de soleil pour la journée du 11 août 1998 (De Hatten, 2002).

1.1.2.1 Caractéristiques temporelles et spatiales

La forme et la taille de l'îlot de chaleur urbain varient dans l'espace et dans le temps, en fonction des conditions météorologiques, et des caractéristiques propres à la ville.

L'îlot de chaleur urbain est le plus marqué dans les parties les plus densément bâties, qui correspondent en général au centre ville (figure 1.1). Le gradient de température le plus fort s'observe généralement à la périphérie de la ville, alors qu'à l'intérieur, les gradients sont plus faibles, d'où l'allusion à un îlot dans la terminologie utilisée pour décrire ce phénomène. Notons que la présence de parcs urbains coïncide avec des chutes de température, jouant ainsi un rôle d'îlot de fraîcheur. C'est par exemple le cas du Jardin Botanique à Strasbourg (Fischer, 2001).

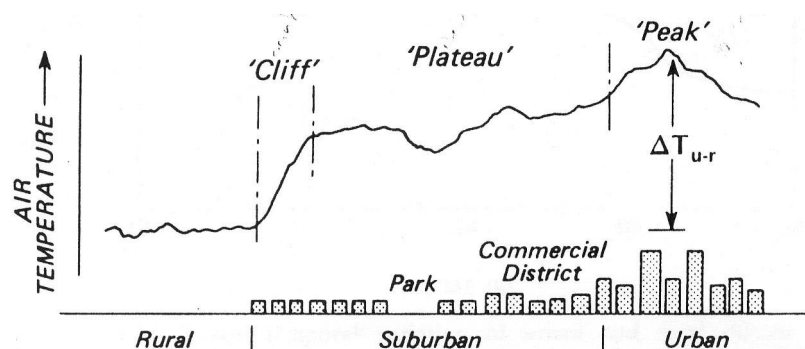


Figure 1.1 Coupe d'un îlot de chaleur urbain (d'après Oke, 1978)

La nuit, au moment où l'effet de chaleur urbain apparaît le mieux, la différence de température entre ville et campagne apparaît inversement proportionnelle à la vitesse du vent et à la couverture nuageuse (Oke, 1978).

Par ailleurs, l'extension spatiale de l'îlot de chaleur urbain est assez bien corrélée avec la direction et la vitesse du vent (Fischer, 2001).

Phénomène essentiellement nocturne, l'îlot de chaleur urbain devient plus marqué après le coucher de soleil, et atteint son maximum 3 à 5 heures après celui-ci. La cause en est un refroidissement bien plus prononcé et rapide de la campagne après le coucher de soleil qui perd très vite, sous forme de rayonnement infrarouge, son énergie stockée. En revanche, après le lever du jour, la campagne a tendance à se réchauffer plus rapidement, et de ce fait, l'îlot de chaleur urbain est moins prononcé en milieu de journée, et la ville peut même être plus fraîche que la campagne.

L'occupation du sol en zone péri-urbaine, essentiellement l'opposition sols nus/surfaces végétalisées, joue également un rôle dans l'intensité de l'îlot de chaleur. En effet, l'écart mesuré entre ville et campagne environnante est plus fort lorsque la couverture végétale est faible en campagne (exemple des sols nus), en raison de la moindre évapotranspiration des sols nus par rapport aux surfaces couvertes de végétation, et par conséquent d'une plus forte amplitude thermique des sols nus.

Ce qui est observé dans une ville ne sera pas forcément observé dans une autre ville, même en présence de conditions météorologiques similaires. Ainsi, pour des villes avec un même nombre d'habitants, l'effet de chaleur urbain semble plus marqué pour une ville américaine que pour une ville européenne typique (figure 1.2). Une explication tient vraisemblablement à une géométrie urbaine des villes différentes entre ces deux continents (Oke, 1978), même si d'autres facteurs sont susceptibles d'intervenir.

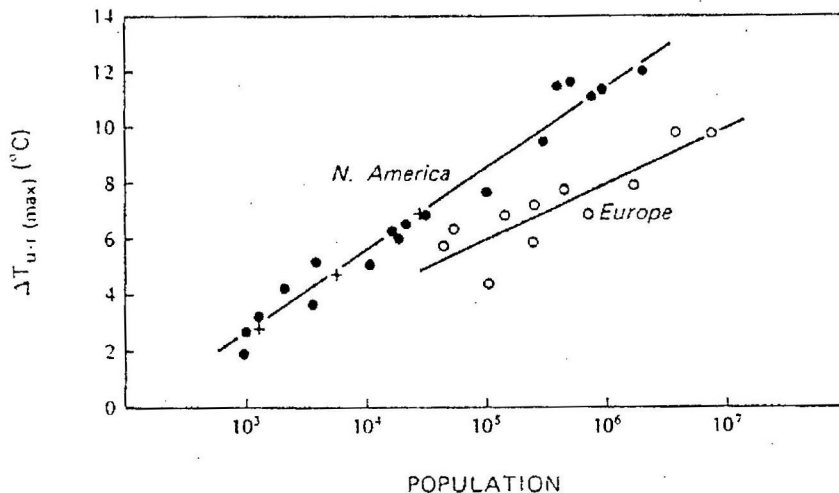


Figure 1.2 Intensité de l'îlot de chaleur urbain en fonction du nombre d'habitants pour des villes européennes et Nord-américaines (Oke, 1978)

Comme il a déjà été dit, l'intensité de l'îlot de chaleur urbain est liée à la taille de la ville. Lorsque le vent est très faible et le ciel bien dégagé, il est montré que l'îlot de chaleur urbain maximal est en relation avec le logarithme (ou une fonction puissance) de la population de la ville (Oke, 1973). Cela signifie que même dans les petites villes, on retrouve une légère augmentation de la température par rapport à la campagne environnante. Le vent peut également être intégré dans l'équation:

$$\Delta T_{u-r} = \frac{P^{\frac{1}{4}}}{4\bar{u}^{\frac{1}{2}}}$$

avec P désignant la population et \bar{u} la vitesse du vent (en m/s) en dehors de la ville mesurée à une hauteur de 10 mètres. Cette équation, élaborée pour les villes nord-américaines et adaptée ici aux villes

européennes, permet de déterminer la vitesse du vent nécessaire à détruire l'îlot de chaleur urbain pour une ville d'une population connue.

Ce type d'équations empiriques est applicable et donne de bons résultats, mais uniquement dans des situations qui s'apparentent aux conditions dans lesquelles elles ont été établies (conditions anticycloniques stables, peu de nuages et de vent, caractéristiques urbaines comparables...). Ces équations n'ont pas de validité générale.

Des modèles advectionnels théoriques prennent en compte et s'adaptent à davantage de conditions météorologiques. C'est le cas du modèle de Summers (1964), qui imagine une masse d'air rurale stable réalisant une advection dans une atmosphère urbaine chaude, qui est alors progressivement modifiée dans les basses couches, et dont la turbulence augmente à cause de la rugosité urbaine.

1.1.2.2 L'atmosphère urbaine

L'îlot de chaleur urbain présente également une extension verticale. Pendant le jour, il peut s'étendre de 600 à 1500 mètres au-dessus de la ville, en raison de l'importance de la convection. La nuit en revanche, l'épaisseur de cette couche dépasse rarement 300 mètres en raison d'une stabilité plus importante.

Cependant, l'atmosphère au-dessus de la ville est loin d'être homogène, et dans la couche limite générée par la ville, on distingue deux parties (figure 1.3) :

- la première strate est la canopée urbaine, couche dans laquelle se déploie l'activité humaine. Elle englobe un volume contenant les bâtiments, l'air contenu entre les immeubles, ainsi que le sol jusqu'à une certaine profondeur. Sa limite supérieure correspond à peu près à la hauteur des toits. Son climat est déterminé par la nature de son environnement, notamment la géométrie urbaine et les matériaux. C'est dans cette couche que de nombreux processus physiques, à l'origine de flux de chaleur sensible ou latente, prennent naissance.
- La deuxième strate située juste au-dessus est appelée couche limite urbaine (CLU). C'est cette partie inférieure de l'atmosphère qui se rattache à la couche limite planétaire, dont les caractéristiques, notamment dans sa partie inférieure, sont particulièrement affectées par la présence de la ville. Cette couche peut avoir une épaisseur de plusieurs centaines de mètres, et en conditions d'îlot de chaleur reste plus chaude que l'air situé au-dessus de la campagne. Sa hauteur dépend des paramètres de surface, de l'extension de la ville et des conditions atmosphériques. Quand cette couche est poussée par le vent à l'extérieur de la ville, elle donne naissance à ce qui est appelé le panache urbain. Elle est alors séparée de la surface par une couche influencée par les caractéristiques de la campagne. En revanche, lorsque le vent est faible, une bulle d'air chaud se forme, entretenue par des cellules convectives d'air chaud ; il s'agit du dôme urbain.

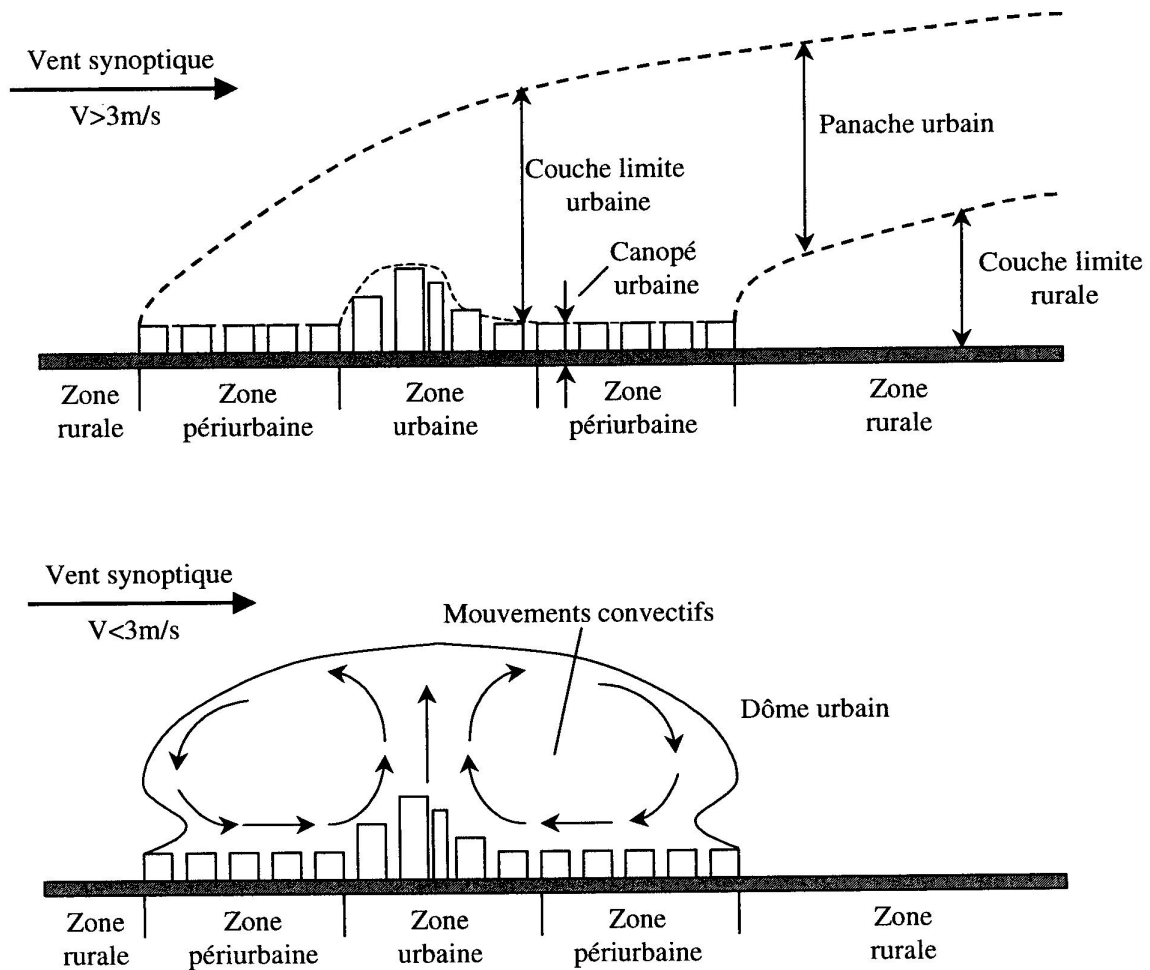


Figure 1.3 Structure verticale de l'atmosphère urbaine pour des vents supérieurs et inférieurs à 3m/s (d'après Mestayer, Anquetin, 1995)

Les méthodes d'observation des différents paramètres varient selon qu'il s'agisse de la canopée urbaine ou de la couche limite urbaine, et les échelles d'investigation ne sont pas les mêmes :

- dans la canopée, l'élément de base est le « canyon urbain », limité par la rue, ainsi que par les bâtiments qui la bordent, représentés sous forme de parallélépipèdes (figure 1.4). Sa géométrie est décrite par le rapport H/W entre la hauteur des bâtiments (H) et la largeur du fond du canyon (W).
- dans la couche limite urbaine, l'échelle de travail est le quartier ou fragment urbain, qui est une juxtaposition de plusieurs canyons de géométrie et d'orientation différentes, présentant néanmoins une certaine homogénéité.

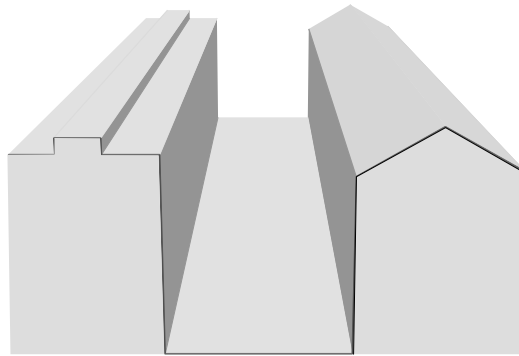


Figure 1.4 Schéma d'un canyon urbain

1.1.3 Bilan radiatif au-dessus d'une ville

Le bilan radiatif ou rayonnement net représente la réponse physique radiative de la surface à la réception d'énergie solaire et à l'équilibre thermodynamique (figure 1.5) qui s'établit compte tenu des sources internes d'énergie et des échanges avec l'atmosphère. La surface d'échange considérée est une surface fictive qui se trouve au niveau de la hauteur moyenne des bâtiments pour la ville. Il s'écrit :

$$Rn = (1 - a)R_G + R_A - R_T$$

avec :

Rn : rayonnement net, qui correspond à l'énergie radiative absorbée par la surface

R_G : rayonnement global correspondant à la somme des rayonnements direct et diffus incident en courte longueur d'onde (rayonnement visible et proche infrarouge)

a : albédo, qui caractérise la part du rayonnement solaire réfléchi par une surface

R_A : rayonnement atmosphérique propre qui s'effectue dans les grandes longueurs d'onde (infrarouge)

R_T : rayonnement terrestre, qui correspond à l'émission par la surface, en grande longueur d'onde (domaine infrarouge)

Les différents termes du bilan radiatif sont potentiellement affectés par la présence d'une ville. Précisons que lorsque nous parlons de bilan au cours de ce travail, nous considérons le bilan à un niveau correspondant à une surface fictive passant par le capteur.

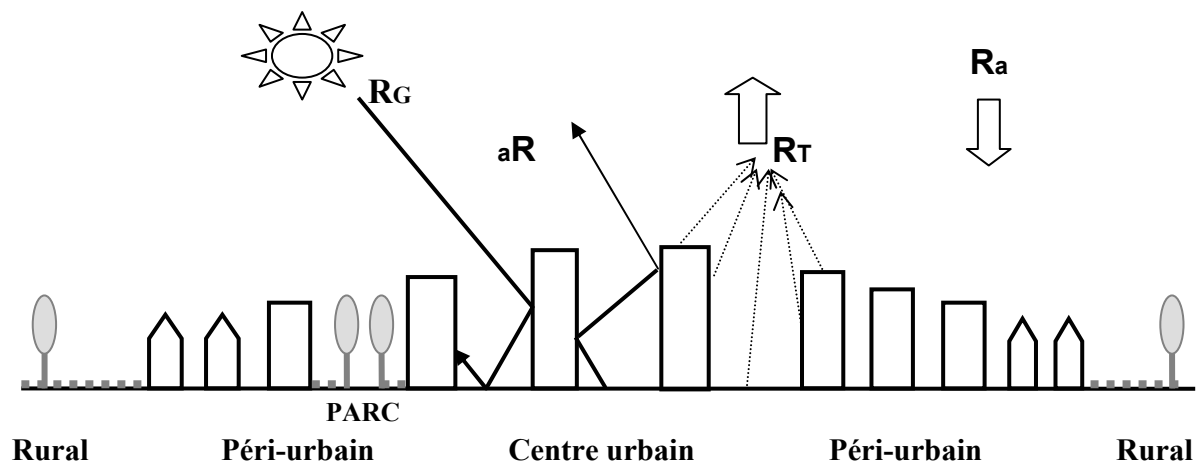


Figure 1.5 Bilan radiatif au dessus d'une ville

1.1.3.1 Domaine du visible

Au-dessus d'une ville, on observe que le rayonnement solaire global incident est en général plus faible de 3 à 10% par rapport aux espaces ruraux environnants. Ainsi à Strasbourg, la diminution atteint 8% pour les journées ensoleillées (Fischer, 2001). Cela s'explique par une plus grande concentration de polluants dans l'atmosphère urbaine. Les particules et aérosols absorbent une partie du rayonnement solaire, ou le diffusent dans toutes les directions. Cette atténuation du rayonnement est fonction de la saison, de l'heure (hauteur du soleil) et de la concentration des polluants (mesurée par le trouble atmosphérique). Elle peut dépasser 30% dans certains cas extrêmes, comme à Hong Kong où Stanhill et Kalma (1995) ont mesuré une diminution de 33% du rayonnement solaire incident par rapport à la campagne sur une période de 35 ans. Cette diminution concerne la composante directe du rayonnement solaire incident, tandis que le rayonnement diffus va augmenter, en raison de nombreuses interactions avec les particules de l'atmosphère.

La part du rayonnement global réfléchi par la canopée urbaine est donnée par l'albédo qui dépend de manière complexe des éléments constitutifs et de la géométrie des surfaces urbaines. L'albédo d'un élément dépend notamment du matériau (couleur et état de surface). Les éléments des surfaces urbaines présentent des albédos très variés, mais qui sont d'une manière générale plus faibles que les éléments de surfaces naturelles couvertes de végétation. Une partie de l'explication réside dans la forte réflectance de la végétation dans le proche infrarouge qui entraîne un albédo élevé. Cette différence est estimée entre 0,03 (Dabbert et Davis, 1978) et 0,15 (Oke, 1978).

Mais la partie ré-émise est également affectée par la morphologie urbaine. En effet, les rues peuvent être assimilées à des canyons, entourés de blocs (les immeubles), formant alors un piège au rayonnement. Ainsi, à l'entrée comme à la sortie de la rue, le rayonnement est affecté par de multiples réflexions sur les facettes que constituent par exemple les parois des immeubles (figure 1.6). Cet effet de piège est maximum avec un bâti haut et dense. Ce phénomène, qui contribue donc à faire diminuer l'albédo de la canopée urbaine en comparaison avec l'albédo d'une surface horizontale, a aussi pour conséquence qu'à plus grande échelle, l'albédo urbain varie peu d'une situation à l'autre et se situe en général autour de 0,11.

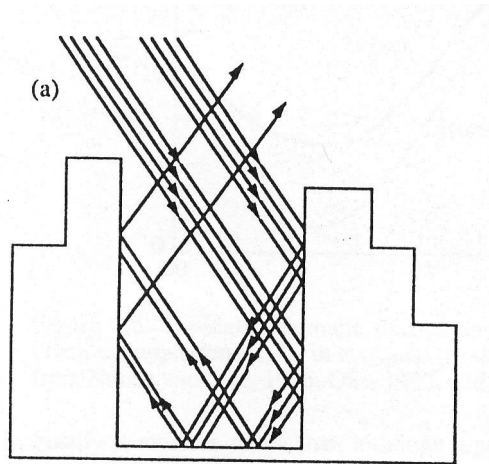


Figure 1.6 Illustration de l'effet de piège (d'après Estournel, 1982)

1.1.3.2 Domaine de l'infrarouge

Nous avons vu qu'en milieu urbain les surfaces ont tendance à avoir des températures plus élevées que les surfaces naturelles, ce qui a pour conséquence qu'elles émettent plus dans le domaine des grandes longueurs d'ondes, bien que l'émissivité des matériaux urbains soit en règle générale plus faible que celle des surfaces rurales. En effet, l'énergie rayonnée, qui pour l'essentiel est émise dans le domaine infrarouge d'après la loi de Wien (cf Annexe A), est proportionnelle à la puissance 4 de sa température absolue, comme le montre la loi de Stefan-Boltzmann :

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

avec :

E : l'énergie émise par unité de surface,

ε : l'émissivité,

σ : la constante de Stefan-Boltzmann,

T : la température en degrés Kelvin.

Le rayonnement infrarouge émis par la surface en grandes longueurs d'ondes est donc plus élevé au dessus d'une ville. C'est aussi le cas la nuit, puisque les surfaces naturelles se refroidissent plus vite que les surfaces urbaines. Par ailleurs, en ville, le refroidissement nocturne est moins marqué dans la rue qu'au niveau des toits, en raison du rôle de piège joué par les bâtiments dressés de part et d'autre de la rue, qui diminuent le pourcentage de ciel visible (Nunez, Oke, 1976).

Le rayonnement en provenance de l'atmosphère est lui aussi plus important, en raison de la couche de polluants. A Brandon dans le Manitoba, Suckling (1981) constate un rayonnement atmosphérique plus fort de 10% avec des pointes à 20% par rapport aux milieux ruraux environnant. Il est fonction de la vitesse du vent, puisque plus le vent est fort, plus il réduit la couche de polluants, diminuant ainsi le rayonnement incident. Des mesures effectuées par Oke et Fuggle (1975) montrent par ailleurs une très bonne corrélation entre la vitesse du vent et les valeurs du rayonnement atmosphérique.

La comparaison des différents termes du bilan radiatif en courtes longueurs d'ondes d'un milieu urbain avec ceux d'un milieu rural montre que la diminution du rayonnement solaire global est

compensée par un albédo plus faible. Selon Oke (1978), il semble que le bilan solaire soit légèrement plus faible dans les villes.

Le bilan infrarouge est également un peu plus déficitaire en ville car l'augmentation du rayonnement atmosphérique au dessus d'une agglomération n'est pas suffisante pour compenser l'augmentation du rayonnement émis la nuit par une surface urbaine, qui reste plus chaude que les surfaces rurales environnantes.

En fait, bien que les termes du bilan radiatif soient tous affectés par le passage d'une zone rurale à une zone urbaine, une certaine compensation se produit entre les différents termes, et dans certaines conditions, le rayonnement net peut ne pas être trop affecté par ce changement de milieu (Mestayer, 1995). Cependant, des différences importantes peuvent subsister dans des cas particuliers, comme cela a été constaté à Los Angeles (Grimmond et al, 1996) avec un rayonnement net supérieur de 19% à celui mesuré à l'extérieur de la ville.

1.1.4 Le bilan d'énergie

Le bilan d'énergie (figure 1.7) regroupe les différents flux de chaleur qui se manifestent dans une zone urbaine. Il dépend des caractéristiques propres à la surface ainsi que des gradients de température et d'humidité entre la surface et l'atmosphère. Il est défini par la relation suivante pour une surface urbaine :

$$R_n + F = H + LE + G$$

Avec :

- R_n : rayonnement net,
- F : énergie anthropique,
- H : flux de chaleur sensible,
- LE : flux de chaleur latente,
- G : flux de chaleur dans le sol et les bâtiments.

Nous allons définir ces grandeurs, et voir dans quelle mesure une aire urbaine peut les affecter.

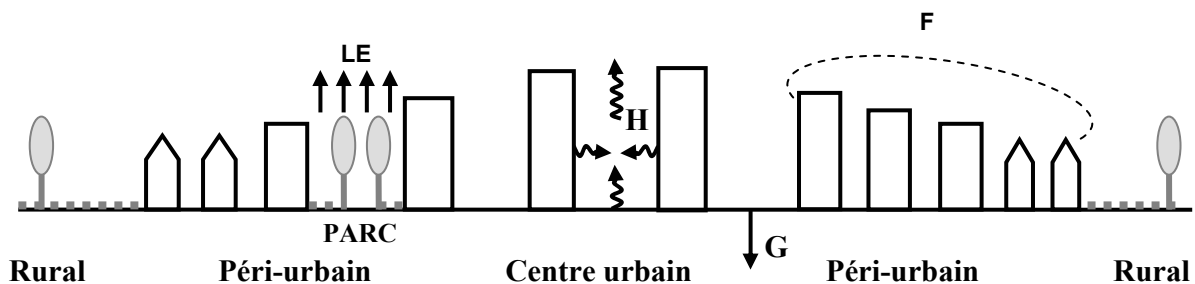


Figure 1.7 Bilan d'énergie au-dessus d'une ville

1.1.4.1 L'énergie anthropique (F)

L'énergie anthropique est propre à la ville. Elle dépend de la densité du bâti et la population de la ville, de l'énergie utilisée, ainsi que du potentiel économique et industriel de la ville. Cette énergie provient essentiellement du chauffage, mais également de la circulation urbaine et de la production industrielle. En été, elle est essentiellement due à la circulation automobile, comme en témoignent les résultats de mesures faites à Vancouver (Schmid et al, 1990), où les principales artères de circulation sont particulièrement mises en évidence sur la cartographie de l'énergie anthropique. Dans certaines villes,

l'énergie anthropique est une source d'énergie très importante, dont la part peut même parfois dépasser le rayonnement net (exemple des villes américaines et d'Europe du Nord en hiver).

En fonction de l'utilisation des habitations, du climat et de la saison, son impact peut être considéré comme négligeable. C'est le cas de notre région pendant la saison estivale. En raison de la difficulté de mesurer cette composante, les campagnes de mesures du bilan d'énergie sont plus aisées en été, puisqu'il n'est pas nécessaire d'en tenir compte : on peut donc la négliger dans une première approche.

1.1.4.2 Flux de chaleur dans le sol et les bâtiments (G)

Il s'agit de la quantité d'énergie stockée dans le sol et les matériaux : elle dépend de leur capacité à transmettre et à stocker de l'énergie. L'absence de végétation, et une meilleure capacité des matériaux à stocker cette énergie font que l'énergie stockée est plus importante en ville qu'à la campagne. De plus, elle est favorisée par l'effet de piège entre les façades des immeubles ainsi que par la présence de facettes verticales, qui augmentent l'aire de réception du rayonnement solaire. C'est la principale source d'énergie la nuit, ce qui explique un effet de chaleur urbain plus important quelques heures après le coucher de soleil, puisque cette énergie est restituée, tandis que la campagne se refroidit plus rapidement.

Ce terme est difficilement mesurable, et est généralement obtenu par des estimations basées sur un schéma de paramétrisation, ou alors est déduit par différence à partir des autres termes du bilan d'énergie.

1.1.4.3 Flux de chaleur latente (LE)

La chaleur latente, à savoir l'énergie utilisée pour l'évaporation de l'eau, est très inférieure en ville. Cela s'explique par le fait qu'en milieu rural, l'eau s'infiltre dans le sol, s'évapore, puis retourne dans l'atmosphère par ce processus ou par évapotranspiration du couvert végétal. Or, en ville, la pluie ruisselle sur les surfaces imperméabilisées, puis est évacuée par les égouts. La chaleur latente est d'autant plus faible que la surface imperméabilisée est importante.

De plus, l'évapotranspiration est plus faible en ville qu'à la campagne, du fait du remplacement de la végétation par des matériaux imperméables.

L'énergie non utilisée pour la restitution d'eau à l'atmosphère est répartie entre G et H. En effet, une partie est stockée dans le sol et les matériaux, avant d'être restituée dans la soirée, tandis que l'autre réchauffe les basses couches de l'atmosphère par convection sous forme d'un flux de chaleur sensible.

1.1.4.4 Flux de chaleur sensible (H)

Le fait que le flux de chaleur sensible soit alimenté plus longtemps en ville qu'à la campagne une partie de la nuit est une des causes majeures de l'effet de chaleur urbain. En effet, l'énergie stockée dans les matériaux est restituée la nuit, et continue à fournir H en énergie, qui peut ainsi rester positif la nuit en ville. Le refroidissement radiatif plus rapide que la baisse de la température de l'air met en évidence le rôle du flux de chaleur sensible dans le réchauffement de l'atmosphère (Oke, Nunez, 1975), et confirme l'importance de ce processus dans l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.

La difficulté de mesurer certains termes du bilan d'énergie rend délicate l'estimation de ce bilan dans un milieu aussi complexe que la ville, puisqu'elle repose sur des mesures et une modélisation de certaines contributions dans des conditions favorables.

Les termes du bilan d'énergie sont tous affectés par le passage d'un milieu rural à la ville : la réduction de surfaces végétales et le fait que les matériaux urbains stockent bien l'énergie mais pas l'eau font que H et G sont plus forts et LE moins fort qu'à la campagne.

Dans une ville, en journée, G représente 20 à 30% de R_n (contre 5 à 15% pour des surfaces végétales). H, qui dépend des gradients de température et des caractéristiques de la masse d'air est plus variable

(de 20 à 75% de R_n), tandis que LE peut être quasiment nul dans les centres villes après une période sèche. La nuit, les valeurs de flux sont faibles, et H peut rester positif.

Précisons également que les flux d'énergie peuvent varier considérablement au sein même d'une ville, en raison de caractéristiques propres à chaque quartier et à leur influence sur la répartition de l'énergie. Lors de mesures de flux d'énergie réalisées à Vancouver, des variations de l'ordre de 40% ont été enregistrées pour les flux de chaleur relevés à l'échelle du quartier (Schmid et al, 1990).

1.2 Problèmes rencontrés en climatologie urbaine et les voies de recherche

Afin de déterminer aux échelles du canyon et du fragment urbain les flux majeurs intervenant dans les équations des bilans radiatif et d'énergie, les liens et les mécanismes internes au système urbain, et d'étudier les différences entre le milieu urbain et le milieu naturel, un certain nombre de démarches combinent mesures et modélisation.

1.2.1 Mesures : campagne et base de données

Dans le but de mieux comprendre les phénomènes micro-climatiques urbains, Nunez et Oke (1977) ont effectué les premières mesures dans une rue canyon isolée dans la ville de Vancouver (Canada). Par la suite, de nombreuses études similaires se sont succédées avec pour objectif d'étudier l'influence de la morphologie et des configurations urbaines sur les apports et échanges énergétiques et sur le microclimat. L'échelle d'investigation est différente selon l'objectif des travaux, puisqu'elle peut aussi bien concerner les phénomènes autour d'un bâtiment ou à l'intérieur d'une rue, que la couche d'atmosphère au dessus d'une agglomération urbaine. Ainsi, en fonction de l'échelle, différents problèmes se posent :

- dans la canopée urbaine, la complexité des mesures réside dans la collecte et l'assemblage de mesures significatives pour un milieu connu pour sa grande variabilité. Les observations peuvent être effectuées soit à l'aide de stations fixes, soit par des mesures itinérantes. Ces dernières, qui présentent l'inconvénient d'être limitées aux rues, nécessitent des corrections vis à vis du temps (le refroidissement peut être important entre le début et la fin du transect), et leurs résultats peuvent aussi aider dans le choix des stations de mesures fixes. Les mesures réalisées avec des stations fixes offrent une plus grande flexibilité dans le choix des sites de mesure. Cependant, la question du nombre de stations et de leur emplacement est à considérer, et dépend des objectifs initiaux, sachant que le problème de la représentabilité spatiale se pose. Elles doivent représenter le plus fidèlement possible les paramètres météorologiques de la zone d'étude et les caractéristiques de la surface. Il convient également d'éliminer les effets « externes » comme par exemple ceux dus à la topographie et aux étendues d'eau.
- dans la couche limite urbaine, les mesures doivent être effectuées au-dessus du niveau des toits, à une altitude qui dépend de la vitesse et de la direction du vent, de la stabilité de l'atmosphère et de la répartition des bâtiments ou de la hauteur des obstacles. Cette hauteur de mesure est jusqu'à 2 à 3 fois l'espace horizontal entre les éléments (Garatt, 1980), ce qui implique de placer les capteurs au sommet de mâts. Cependant, les mesures de rayonnement descendant peuvent être réalisées au niveau des toits.
- Pour l'ensemble de la ville, l'obtention de paramètres homogènes est compliquée par la présence d'obstacles très variés et par les ombres : le problème de la représentativité des mesures se pose, et le recours à la modélisation et à la télédétection est nécessaire, afin d'avoir des valeurs spatialisées des différents paramètres. Hormis l'observation des îlots de chaleur

urbain, la télédétection satellitaire à partir de plates-formes de type météorologique, est peu adaptée aux exigences de la recherche en climatologie urbaine, en raison d'une résolution spatiale trop faible la plupart du temps. Et lorsque la résolution spatiale est plus fine, cela va au détriment de la résolution temporelle qui devient plus faible. Les chercheurs ont donc besoin de recourir à des capteurs multispectraux embarqués à bord d'avions ou d'hélicoptères, mais le coût élevé de telles pratiques freine de nombreuses recherches.

Notons que la définition de la surface rurale de référence n'est pas aisée non plus, puisqu'elle doit être dégagée de toute influence urbaine, topographique (flanc de colline, fond de vallée...) ou de l'eau. Le problème de l'occupation du sol se pose également, notamment lorsque le couvert est sujet à un comportement variable selon la saison. Cette notion de surface rurale reste par ailleurs imprécise, puisqu'elle peut aussi bien être assimilée à un sol nu qu'à une forêt dense.

1.2.2 Modélisation

Comme nous venons de le voir, la faible représentativité spatiale des mesures locales peut être palliée grâce à une combinaison des mesures avec la modélisation. Deux grands types de modèles sont utilisés, en fonction de l'échelle d'investigation :

- à l'intérieur de la canopée urbaine, on applique des modèles physiques qui permettent de réaliser des simulations dans le canyon. Cependant, la modélisation physique précise des flux turbulents à l'intérieur d'un canyon et plus généralement dans la canopée urbaine est un problème très complexe. De fait, on ne dispose pas pour les surfaces urbaines de formulations théoriques adéquates comparables à celles dont on dispose pour les surfaces rurales ouvertes et globalement planes. Ceci constitue une difficulté importante pour la modélisation du bilan d'énergie d'une zone urbaine. Ainsi, par exemple, et par nécessité, la géométrie doit être fortement simplifiée, et on se retrouve le plus souvent avec une rue bordée de murs continus, de même couleur ou albédo, de même géométrie, ainsi que l'absence d'eau (flaques) et végétation, soit des conditions qui ne correspondent pas à la réalité terrain.
- dans la couche limite urbaine on a recours aux modèles paramétrés. Ces modèles utilisent un groupe d'équations liées pour représenter la dynamique et la thermodynamique de l'atmosphère. Dans la plupart des cas, il est impossible d'y inclure toutes les relations décrivant les processus physiques et des formules empiriques sont utilisées. Ils sont souvent simplifiés, afin de prendre en compte des conditions favorables. Si les résultats de telles simulations s'avèrent en général satisfaisants dans les conditions particulières pour lesquelles le modèle a été conçu (ciel clair, absence de vent, climat et saison, géométrie urbaine...), ils s'adaptent assez mal aux autres situations.

Le recours à la modélisation ne peut s'effectuer sans l'association avec des mesures, que ce soit pour alimenter les entrées du modèle ou pour confronter aux sorties. Les mesures doivent toujours être faites en fonction du modèle utilisé et dans le but de répondre à un objectif.

1.3 Modèles : synthèse bibliographique des modèles développés pour la climatologie urbaine

Le modèle de rayonnement dans un canyon urbain mis au point par Arnfield (1976) fut l'un des premiers à être utilisé. Il calcule les rayonnements solaire et infrarouge sur les différentes facettes d'un

canyon, à partir des échanges entre les façades entre elles et entre les façades et les sources externes de rayonnement. Il utilise le facteur de visibilité du ciel, ainsi que les réflexions multiples à partir d'un modèle prenant en compte la géométrie du canyon et les matériaux. La validation de ce modèle de rayonnement a été effectuée à partir de mesures d'albédo (Arnfield, 1988) et de mesures de flux en grande longueur d'onde (Voogt et Oke, 1991).

Par la suite, un certain nombre de modèles ont été élaborés, afin de simuler différents processus : influence de l'atmosphère polluée au dessus d'une ville sur le bilan radiatif, simulation de brises engendrées par des contrastes de températures, modification des propriétés d'une masse d'air stable qui réalise une advection dans une atmosphère urbaine, répartition de l'énergie sur une surface en réponse aux flux radiatifs...

Certains modèles permettent de calculer le bilan d'énergie d'un canyon à partir du bilan des différentes facettes qui le constituent (Terjung, O'Rourke, 1980 ; Mills, 1993 ; Arnfield, 2000). A titre d'exemple, celui de Mills (1993) simule le flux de chaleur sensible au sommet du canyon, ainsi que la température de surface et le bilan radiatif sur les facettes du canyon. Ce modèle s'appuie sur la combinaison du modèle à vent de Nicholson (1975), du modèle de rayonnement dans un canyon urbain d'Arnfield (1982), et d'une estimation de l'évolution de la température de l'air à l'intérieur du canyon. Ces travaux ont notamment montré l'importance de la géométrie et des matériaux (Arnfield, 1990, Oke et al, 1991), et la difficulté de prendre en compte l'advection (Arnfield et Mills, 1993).

La difficulté à simuler certains termes du bilan d'énergie ont conduit à une simplification de beaucoup de modèles, et certains prennent uniquement en considération les conditions de nuit calmes, où le rayonnement solaire et les flux de chaleur sensible et latente sont négligeables, ce qui permet de représenter la restitution de l'énergie stockée par les matériaux. De cette manière, Arnfield (1990) et Oke (1991) ont modélisé le refroidissement nocturne des surfaces urbaines. Le modèle OHM (Objective Hysteresis Model, Grimmond et al, 1991) permet également de simuler l'énergie stockée dans différents types de surface en fonction de l'extension spatiale de chacune en réponse au rayonnement net. Il est incorporé dans plusieurs modèles de bilan d'énergie, dont LUMPS qui va être présenté plus en détails dans cette partie, avec d'autres modèles plus récents que sont TEB et SOLENE.

1.3.1 LUMPS

Le modèle LUMPS (Local Scale Urban Meteorological Parametrization Scheme) consiste en une série d'équations permettant de calculer les flux de chaleurs dans l'environnement urbain à échelle locale, à savoir le flux de stockage, ainsi que les flux de chaleur sensible et latente (Grimmond, Oke, 2002). Il présente des similitudes avec le modèle HPDM (Hybrid Plume Dispersion Model) mis au point par Hanna et Chang (1992, 1993).

Les données d'entrées sont relativement limitées. Il s'agit :

- du rayonnement net, qui détermine les limites énergétiques pour les autres flux du bilan d'énergie,
- d'une connaissance du type de surface (aires de végétation, constructions...) ainsi que l'espace qu'elles occupent,
- de la morphométrie, c'est à dire la hauteur et la densité des différents éléments,
- de quelques paramètres météorologiques standards comme la température de l'air, l'humidité, la pression ou la vitesse du vent.

Pour étudier les gains et pertes de chaleurs ΔQ_G de toutes les substances (air, sol, biomasse, constructions...), le modèle OHM de Grimmond et al (1991) est utilisé. Il prend en compte la chaleur stockée dans différents types de surfaces et leurs réponses au bilan radiatif, en fonction de l'extension spatiale de chacune (NB : les notations utilisées dans ce paragraphe sont celles de la littérature).

$$\Delta Q_G = \sum_{i=1}^n (f_i a_{1i}) Q^* + \sum_{i=1}^n (f_i a_{2i}) \left(\frac{\partial Q^*}{\partial t} \right) + \sum_{i=1}^n (f_i a_{3i})$$

avec :

Q^* : rayonnement net à échelle locale,

f : fraction de chaque surface,

n : type de surface,

a : coefficients propres à la surface considérée.

Pour calculer le flux de chaleur sensible, le modèle LUMPS s'appuie sur l'équation de De Bruin et Holtslag (1982) :

$$Q_H = \frac{(1 - \alpha) + \frac{\gamma}{s}}{1 + \frac{\gamma}{s}} (Q^* - \Delta Q_s) - \beta$$

avec :

s : pente de la pression de vapeur saturante,

γ : constante psychrométrique,

α : paramètre empirique qui tient compte de l'humidité de la surface

β : constante

De Bruin et Holtslag (1982) avaient également mis au point une équation pour déterminer le flux de chaleur latente, mais qui a été reprise par Holtslag et Van Ulden (1993). Ces derniers ont réévalué les paramètres α et β afin de tenir compte des espaces verts urbains et du flux de chaleur latente positif observé en ville après le coucher du soleil, ce qui améliore la précision. L'équation suivante sera donc utilisée dans LUMPS pour évaluer le flux de chaleur latente :

$$Q_E = \alpha \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{s}} (Q^* - \Delta Q_s) + \beta'$$

Le modèle LUMPS a été testé en comparaison avec des observations de terrain collectées dans 7 villes nord-américaines (Grimmond, Oke 2002), et les résultats sont apparus meilleurs que pour les modèles précurseurs, en particulier HPDM. Cependant, il convient de préciser que les effets du vent et des sources importantes de chaleur anthropique sont mal pris en compte, et que dans les situations où ces variables sont importantes, LUMPS ne peut être utilisé.

1.3.2 TEB

Le schéma de surface TEB (Town Energy Budget, Masson, 2000), prenant en compte la géométrie urbaine tridimensionnelle, a été développé et inclus dans le modèle atmosphérique Méso-NH. Il est conçu pour être aussi général que possible, dans le but de pouvoir représenter n'importe quelle ville et n'importe quelle condition météorologique. Son objectif est de simuler les flux de chaleur entre une surface urbanisée et l'atmosphère, afin de caractériser les conditions aux limites du modèle Méso-NH pour les zones urbaines (Masson, 2000).

La géométrie utilisée par le modèle est simplifiée, puisqu'elle s'apparente à un canyon urbain, c'est à dire une rue limitée en largeur par les volumes représentant des immeubles (figure 1.8). Le bilan

d'énergie est considéré sur 3 surfaces : la rue, les façades et les toits. Ces bilans sont ensuite ramenés au niveau de la canopée urbaine.

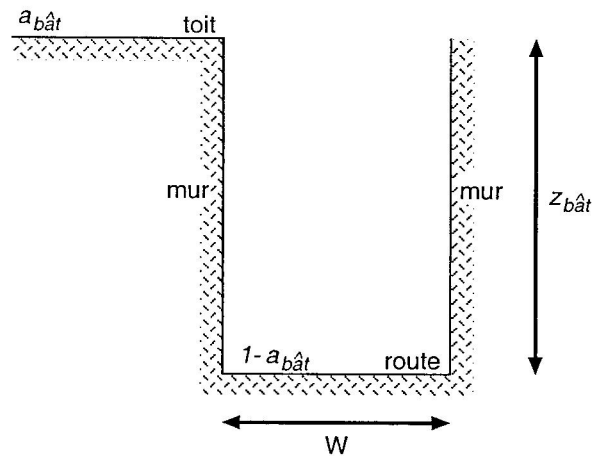


Figure 1.8 Schématisation d'un canyon dans TEB (d'après Lemonsu, 2003) avec $a_{bât}$ la fraction occupée par les bâtiments, $z_{bât}$ la hauteur des bâtiments, et W la largeur du canyon.

Les données d'entrée à fournir à ce modèle concernent aussi bien la géométrie comme le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue, les caractéristiques des surfaces prises en compte (albédo, émissivité...), que les paramètres météorologiques (rayonnement solaire global, rayonnement atmosphérique, précipitations, pression, humidité spécifique, température, vitesse du vent).

Enfin, il convient de préciser que TEB est issu du modèle ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere), qui est un schéma de surfaces naturelles végétalisées. Ce dernier calcule les bilans hydriques et énergétiques à la surface. D'après Masson (2000), il complète TEB lors de certaines simulations en milieu urbain, comme lorsque des parcs urbains sont pris en compte.

1.3.3 SOLENE

Le modèle SOLENE (Groleau, 1998) a été conçu par le laboratoire CERMA qui s'intéresse aux outils de conception de l'architecte dans le domaine de l'ajustement climatique et thermique. SOLENE constitue un système ouvert de questionnement solaire, lumineux et thermique organisé autour de fonctions de simulation qui permettent d'appréhender les ensembles construits suivant divers paramètres physiques, et de fonction de visualisation qui rendent compte des comportements observés dans l'espace et le temps (Groleau, 1998).

Tandis que les modèles LUMPS et TEB évaluent les flux de surface à l'aide d'algorithmes combinant les paramètres de surface avec des variables aérodynamiques et thermodynamiques permettant de prendre en compte une ville entière, le modèle SOLENE travaille à une échelle plus réduite, celle d'un ensemble urbain donné par sa volumétrie (rue, place, îlot, voir quartier). Il simule une séquence limitée de temps, permettant d'observer le comportement thermo-radiatif d'ensembles urbains, mais ne prend pas en compte le flux de chaleur latente et l'anthropie.

Son atout par rapport aux modèles de canyon urbain développés ces 30 dernières années est la possibilité de pouvoir importer un modèle géométrique en 3 dimensions, représentant fidèlement la morphologie du quartier que l'on souhaite simuler. On ne se retrouve plus ici dans l'hypothèse simplifiée d'une rue entourée par des blocs de béton représentant les immeubles. La morphologie des

bâtiments, les caractéristiques de surface des toits, murs ou du sol et de la végétation sont alors considérées afin de simuler avec précision les échanges thermiques.

La reconstitution de la géométrie de quartier considéré permet d'effectuer différentes simulations à l'intérieur du territoire urbain, et pour chaque élément de la géométrie. Elles concernent notamment :

- les questions d'ensoleillement (tracé d'ombre, durée d'insolation...).
- les questions d'énergétique solaire : composantes directes et diffuses du rayonnement incident solaire simulées sur chaque élément de la géométrie. Les réflexions multiples sont également prises en compte.
- l'évaluation de l'éclairement naturel en provenance du ciel et du soleil.
- les problèmes de transmission lumineuse à l'intérieur des bâtiments.
- les questions de rayonnement thermique, en tenant compte des rayonnement solaire et infrarouge thermique.
- les flux de chaleur sensible.

Afin de réaliser ces simulations, un certain nombre de paramètres d'entrée sont nécessaires, notamment afin de définir les propriétés solaires et thermiques des matériaux de construction utilisés dans l'espace étudié. La température de l'air est également demandée. Concernant le rayonnement incident, aussi bien dans le visible que dans l'infrarouge, il peut être donné en entrée, mais en l'absence de valeurs mesurées, le modèle pourra le simuler. Nous présenterons ce modèle plus en détail dans la suite de ce travail.

1.4 Campagnes

Les premières campagnes de mesures en climatologie urbaine sont apparues dans les années 70 en Amérique du Nord, pour se développer par la suite sur les autres continents. En Europe, trois campagnes internationales d'envergure se sont succédées ces dernières années :

- NANTES '99 : l'expérience Nantes '99 s'inscrit dans le cadre du projet européen URBCAP mis en place afin de valider les modèles élaborés pour calculer la qualité de l'air locale et les distributions spatiales et temporelles des polluants dans les différents quartiers d'une ville. La campagne de mesure réalisée à Nantes traite essentiellement la pollution et la dispersion des polluants dans un canyon urbain. Pour atteindre cet objectif, le monoxyde de carbone émis par les véhicules est mesuré dans un canyon urbain, à un niveau bas, ainsi que vers le haut du canyon pour évaluer le temps de résidence des polluants dans la rue.
- BUBBLE : cette campagne de mesure s'est déroulée pendant un an dans la ville de Bâle (août 2001-juillet 2002), avec pour objectif une meilleure compréhension des processus de propagation et de transport dans l'atmosphère urbaine, afin d'améliorer les modèles de ce type. Dans cette optique, la structure verticale des flux turbulents est étudiée grâce à des capteurs installés à différents niveaux d'une tour météorologique montée dans un canyon, et dont le sommet correspond à 2 fois la hauteur des bâtiments. Parallèlement, des mesures d'écoulement dans la couche limite urbaine sont effectuées grâce à des techniques de télédétection (SODAR, LIDAR profileur de vent).
- ESCOMPTE : l'objectif principal de la campagne de mesure du projet ESCOMPTE est d'étudier les processus dynamiques et chimiques à l'origine de forts épisodes de pollution photochimiques fréquemment observés dans la région marseillaise lors de la saison estivale (Lemonsu, 2003). Dans cette optique, une base de donnée tridimensionnelle des polluants primaires ainsi que la composition et la dynamique de l'atmosphère lors d'épisodes de

pollution atmosphérique a été établie. Elle a pour cadre la région de Marseille et de l'étang de Berre entre les 4 juin et 16 juillet 2001, période pendant laquelle les épisodes de pollution sont plus marqués. Ses résultats visent à valider des modèles de pollution, mais également de participer à leur évolution.

Conclusion du chapitre :

Les études antérieures effectuées ont très vite montré la complexité de ce type de recherches, et l'inadéquation des méthodes traditionnelles couramment utilisées jusqu'alors en climatologie. Ces méthodes, qui s'appuient sur une approche descriptive fondée sur la statistique des paramètres climatologiques (température de l'air, humidité, vent), ne pouvaient permettre une interprétation physique des phénomènes observés. En effet, si en climatologie urbaine, la mesure des différents paramètres climatologiques, qui sont des termes d'équilibre, reste un élément de base, leur interprétation nécessite la connaissance des bilans radiatif et d'énergie de la surface étudiée. Ces bilans dépendent étroitement des propriétés de l'atmosphère et des caractéristiques de la surface étudiée notamment l'albédo, la réflectance et l'émissivité. Or dans les zones urbaines, l'atmosphère est le plus souvent polluée et les caractéristiques de la surface sont fortement liées à la nature des matériaux et la géométrie et présentent de ce fait une forte variabilité spatiale. Une bonne connaissance des bilans radiatif et d'énergie en zone urbaine se heurte à deux types de difficultés :

- la nécessité d'un nombre important de sites d'observation dans un milieu aussi hétérogène qu'une agglomération urbaine.
- la complexité de mesurer dans ce milieu les échanges d'énergie et de masse qui se produisent entre la surface et l'atmosphère. Cette complexité est essentiellement due à la complexité de la surface d'échange constituée par les routes les murs et les toits des bâtiments.

Pour contourner toutes ces difficultés, la climatologie urbaine cherche à combiner les mesures de terrains, sur des sites ponctuels ou d'extension limitée, et une approche de modélisation, basée notamment sur les modèles atmosphériques non - hydrostatiques bien adaptés à ces échelles (l'échelle du quartier). Les schémas de paramétrisation de la surface constituent un élément essentiel de ces modèles.

Mais la plupart des études menées jusqu'ici ont été réalisées dans des villes nord-américaines, soit dans un autre contexte climatique et géométrique. En dehors de ces considérations « géographiques », les sites sélectionnés étaient souvent éloignés de l'hypercentre, en raison des difficultés techniques pour y installer le dispositif nécessaire. Par ailleurs, les rues choisies l'ont été pour leur structure très simple (par exemple, une petite rue avec deux bâtiments identiques avec un mur tout blanc qui se font face), afin de s'approcher le plus possible de la géométrie urbaine telle qu'elle est considérée dans les modèles.

Pour faire face à ces difficultés, notre projet propose :

- l'étude à différentes échelles : le passage de l'échelle du canyon à celle du quartier, et ultérieurement à celle de l'agglomération afin de déterminer à chacune de ces échelles les flux majeurs intervenant dans les bilans radiatif et d'énergie, d'évaluer les liens avec les paramètres et mécanismes propres au système et de valider, par télédétection et à différentes échelles, les schémas et modèles utilisés. Pour atteindre cet objectif, nous avons choisi une démarche basée sur l'utilisation conjointe de la modélisation numérique et des mesures de terrain effectuées aux échelles adéquates.
- de prendre en compte la géométrie urbaine ainsi que les autres paramètres de surface, comme la rugosité, qui peuvent être déterminés à partir des Modèles Numériques d'Élévation (DEM), et de l'intégrer dans les modèles. L'avantage d'une telle démarche est qu'elle permet de tenir

compte, d'une manière explicite, de la géométrie urbaine et de la nature des matériaux dans la cartographie des bilans radiatifs et énergétiques et ainsi de mieux expliquer leurs évolutions spatiales et temporelles et ses conséquences sur les phénomènes de surface (îlots de chaleur et d'humidité urbaine) et d'altitude (dispersion dans la couche limite).

- d'intégrer la géométrie dans les modèles, afin de ne plus considérer la rue comme une surface plane entourée de deux parallélépipèdes identiques. Dans cette optique, nous disposons du modèle SOLENE adapté à l'échelle du canyon urbain et capable de déterminer les paramètres radiatifs tel que l'albédo, le rayonnement infrarouge émis, la température de surface des murs, de la route, et du canyon entier. Il détermine également le flux de chaleur sensible pour ces mêmes éléments. L'intégration des résultats sur plusieurs canyons doit permettre d'obtenir les mêmes flux à l'échelle du "Quartier". Mais à cette échelle, et en plus de SOLENE, nous disposons du modèle TEB-ISBA (schéma de paramétrisation intégré au modèle météorologique non - hydrostatique MESO-NH de Météo-France. Ce schéma permet, moyennant quelques simplifications nécessaires, de simuler les bilans radiatif et d'énergie de la surface à cette échelle.

2- Campagne Strasbourg 2002

La campagne de mesures qui se déroule à Strasbourg du 7 juillet au 20 août vise à montrer comment la structure urbaine de la ville influence son climat, et à faire ressortir les différences observées par rapport au milieu rural environnant. Cette agglomération de 450 000 habitants possède un certain nombre de critères favorables à une telle expérience. Tout d'abord, sa localisation au cœur de la plaine d'Alsace, en l'absence de topographie immédiate constitue un atout majeur, puisque l'analyse et la modélisation des flux et de l'impact de la ville sur le climat régional s'en trouvent facilitées. En effet, l'absence totale de topographie empêche l'apparition de phénomènes micro-climatologiques qu'elle pourrait engendrer. De plus, dans les basses couches, la circulation s'en retrouve simplifiée en raison de la canalisation des vents par le fossé rhénan suivant un axe Nord-Sud.

Le terrain n'est pas inconnu, puisque Strasbourg et sa région ont déjà été le cadre de campagnes de mesures antérieures, qui ont fourni une base de données considérable, nous apportant une bonne connaissance du site, permettant ainsi d'orienter nos travaux. Nous avons également accès à des données prélevées par Météo-France et l'ASPA (rayonnement, paramètres climatiques standards, qualité de l'air) sur un réseau de mesures locales aussi bien dans l'agglomération strasbourgeoise que dans la campagne environnante.

Enfin, nous disposons d'un modèle numérique d'élévation qui couvre une bonne partie de l'agglomération strasbourgeoise, et qui permettra de reproduire la géométrie des rues et quartiers étudiés pour le modèle SOLENE.

Tous ces points font de la ville de Strasbourg un terrain idéal à la réalisation de notre campagne de mesures.

2.1 Objectifs spécifiques de la campagne

Il s'agit de déterminer, à l'échelle du canyon puis à celle du quartier, les flux majeurs intervenant dans l'équation du bilan radiatif et du bilan d'énergie, à l'aide d'une démarche basée sur des mesures de terrain et la modélisation. La paramétrisation à différentes échelles pouvant ensuite être validée grâce à l'apport de la télédétection. Dans le cadre de cette thèse, il s'agit du modèle SOLENE, dont la validation sera réalisée à deux échelles :

- à l'échelle du canyon, à partir de mesures locales et appropriées à différents niveaux de hauteur (paramètres climatiques standards, flux radiatifs et de chaleur sensible). Ces mesures seront étendues à l'ensemble du canyon par le biais de mesures distribuées de la température de surface obtenues avec une caméra infrarouge.
- à l'échelle du quartier, une fois la validation au niveau du canyon effectuée, grâce à des images obtenues à partir d'un imageur hyper spectral sur l'ensemble du domaine optique et de caméra infrarouge, ainsi que grâce à des mesures de rayonnement réalisées à la base de la couche limite urbaine par l'intermédiaire de capteurs montés sur des mâts.

Afin d'y parvenir, des mesures en continu ont été effectuées sur plusieurs sites, entre le 7 juillet et le 20 août 2002. Elles ont été complétées par des mesures mobiles de température et d'humidité ainsi que par des mesures de télédétection à différentes échelles.

2.2 Les campagnes antérieures sur Strasbourg et la région

La région de Strasbourg a fait l'objet d'études climatologiques approfondies lors du projet climatique transfrontalier REKLIP (Regio KLima Projekt), qui s'est déroulé entre les années 1990 et 1997 sur tout le fossé rhénan méridional. L'objectif principal de ce projet était l'étude des aspects physiques et climatologiques du comportement de la couche limite planétaire. Pour y parvenir, un réseau de 36 stations automatiques de mesures météorologiques et de bilan d'énergie a été mis en place, afin de couvrir l'ensemble de la zone d'étude. Les paramètres climatologiques standards y ont été mesurés (température, humidité, précipitations, vitesse et direction du vent...) ainsi que les composantes des bilans radiatif et d'énergie au niveau du sol.

Cette étude contribue à apporter une aide aux décisions relatives à l'aménagement du territoire et pour les activités sensibles aux phénomènes météorologiques, ainsi que pour la surveillance de la qualité de l'air. Elle permet de caractériser de manière exhaustive le climat du fossé rhénan méridional, et de disposer d'un jeu de données considérable, qui en font l'une des zones géographiques les mieux renseignées d'un point de vue climatologique.

Par ailleurs, la ville de Strasbourg a déjà fait l'objet d'une étude de climatologie urbaine en 1999, qui s'insérait dans le cadre du projet PRIMEQUAL (Programme de Recherche Inter organismes pour une Meilleure Qualité de l'Air à l'échelle Locale). Ce projet de recherche, d'une durée de quatre ans (1996-2000) avait pour but de développer un système opérationnel de prévisions statistiques de pollution atmosphérique sur l'agglomération de Strasbourg.

Afin d'améliorer la précision du modèle statistique, une analyse fine de paramètres et processus climatique à l'échelle urbaine a été réalisée (Fischer, 2001). Elle repose sur un certain nombre de points :

- la constitution d'une base de données permettant une bonne caractérisation du climat urbain de l'agglomération de Strasbourg, en densifiant le réseau de mesures en place.
- la mise en place d'une campagne de mesures actives (août 1999), afin d'une part de bien appréhender le phénomène d'îlot de chaleur urbain, d'autre part de mesurer l'influence de la ville sur les processus radiatif et énergétiques de surface.

Cette étude a notamment permis de mettre en évidence :

- l'existence d'un îlot de chaleur urbain sur l'agglomération strasbourgeoise, ainsi que sa dynamique spatiale et temporelle. Des gradients de température de l'ordre de 7,5°C ont pu être mesurés entre ville et campagne.
- l'influence de la ville sur le rayonnement global incident, avec des valeurs 8% plus faibles que ce qui est mesuré en zone rurale.
- la diminution du rayonnement global incident à mesure que le rapport hauteur des bâtiments/largeur du canyon augmente, et l'augmentation du rayonnement réfléchi lorsque l'on se rapproche du sol.
- l'importance de l'énergie stockée par les matériaux, démontrée par la mesure de valeur de rayonnement atmosphérique plus élevé à 10 mètres du sol qu'au niveau des toits.

Les résultats de ces premières expérimentations en climatologie urbaine sur l'agglomération strasbourgeoise ont été utiles pour guider et orienter la campagne de mesures réalisée l'été 2002.

2.3 Sites de mesures

2.3.1 Critères et choix des sites

En dehors des questions d'accessibilité, prédominante dans le cadre d'installation de telles infrastructures, nous présentons ici les critères qui ont dicté le choix des sites (figure 2.1) de mesures principaux que sont la rue de l'Argonne, le PEGE (Pôle Européen de Gestion et Economie), ainsi que l'IPCB (Institut de Physique-Chimie Biologique).

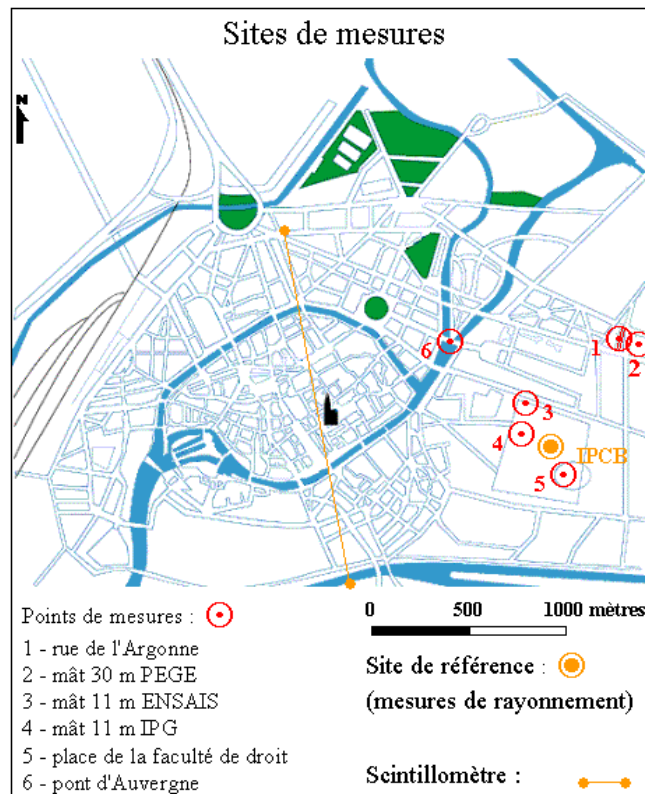


Figure 2.1 Carte de localisation des sites de mesures

i) La rue de l'Argonne (figure 2.2) est le site retenu pour représenter un canyon urbain en raison :

- de la géométrie de la rue, rectiligne et bordée de part et d'autre d'immeubles continus et sensiblement de même hauteur, ce qui correspond à la définition d'un canyon urbain décrite dans la littérature et utilisée pour les expérimentations en climatologie urbaine. Notons cependant qu'elle est fermée à ces deux extrémités par de larges avenues perpendiculaires.
- l'orientation de la rue suivant un axe NNE/SSW. On évite ainsi la configuration d'une rue orientée EW, où les façades d'un des côtés resteraient à l'ombre toute la journée. De plus, l'orientation de l'axe de la rue correspond à la direction de la ventilation principale du fossé rhénan.
- en raison de la proximité avec la rue de l'Argonne, qui peut être considérée comme faisant partie de ce quartier, ce qui permet de réaliser des mesures à l'échelle supérieure.

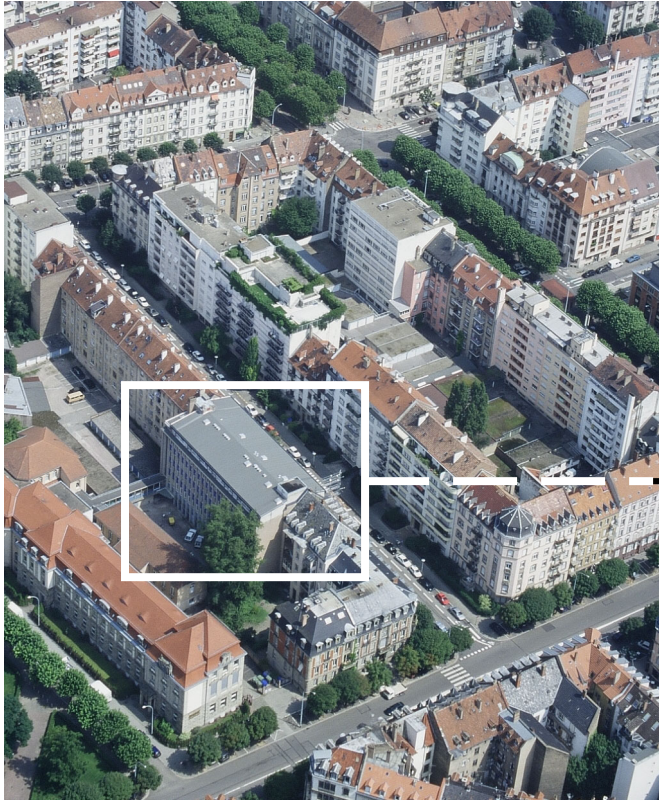


Figure 2.2 Site de la rue de l'Argonne



Figure 2.3 Site du PEGE



Figure 2.4 Site de l'IPG



Figure 2.5 Site de l'PCB

ii) Le site du PEGE (figure 2.3) a été retenu pour les mesures représentatives de l'échelle du quartier :

- parce qu'il est le centre d'un environnement sensiblement homogène qui s'apparente à ce qu'on peut appeler quartier ou fragment urbain, dont les mesures faites au dessus du site sont représentatives.

Des installations du même type ont été ajoutées sur le site de l'IPG (Institut de Physique du Globe, figure 2.4) qui a succédé à celui de l'INSA-Strasbourg (Institut National des Sciences Appliquées), rendu indisponible après le 28 juillet 2002, choisi parce qu'il figure au cœur d'un tissu urbain différent du précédent, malgré leur proximité (500 m).

iii) Enfin, le site de l'IPCB (figure 2.5), distant des sites de la rue de l'Argonne et du PEGE de 500 m est instrumenté pour servir de site de référence pour le rayonnement infrarouge atmosphérique, ainsi que pour les différentes composantes du rayonnement solaire incident, du fait d'un horizon quasi totalement dégagé.

2.3.2 Description des sites

2.3.2.1 Le site « rue de l'Argonne »

Elle est située dans une zone résidentielle à 2km à l'Est-Nord-Est du centre ville, s'étend sur 200 m de long pour 24 m de large, entourée de bâtiments d'une hauteur moyenne de 22 m, lui conférant un rapport H/W de 0,9 (figure 2.2). Un échafaudage de 25 mètres de haut et de 5 de long a été installé contre le mur de la faculté de géographie, et instrumenté sur 4 niveaux (tableau 2.1). La structure a été placée perpendiculairement à la façade, afin de pouvoir réaliser des mesures le long des parois et vers le milieu de la rue. L'intérêt d'enregistrer des valeurs de même grandeur à différents niveaux tient à la nécessité de réaliser des profils et d'étudier l'évolution des paramètres en fonction de la hauteur dans le canyon urbain.

niveau	1	2	3	4
Hauteur (en m)	5,7	11,7	15,7	18,7

Tableau 2.1 Hauteur des différents niveaux de mesure de l'échafaudage

2.3.2.2 Le site « PEGE »

Le PEGE est une ancienne caserne militaire, qui a été rénovée et dont les bâtiments abritent désormais un institut universitaire. Ce site s'apparente à une longue cour, asphaltée avec de la végétation à une extrémité, entourée de bâtiments d'une quinzaine de mètres de haut, dont les façades extérieures font parties de canyons de géométrie relativement homogène (figure 2.3). Cette géométrie, qui s'apparente plus à un fragment urbain qu'à une rue, nous permettra d'obtenir un bilan radiatif à cette échelle.

Pour y parvenir, un mât de 30 mètres de haut a été dressé au milieu de cette cour, au sommet duquel un albédomètre, un bilan-mètre et un anémomètre Sonique ont été installés. Ce mât permet d'effectuer des mesures à un niveau équivalent à deux fois la hauteur des toits, et donc dans la couche limite urbaine. Les mesures sont représentatives de l'échelle du quartier. Elles donnent une estimation de l'énergie qui sort de la canopée urbaine et qui arrive dans la couche de mélange. En raison de l'altitude à laquelle sont placés les capteurs, les mesures sont à caractère intégrateur, et peuvent donc être couplées avec les images obtenues à partir des acquisitions aéroportées.

2.3.2.3 Les sites « IPG » et « INSA »

Ces bâtiments sont situés au cœur du campus de l'esplanade, au bâti plus lâche et moins homogène que le précédent, avec une plus forte proportion de surfaces végétales. Les investigations avaient débutées sur le toit de l'INSA jusqu'au 28 juillet, mais l'installation a dû être démontée pour des raisons de disponibilité, et le matériel a été transféré sur le toit de l'IPG (figure 2.4), distant d'environ 200 m. Dans les deux cas, les mesures sont réalisées sur un mât de 11 mètres, monté sur les toits en terrasse de ces bâtiments d'une vingtaine de mètres de hauteur. Les mêmes capteurs que ceux utilisés pour le site du PEGE équipent le sommet du mât.

2.4 Mesures

Note : tout au long de ce travail, les heures sont données en Temps Universel (TU)

Cette campagne combine des mesures réalisées selon différents protocoles, puisqu'on distingue :

- les mesures stationnelles, qui se concentrent sur l'échafaudage monté rue de l'Argonne, le sommet des mâts, et les stations Météo-France et de l'ASPA. Elles sont réalisées en continu durant toute la durée de la campagne de mesures, soit du 7 juillet au 20 août.
- les mesures mobiles, qui sont réalisées sous forme de transects au travers de l'agglomération où sont mesurées la température et l'humidité en soirée et première partie de nuit. Elles sont réalisées lors des journées à ciel clair et vent faible, dans les conditions les plus favorables à la mise en place d'un îlot de chaleur urbain.
- les mesures faites par télédétection, qui se concentrent sur deux périodes d'observations intensives (POI) : les 27 et 28 juillet pour les mesures faites par l'imageur DAIS (cf. :2.4.3.1), et le 14 août pour les mesures faites via une caméra infrarouge hélicoptée. Ces deux périodes correspondent à des journées de ciel clair, et un vent très faible.

2.4.1 Les mesures stationnelles

i) Les mesures réalisées aux 4 niveaux de l'échafaudage sont les suivantes :

- les flux radiatifs incidents, émis ou réfléchis dans les courtes (pyranomètre) et grandes longueurs d'ondes (pyrgéomètres) à l'horizontale ou parallèlement aux murs.
- le flux de chaleur sensible mesuré par des anémomètres soniques (3 niveaux du 28 juillet au 13 août, puis 4 niveaux pour le reste de l'expérience).
- les vecteurs vent et les paramètres de turbulence dérivés des mesures des anémomètres soniques.
- la température et l'humidité dans des abris ventilés.

Le flux de chaleur latente n'a été mesuré qu'au sommet du canyon pour la période de beau temps du 14 au 20 août 2002 par un hygromètre à krypton (KH20 Campbell Scientific). De plus, la température de brillance locale de la surface asphaltée de la rue et de l'une des façades a été mesurée par le biais de radio-thermomètres Everest.

ii) Sur les mâts du PEGE et de l'INSA (puis IPG), sont effectuées :

- des mesures de flux de chaleur sensible grâce à un anémomètre SONIQUE intégrant une carte de calcul de flux.
- des mesures d'albédo, comme pour le site de la rue de l'Argonne.
- des mesures de rayonnement net, qui comprend tous les termes du bilan radiatif, grâce à un bilan-mètre.

iii) Sur le site de référence de l'IPCB, les différentes composantes du rayonnement solaire incident (directe, diffuse et globale), ainsi que le rayonnement infrarouge atmosphérique et le rayonnement ultraviolet sont mesurés en permanence. Le dispositif permet une mesure continue, grâce à une monture équatoriale automatique qui suit en permanence la trajectoire du soleil, du rayonnement solaire direct (pyrhéliomètres) et diffus (pyranomètre équipé d'une boule). En complément, le rayonnement solaire diffus et global sont également mesurés par deux pyranomètres dont l'un est équipé d'un cache solaire (pour le diffus). Enfin, le rayonnement infrarouge atmosphérique est mesuré par un pyrgeomètre .

2.4.2 Les mesures mobiles

Afin de mesurer les variations spatiales de température et d'humidité, et de pouvoir mettre en évidence l'îlot de chaleur urbain, des mesures mobiles ont été réalisées. A cet effet, le toit d'une voiture a été équipé d'un petit mât surmonté d'un abri instrumenté avec sondes de température et d'humidité, reliées à une centrale d'acquisition et un PC. Au même moment, un GPS transmet au PC l'heure et la position exacte du véhicule.

L'agglomération est parcourue suivant 2 transects, d'une quinzaine de kilomètres chacun. L'un EW, partant de l'aérodrome du Polygone et arrivant à la sortie d'Eckbolsheim, l'autre NS reliant la raffinerie de Reichstett au campus d'Illkirch. Les 2 transects se croisent dans l'hyper centre.

L'enchaînement des 2 transects prend une heure et demie, en comptant un arrêt au début et à la fin de chaque transect pour comparer les valeurs de températures et d'humidité enregistrées à celles relevées à l'aide d'un psychromètre.

Les mesures commençaient en fin de journée, et se poursuivaient jusqu'au milieu de la nuit, afin de mesurer l'îlot de chaleur urbain lorsqu'il est le plus prononcé. L'accent a été mis sur les journées à ciel dégagé, et à temps calme, favorables à la mise en place de ce phénomène. L'ensemble des résultats correspondants est présenté et discuté dans le mémoire de Anne de Hatten (2003).

Type d'appareil	Marque et modèle	Type de mesures	Domaine spectral des mesures	Sites d'utilisation
pyranomètre	Kipp & Zonen CM11	Rayonnement solaire global	0.3 à 2.8 μm	IPCB
	SOLEMS RG100	Rayonnement solaire global	0.4 à 1.1 μm	échafaudage canyon
pyrhéliomètre	Kipp & Zonen CH1	Rayonnement solaire direct	0.2 à 4 μm	IPCB
albédomètre	Kipp & Zonen CM7	albédo	0.3 à 3 μm	échafaudage canyon
	Kipp & Zonen CM14	albédo	0.3 à 2.8 μm	PEGE, IPG/INSA
Bilan-mètre	Campbell Scientific Q7	Rayonnement net	0.3 à 30 μm	Echafaudage canyon, PEGE, IPG/INSA
	Kipp & Zonen NR LITE	Rayonnement net	0 à 100 μm	échafaudage canyon
pyrgéomètre	Kipp & Zonen CG1	Rayonnement infrarouge atmosphérique	5 à 50 μm	échafaudage canyon, IPCB
	Kipp & Zonen CG4	Rayonnement infrarouge atmosphérique	4.5 à 42 μm	échafaudage canyon
pyrgéomètre net	Kipp & Zonen CG2	Rayonnement infrarouge net	5 à 50 μm	échafaudage canyon
Radiomètre IR	Everest 3000 et 4000	Température de brillance	8 à 14 μm	échafaudage canyon
anémomètre	USA.1-Metek Sonique	Flux de chaleur sensible, u, v, w		échafaudage canyon
	CSAT3 Sonique	Flux de chaleur sensibles, u, v, w		échafaudage canyon
	KH20	Flux de chaleur latente		échafaudage canyon

Tableau 2.2 Tableau des capteurs utilisés lors de la campagne de mesures

2.4.3 Télédétection : objectifs et moyens

2.4.3.1 Mesures avion : campagne HYSENS / DAIS

Les mesures distribuées de luminance spectrale dans les domaines visible, proche infrarouge et infrarouge thermique sont obtenues par télédétection aéroportée via l'imageur hyper spectral DAIS (Digital Airborne Imaging Spectrometer). Cette opération a pu être réalisée grâce à un financement obtenu dans le cadre du programme européen HYSENS, et est exécutée par la DLR (Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt) avec son avion de type DORNIER Do-228.

Dans cette optique, trois survols de l'agglomération strasbourgeoise ont eu lieu, le 27 juillet à 16 h et le 28 juillet à 7h et 11h30 (TU). Le survol de l'agglomération a été effectué à une altitude de 1800 mètres, conduisant à des résolutions au sol de l'ordre de 4 mètres et une fauchée voisine d'un kilomètre, suivant deux parcours, l'un Est- Ouest et l'autre Nord- Sud, de près de 10km chacun. Les lignes de vols sont orthogonales entre elles et les heures de survol définies de manière à ce que les observations du capteur se situent pour l'une des lignes dans le plan d'incidence solaire et pour l'autre dans le plan perpendiculaire. Elles se croisent au dessus de l'hypercentre de Strasbourg.

L'imageur DAIS 7915 est utilisé depuis 1995, et comporte 79 canaux dont 6 dans l'infrarouge thermique, comme l'indique le tableau ci-dessous (tableau 2.3) :

Longueur d'onde	Nombre de canaux	Bande passante
400-1000nm	32	15-30nm
1500-1800nm	8	45nm
2000-2500nm	32	20nm
3000-5000nm	1	2000nm
8000-12600nm	6	900nm

Tableau 2.3 Caractéristiques spectrales de l'imageur DAIS79 (Agence Spatiale Européenne, 2001)

Des données de rayonnement pourront ainsi être obtenues à l'échelle de l'agglomération, et des paramètres tels que le rayonnement net, l'albédo et la température de surface seront obtenus après traitement.

2.4.3.2 Mesures héliportées : moyens utilisés

Afin d'obtenir des mesures de températures de surface à l'échelle du canyon et du quartier, une caméra infrarouge a été fixée dans la trappe d'observation photographique d'un hélicoptère. L'objectif de cette opération est d'établir la carte de température de surface du secteur de la rue de l'Argonne et du quartier du PEGE. L'hélicoptère a survolé les sites le 14 août, à une altitude moyenne de 300 mètres au-dessus du sol, aux heures suivantes : 8h30, 12h30 et 15h30 (TU). Lors de chaque vol, 2 passages seront réalisés, afin de pouvoir utiliser 2 objectifs (7° et 20°), et donc d'avoir 2 résolutions spatiales différentes (0,3*0,3 m² et 0,7*0,7 m²). Les mesures sont effectuées dans la bande spectrale 8-12µm, qui correspond à l'infrarouge thermique. Une sonde donnant les valeurs de température, humidité et pression a également été montée sous l'hélicoptère.

La caméra thermique est composée de 2 éléments : le capteur, qui comprend le système d'observation, et un boîtier électronique. Le bruit instrumental n'excède pas 0,2°C selon les données constructeur. L'image finale résultante est une image sous forme de comptes numériques renseignés sur 256 niveaux de gris, qui seront convertis en luminances afin d'obtenir des températures de brillance. En choisissant, en fonction du moment de la journée, des dynamiques d'acquisition de 50 ou 100° C, nous obtenons des résolutions radiométriques de 0,3 et 0,6°C. Lors des opérations héliportées, pour des

raisons pratiques, les données images sont d'abord enregistrées sur bande vidéo sous forme analogique. Les différentes opérations nécessaires pour passer aux luminances sont explicitées plus loin (cf : 4.2).

2.4.3.3 Mesures sols associées

i) Lors des POI : parallèlement aux acquisitions aéroportées, des mesures ponctuelles sont réalisées au sol, afin de contrôler les mesures aériennes. Trois sites ont été choisis, en fonction de leur facilité d'identification sur les images : 1) la rivière de l'Ill à partir du Pont Royal (figure 2.6) pour les survols en avion et en hélicoptère, 2) la cour du PEGE lors des vols de l'hélicoptère (figure 2.3), et 3) le parvis de la Faculté de Droit (figure 2.7) lors des passages de l'avion.

1) sur l'Ill, des mesures de températures de brillance ont été effectuées à l'aide du radiomètre infrarouge BARNES PRT5, monté sur un trépied et visant la rivière à partir du pont. L'eau présente l'avantage d'être une surface sur laquelle la température varie peu spatialement et au cours du temps, et d'avoir une émissivité élevée et assez bien connue par la littérature (0.988). Les mesures étaient réalisées en continu de 30 minutes avant l'heure annoncée du passage de l'avion à 30 minutes après avec un pas de temps d'une minute ; le radiomètre visait sensiblement au milieu de la section du cours d'eau. Lors des survols en hélicoptère, le pas de temps d'acquisition n'est pas le même, des mesures étant alors réalisées toutes les 10 secondes lors des passages de l'hélicoptère au dessus du plan d'eau concerné.

2) dans la cour du PEGE, des mesures de température de brillance ont été réalisées à l'aide d'un radiomètre Everest conjointement aux mesures héliportées. La cour du PEGE est couverte dans sa majeure partie d'une couche d'asphalte, et de part son étendue et son accessibilité offre un terrain propice à des mesures de contrôle de température de brillance. Comme dans le cas précédent, les relevés sont effectués toutes les 10 secondes au moment des survols du site par l'hélicoptère.

3) sur le parvis de la Faculté de Droit, en plus des mesures de température de brillance réalisées avec un radiomètre Everest sous forme de transects perpendiculaires se croisant au centre de la place, des mesures de réflectance spectrale ont été réalisées selon le même principe. Ainsi, 19 points de mesures sont pris en compte lors de chaque série de transects, ce qui correspond à peu près à une mesure tous les 3 mètres. Elles sont réalisées à l'aide d'un spectromètre haute résolution GER 3700 et servent à valider les mesures effectuées dans le domaine du rayonnement solaire réfléchi lors des vols de l'instrument DAIS. Avant chaque mesure sur la cible, une mesure sur un diffuseur étalon est réalisée afin de connaître l'éclairement global incident. Chaque série de transect nécessite environ 10 minutes pour échantillonner le parvis, et elles s'étendent 30 minutes de part et d'autre de l'heure annoncée pour le passage de l'avion.

ii) indépendamment de ces POI, des mesures de certains paramètres ont été réalisées, aussi bien dans le domaine réflectif que dans l'infrarouge :

- 1) des mesures d'albédo, dans le but d'élaborer un algorithme pour obtenir une cartographie de l'albédo à partir des valeurs de réflectance déduites des images DAIS, mais aussi parce que ce paramètre très important sert d'entrée au modèle SOLENE. Les mesures ont été réalisées vers le milieu de journée, lorsque le rayonnement global incident est maximum, à l'aide d'albédomètres. Le ciel était parfaitement dégagé lors des journées en question, ce qui est nécessaire afin de ne pas avoir de fluctuations du rayonnement incident.
- 2) des mesures de réflectance ont été réalisées sur différents matériaux urbains, notamment des toits (tuiles, ardoise, terrasse) à l'aide des spectromètres GER 3700 et Barringer HHRR. Ces mesures pourront être confrontées à celles déduites des images DAIS.



Figure 2.6 Site de mesures du Pont Royal



Figure 2.7 Site de mesures du parvis de la Faculté de Droit

- 3) l'émissivité a également été mesurée car elle est nécessaire pour obtenir la température de surface à partir des températures de brillance mesurées. Nous avons utilisé un radiomètre CIMEL CE 312-2 qui dispose de 5 filtres dans la fenêtre infrarouge thermique entre 8 et 14 μ m. Cet appareil est pourvu d'un filtre large, qui couvre toute la bande, et de 5 filtres plus étroits : 8,1-8,5 μ m (canal 1), 8,5-8,9 μ m (canal 2), 8,9-9,3 μ m (canal 3), 10,3-11,0 μ m (canal 4) et 11,0-11,7 μ m (canal 5). Pour chaque surface, une mesure de la cible est précédée par une mesure du rayonnement atmosphérique descendant afin de pouvoir corriger la mesure cible de la contribution correspondant à la fraction réfléchi par la surface du rayonnement descendant. Un réflecteur diffusant est utilisé à cet effet. Les questions relatives à la radiométrie infrarouge, sa mise en œuvre et les méthodes de déterminations des paramètres physiques sont brièvement rappelées dans l'Annexe A.

Différentes surfaces identifiables sur les images ont été sélectionnées sur lesquelles ces paramètres ont été mesurés :

- 4 terrains de sport possédant des revêtements différents (herbe, pelouse synthétique et 2 terrains stabilisés)
- parvis de la Faculté de Droit (dalles de gravillons enrobés de béton),
- cour asphaltée du PEGE et du lycée Jean Rostand,
- toit en terrasse gravillonnée de l'IPG,
- toit en « mammoth » du PEGE.

domaine	Instrument	Bande spectrale (μ m)	Nombre de canaux	Champs de vue (°)
Solaire réfléchi	BARRINGER HHRR	0,4-2,5	10	2*12
	GER 3700	04-2,4	640	3
Infrarouge	EVEREST	8-14	1	15 et 25
	BARNES PRT5	10,5-12,5	1	2
	CIMEL CE312	8-13	5	10

Tableau 2.4 Récapitulatif des capteurs utilisés lors des mesures de contrôle réalisées au sol

2.4.3.4 Caractérisation atmosphérique : radiosondages

Simultanément à chaque vol (avion et hélicoptère), des radiosondages ont été effectués afin de caractériser l'état de l'atmosphère et de pouvoir effectuer des corrections atmosphériques sur les luminances mesurées au niveau du capteur embarqué. Ils ont été réalisés par l'institut de météorologie de Karlsruhe sur le site de Rheinau-Freistett distant de 15 km du centre de Strasbourg au NW de la ville. Ils ont permis de caractériser les profils atmosphériques de pression, de température et d'humidité, ainsi que la vitesse et la direction du vent à l'aide de mesures réparties entre 0 et 10 km, avec une résolution verticale de l'ordre de 10 mètres.

Les profils verticaux de l'atmosphère obtenus le 28 juillet à 7 heures sont présentés ci-dessous (figure 2.4), les autres profils correspondant à des heures de survol sont fournis en annexe B.

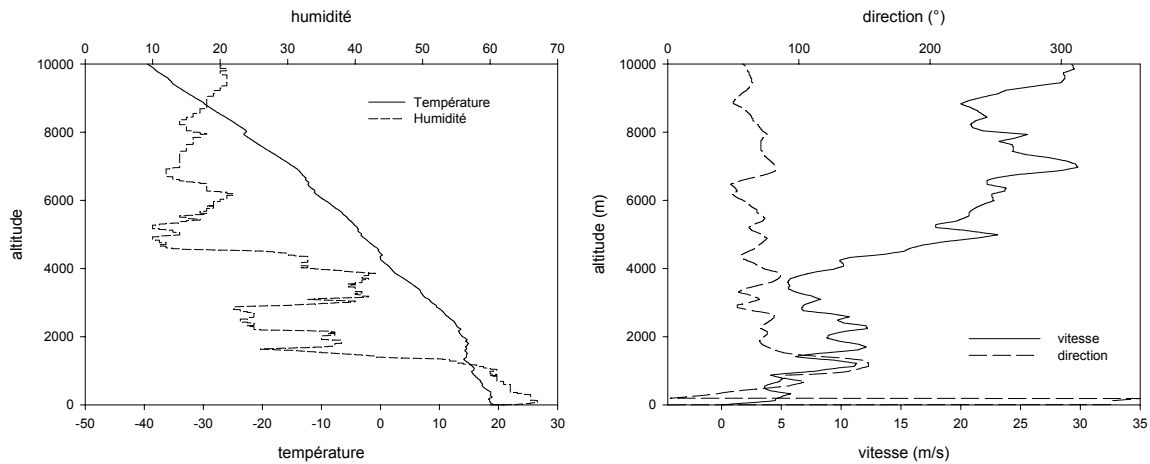


Figure 2.8 Radiosondage réalisé le 28/07/2002 à 7h (TU) : profil de température et humidité et profil de vitesse et direction du vent

2.5 Base de données

Afin de stocker et d'exploiter l'énorme quantité de données collectée tout au long de cette campagne, nous avons mis en place un serveur de données sous LINUX, qui combine des données relationnelles, organisées dans un système de gestion de bases de données, et des données stockées sur un serveur web sécurisé. La base de données est accessible par le réseau à l'ensemble des personnes susceptibles de l'utiliser. Elle est sécurisée et assortie d'une documentation.

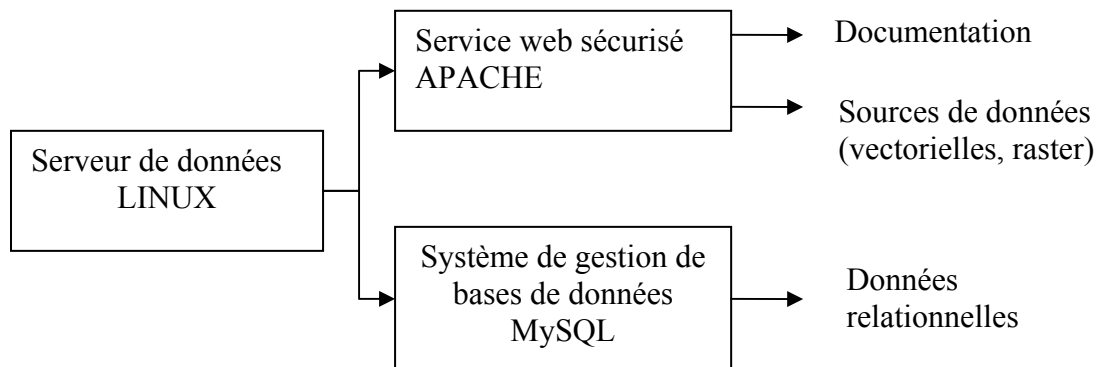


Figure 2.9 : structure du serveur de données

2.5.1 Le système de gestion de base de données

Notre choix s'est porté sur MySQL car il utilise le langage SQL (Structured Query Language) standard, ce qui facilite son utilisation et permet des échanges avec l'extérieur. De plus, MySQL est gratuit pour un usage académique.

Devant la quantité considérable de données collectées, le recours à un serveur de gestion de bases de données s'avère indispensable pour plusieurs raisons :

- l'unicité de l'information : on sait où obtenir une information, puisqu'on trouve une seule version à un seul endroit.
- les données sont uniformisées dans leur format, ainsi que dans la nomination des lieux et des heures d'acquisition.
- la facilité et la rapidité d'accès à l'information : par rapport à un ensemble de fichiers volumineux, une simple requête permet d'accéder au jeu de données qui correspond à nos besoins.

2.5.2 Le service web sécurisé

Il permet de stocker un certain nombre de données non relationnelles. C'est le cas par exemple des bandes vidéo obtenues par la caméra hélicoptérée, des images DAIS, ou encore d'éléments constitutifs du Modèle Numérique d'Élévation (MNE). Ce dernier fournit les éléments de la morphologie urbaine introduits dans SOLENE. Il a été élaboré au laboratoire de photogrammétrie de l'INSA (Institut National des Sciences Appliquées) de Strasbourg grâce au logiciel TIPHON qui permet de numériser des points dans les 3 dimensions à partir de méthode de photogrammétrie aérienne (Bernard, 2001). C'est par ce procédé que les bâtiments de l'agglomération ont été restitués et que nous disposons de la géométrie urbaine.

Les résultats obtenus lors de cette campagne sont exposés dans le chapitre suivant, en nous focalisant sur des périodes avec des conditions météorologiques favorables.

3- Résultats expérimentaux : présentation et commentaires

Les résultats présentés dans ce qui suit concernent les périodes d'observation intensives (27-28 juillet et 14 août). Ces périodes sont caractérisées par des ambiances météorologiques favorables: pour la première, des conditions radiatives optimales (nébulosité nulle, atmosphère très claire) à partir du 27/07 vers 15h ; pour la deuxième en dépit de petites formations nuageuses vers le milieu de journée résultant d'un retour d'Est ; par ailleurs des vents faibles (inférieurs à 2 ms^{-1}). Nous présentons successivement les mesures micro-météorologiques, les flux radiatif et d'énergie, les mesures de contrôle réalisées simultanément aux vols, ainsi qu'un bilan des acquisitions de télédétection

3.1 Mesures micro-météorologiques

Des mesures micro-météorologiques (température de l'air, humidité relative et vitesse du vent) ont été réalisées sur chacun des sites instrumentés lors de cette campagne. Nous présentons ici sommairement quelques résultats obtenus lors de la journée du 28 juillet.

3.1.1 Température de l'air

L'évolution de la température de l'air à différents niveaux dans le canyon urbain (Figure 3.1) montre que le gradient thermique est très faible (voire nul) une grande partie de la journée. La seule exception se produit entre 5 et 10 h avec la mise en place d'un gradient thermique positif. Il ne faut pas oublier qu'à ce moment de la journée les façades commencent à s'éclairer et à se réchauffer par le haut, en communiquant une partie de leur chaleur à l'air ambiant. Ce gradient thermique positif entraîne une forte stabilité de l'air dans le canyon à ce moment de la journée.

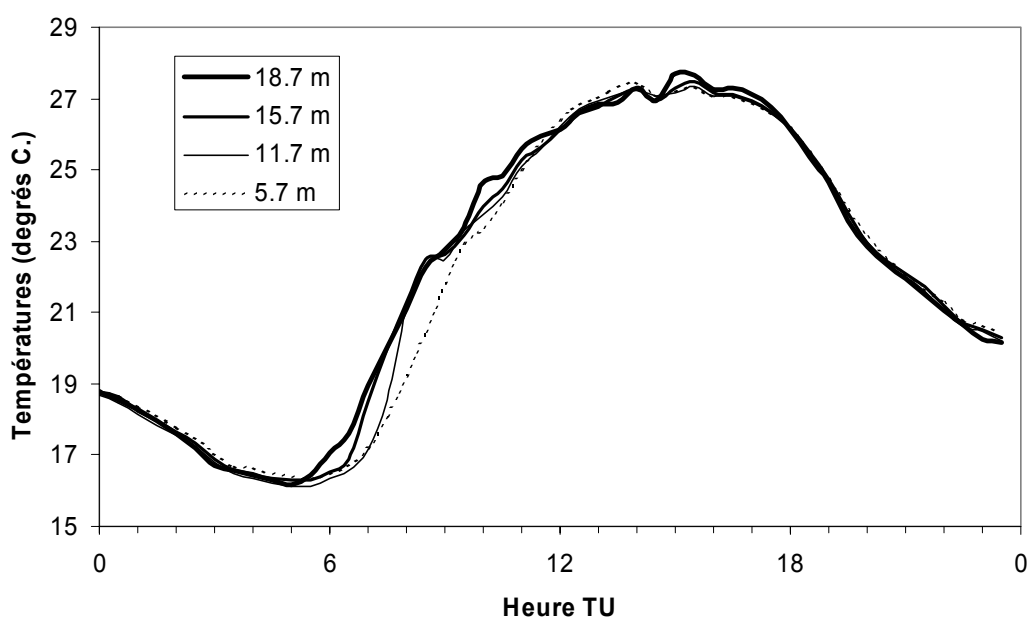


Figure 3.1 Température de l'air mesurée aux 4 niveaux de l'échafaudage (28/07/2002)

3.1.2 Tension de vapeur d'eau

Ce paramètre est obtenu à partir de l'humidité relative, qui est mesurée aux 4 niveaux de l'échafaudage, mais nous utilisons la tension de vapeur d'eau afin de supprimer la dépendance par rapport à la température de l'air.

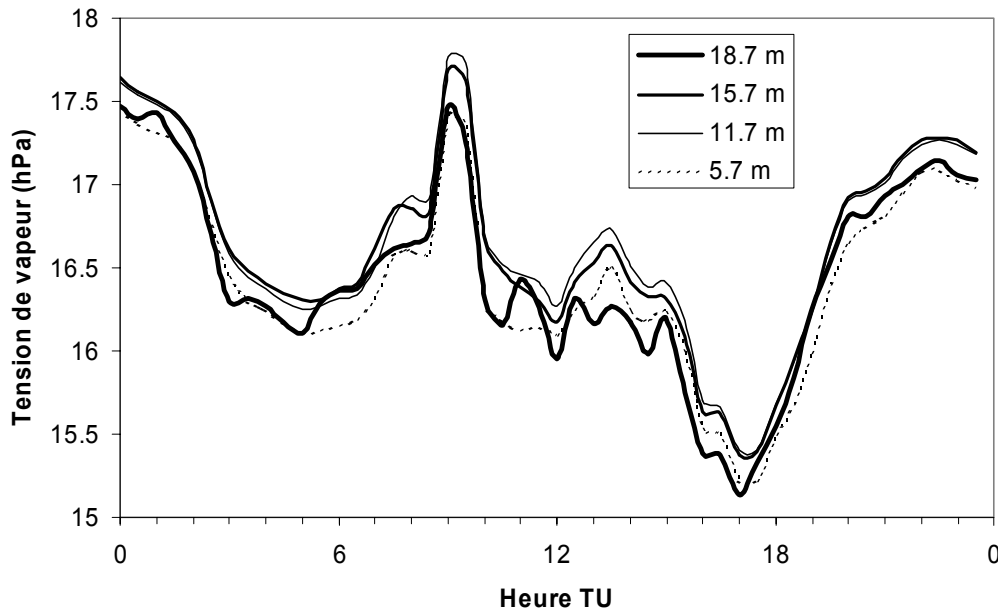


Figure 3.2 Tension de vapeur d'eau calculée pour les 4 niveaux de l'échafaudage (28/07/2002)

Tout comme pour les températures, la figure 3.2 suggère la quasi absence de gradient de vapeur d'eau dans le canyon urbain tout au long de la journée. En fin de nuit (de minuit à 5 h du matin), la diminution de la tension de vapeur d'eau dans l'air semble être liée à un phénomène de condensation. De 6 h à 10 h du matin la concentration de vapeur dans le canyon augmente pour deux raisons : d'abord par la reprise de l'évaporation de l'eau condensée par la végétation (plates-bandes au pied des immeubles) et ensuite par une absence d'échange entre le canyon et la couche limite urbaine du fait de la stabilité de l'air décrite sur la Figure 3.1. La baisse constatée de 10 à 17 h est sans doute à mettre à l'actif d'une reprise des échanges entre le canyon et la couche limite urbaine. Dès que les échanges avec la couche limite urbaine diminuent (à partir de 17 h), la tension de vapeur d'eau dans le canyon urbain augmente à nouveau (jusqu'à 22 h 30) puisque l'évapotranspiration se poursuit (cf. courbe du flux de chaleur latente de la Figure 3.16).

3.1.3 Vitesse du vent

Comme nous avons vu auparavant, les observations en climatologie urbaine doivent être réalisées par temps calme, avec une vitesse du vent inférieure à 3 m/s. Le graphe suivant (figure 3.3) prouve que le vent a été très faible au cours des périodes d'observation intenses, constamment inférieur au seuil des 3m/s, et la plupart du temps inférieur à 1 m/s.

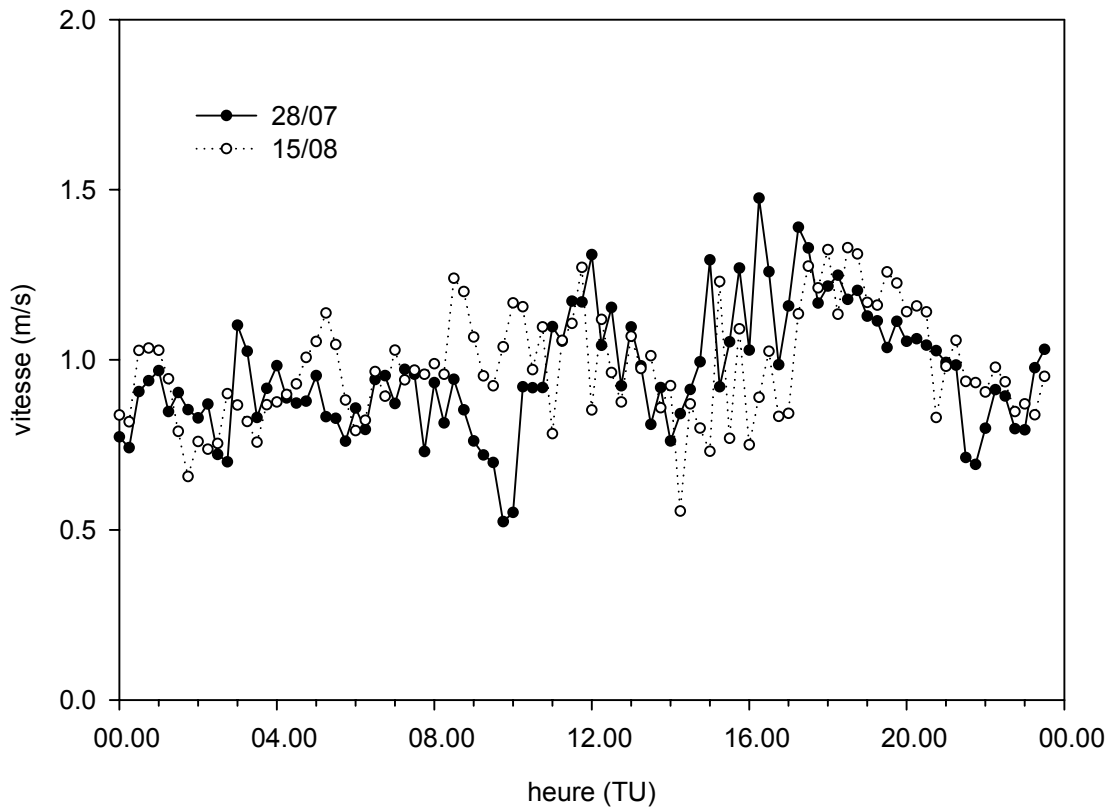


Figure 3.3 Vitesse du vent mesurée au 2^{ème} niveau de l'échafaudage lors des périodes d'observation intensive

3.2 Flux radiatifs

3.2.1 Le rayonnement solaire

3.2.1.1 Le rayonnement global incident

Le rayonnement qui arrive sur la scène que constitue la ville, sans subir d'interception par les masques occasionnés par la géométrie urbaine est mesuré sur le toit de l'IPCB. Le rayonnement global résulte de la somme de 2 composantes, le rayonnement solaire direct et le rayonnement solaire diffus. Le site de l'IPCB est le seul qui permette d'obtenir la part de chacune des deux composantes. Le rayonnement global subit de grandes variations en fonction du type de temps, et la période du 26 au 29 juillet constitue un excellent exemple (figure 3.4) :

- journées du 28 et du 29, où le ciel était parfaitement dégagé : la courbe de rayonnement suit une croissance et une décroissance régulière de type sinusoïdal entre le lever et le coucher du soleil, avec un maximum atteint lors du midi solaire, c'est à dire à 11h30 TU avec 857 W/m² pour la journée du 28. Le rayonnement diffus présente des valeurs faibles sur ces deux journées : il augmente après le lever du soleil, puis les valeurs restent très proches, suivant un palier jusqu'au coucher de soleil où elles diminuent à nouveau. A noter que les valeurs, de 69 le 28, augmentent jusqu'à 118 W/m² le 29, ce qui est probablement dû à la plus grande quantité de particules dans l'atmosphère après une journée de beau temps avec des

températures élevées. Ces deux journées mettent bien en évidence le fait que lors d'une belle journée, la plupart du rayonnement arrive essentiellement sous forme directe.

- la journée du 26 qui était perturbée laisse apparaître que la plupart du temps, le rayonnement sous forme diffuse constitue la totalité du rayonnement global, qui approche les 600 W/m^2 en milieu de journée.
- La journée du 27 était assez ensoleillée, mais de nombreux nuages cumuliformes se sont développés en milieu de matinée en raison de l'humidité des sols suite aux précipitations des journées précédentes. Ces nuages, qui se traduisent par des valeurs de rayonnement diffus élevées (jusqu'à 530 W/m^2), persistent jusqu'en début d'après midi.

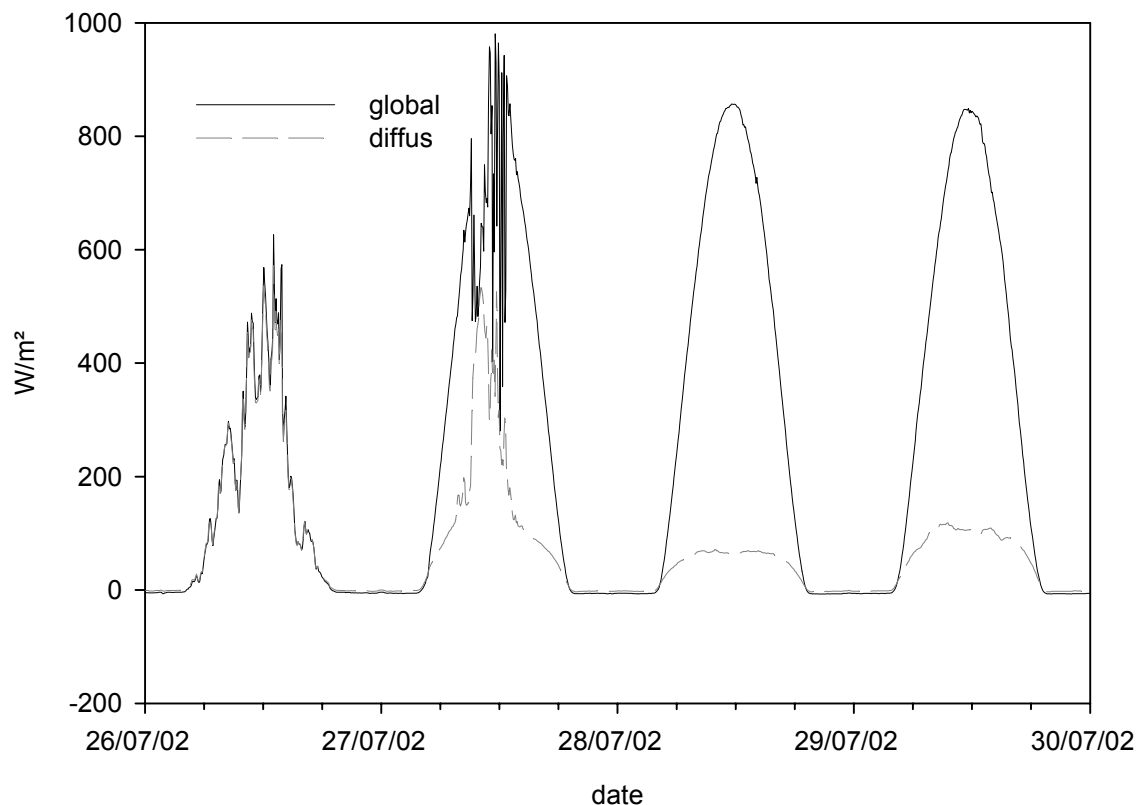


Figure 3.4 Rayonnement global et diffus mesurés sur le site de l'IPCB (26-29 juillet 2002)

Ces courbes donnent donc une bonne indication de la nébulosité, et démontrent que pour la journée du 27, les conditions ne sont idéales à la réalisation de mesures aériennes qu'à partir du début d'après midi. D'où un étalement des vols DAIS sur les journées du 27 pour le vol du soir, et du 28 pour ceux du matin et de midi.

Ces valeurs de rayonnement global nous permettent de comparer avec les valeurs obtenues sur le mat du PEGE et sur l'échafaudage de la rue de l'Argonne (figure 3.5) :

- dans le cas du PEGE, le capteur est placé au dessus du niveau des toits et n'est donc pas influencé par les ombres portées. La qualité des mesures est confirmée par la bonne superposition des courbes, à peine perturbée par un maximum de rayonnement légèrement plus élevé (environ 10 W/m^2) et légèrement décalé au PEGE par rapport à l'IPCB. Au delà de la précision de l'étalonnage des capteurs, on ne peut pas exclure que le capteur placé sur

un mât de 30 m puisse présenter un angle de 1 ou 2 degrés par rapport à l'horizontale, défaut qui pourrait expliquer ce décalage.

- pour le site de la rue de l'Argonne, le capteur se situe quelques mètres en dessous du niveau des toits, et les résultats ne peuvent être comparés à ceux mesurés sur le toit de l'IPCB que lorsque le soleil l'éclaire directement. A partir de ce moment, les valeurs se superposent parfaitement avec celles de l'IPCB, jusqu'à ce que le capteur passe à nouveau à l'ombre, et ne perçoive plus que du rayonnement sous forme diffuse ou réfléchi par les murs (figure 3.5). L'heure à laquelle le rayonnement solaire direct contribue à augmenter de manière significative le rayonnement global mesuré est fonction de l'orientation et la hauteur des bâtiments, ainsi que l'effet de masque qu'ils engendrent. Ainsi, plus un capteur est placé bas sur l'échafaudage, plus il subira un effet de masque important en restant plus longtemps à l'ombre (figure 3.5). Cela se répercute sur la stratification de l'air observée entre 5 et 10 heures dans le canyon (figure 3.1). En effet, le capteur placé à 5,7 m ne reçoit que du diffus le matin et le soir sauf entre 8h30 et 14h30 lorsque le soleil parvient à éclairer le fond du canyon, tandis que le capteur placé au sommet de l'échafaudage reçoit du direct entre 4h00 et 19h00. La durée du rayonnement direct mesuré au niveau le plus bas (5,7 m) représente donc la moitié de celle mesurée au niveau des toits. Lorsque les capteurs sont illuminés par le soleil, ils enregistrent la même quantité de rayonnement que celle mesurée au sommet du canyon, avec un maximum de 830W/m² qui correspond au midi solaire. La modélisation nous renseignera sur la part des deux composantes du rayonnement au long de la journée dans le canyon.

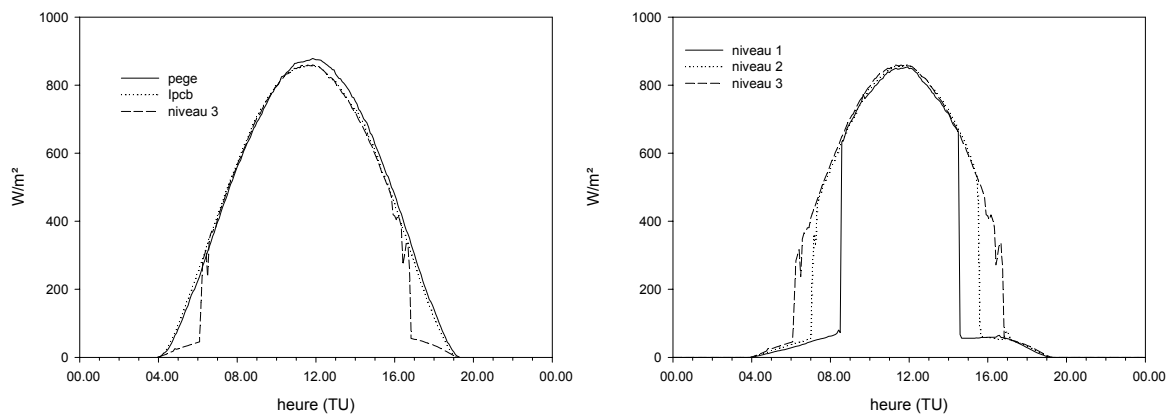


Figure 3.5 Rayonnement global mesuré sur 3 sites et à 3 niveaux de l'échafaudage de la rue de l'Argonne (28/07/2002)

3.2.1.2 Le rayonnement réfléchi mesuré horizontalement

La figure 3.6 représente le rayonnement réfléchi mesuré à 3 niveaux de l'échafaudage de la rue de l'Argonne. Le matin, entre 4 et 9 heures, le rayonnement réfléchi augmente des niveaux inférieurs (5,7 m) vers les niveaux supérieurs (15,7 m). En effet, les parties hautes de la façade orientée vers l'ESE (Est-Sud-Est) sont éclairées en premier, et réfléchissent de l'énergie qui ne pourra être détectée que par les capteurs placés suffisamment haut. En revanche, les parties basses encore à l'ombre ne reçoivent que du rayonnement diffus, et ne réfléchissent donc que très peu d'énergie.

La configuration en fin de journée (de 14 h à 19 h) est identique à celle du matin puisque, avec le soleil couchant, la base du canyon passe à l'ombre en premier tandis que les parties supérieures des façades orientées vers l'WNW (Ouest-Nord-Ouest) encore illuminées réfléchissent une part du rayonnement solaire reçu. Les parties hautes du canyon réfléchissent donc davantage.

En revanche, cette tendance est inversée en milieu de journée, entre 9 heures et 14 heures lorsque le fond du canyon est éclairé par le soleil qui se situe dans l'axe de la rue : le rayonnement réfléchi est

plus fort au niveau inférieur qu'aux niveaux supérieurs (de 115 W/m² à 5,7 m à 85 W/m² à 15,7 m). Cela pourrait s'expliquer par le fait que les capteurs placés plus haut ont un champ de vision plus vaste, intégrant ainsi plus de surfaces, notamment certaines moins réfléchissantes. C'est le cas des façades verticales, qui, du fait de l'angle d'incidence du rayonnement en reçoivent moins et donc en réfléchissent moins. En plus de cela, les réflexions multiples sur les bâtiments aboutissent à l'atténuation du rayonnement réfléchi et à l'absorption du rayonnement par les bâtiments : un capteur placé plus haut sera donc plus affecté par l'absorption d'une partie du rayonnement réfléchi par les parois. L'effet de piège contribue donc à diminuer le rayonnement réfléchi à mesure que l'on s'élève dans le canyon.

Ces tendances avaient déjà été constatées lors de la campagne de 1999 (Fischer, 2001), pendant laquelle les mesures avaient été effectuées à différentes hauteurs dans trois rues, mettant en évidence que plus le rapport H/W est faible, plus le rayonnement réfléchi est atténué.

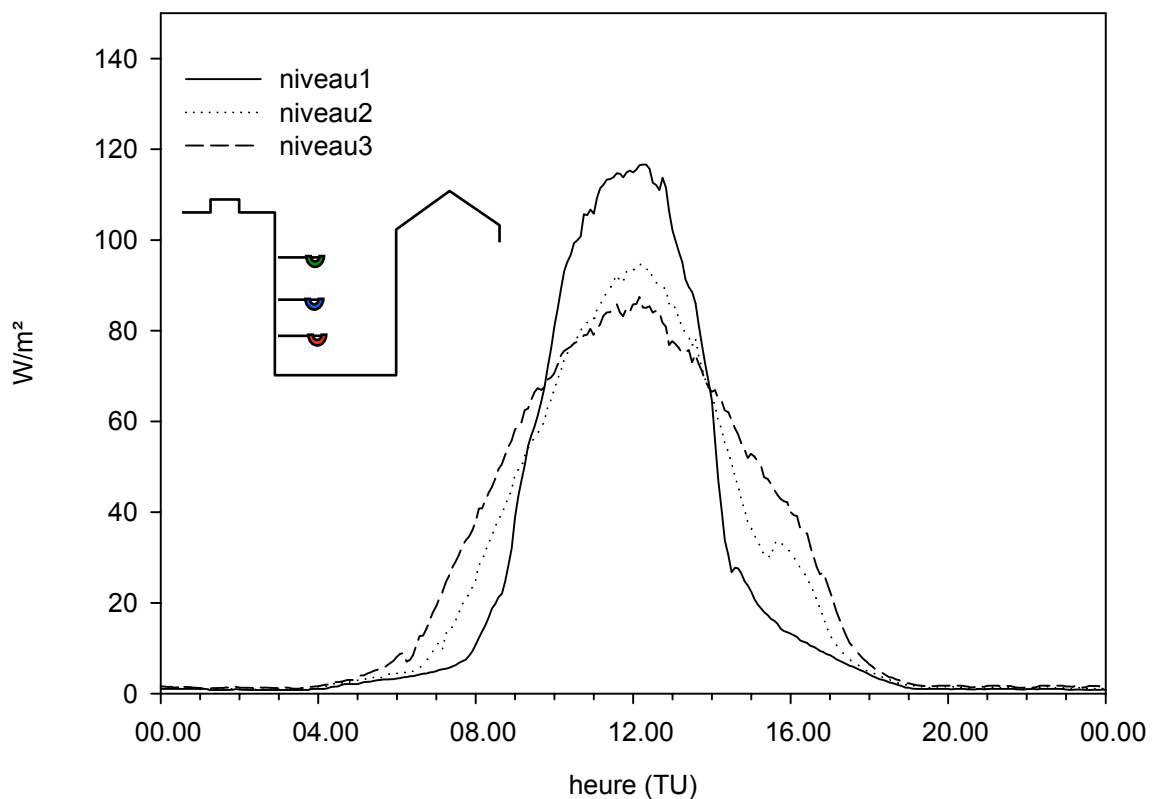


Figure 3.6 Comparaison du rayonnement réfléchi à 3 niveaux de l'échafaudage (28/07/2002)

3.2.1.3 Le rayonnement réfléchi mesuré verticalement

La figure 3.7 représente le rayonnement solaire global mesuré par un albédomètre placé parallèlement aux façades, à 6 mètres de celle orientée vers l'est. Les deux faces du capteur mesurent la fraction réfléchie du rayonnement global reçu par chacune des deux façades du canyon. On distingue alors :

- la face du capteur qui regarde vers l'ESE. Elle est d'abord à l'ombre entre le lever et 6 h 45 (le soleil est masqué par les bâtiments) : l'énergie reçue provient uniquement du rayonnement diffus. Lorsque le soleil est suffisamment haut pour éclairer le capteur, la quantité d'énergie reçue augmente brutalement (diffus + direct). Puis elle diminue lentement jusqu'à 13h lorsque

le capteur repasse à l'ombre. De 13 h à 19 h l'énergie provient du rayonnement diffus et réfléchi. Cependant, nous pouvons remarquer que le rayonnement global augmente légèrement entre 14 h et 16 h. Ceci est dû à une réflexion qui correspond au maximum d'énergie reçue par le mur d'en face. En effet, à ce moment de la journée, la façade opposée à l'échafaudage est éclairée par le soleil et reçoit une grande quantité d'énergie dont une partie sera réfléchie.

- La courbe relative à la face du capteur visant vers l'WNW s'interprète de façon identique. Le capteur reçoit du rayonnement diffus entre le lever du soleil et 13 h, avec en milieu de matinée, une part de rayonnement réfléchi par le mur orienté vers l'est qui, comme nous venons de le voir reçoit de l'énergie solaire directe à ce moment. Il apparaît clairement sur le graphe (figure 3.7) que le pic matinal d'énergie reçue par le capteur qui regarde vers l'est coïncide avec le moment où le capteur orienté vers l'ouest, et par conséquent la façade orientée dans cette direction reçoit le plus d'énergie. Il enregistre ensuite l'arrivée de rayonnement solaire direct pendant 2 h 30. Ce capteur reçoit moins longtemps de l'énergie sous forme directe que le précédent en raison de la distance qui le sépare de la façade visée, à savoir 6 mètres contre 15 pour celui qui vise la façade orientée vers l'ouest. Il restera donc plus longtemps à l'ombre de cette façade.

La dissymétrie entre les courbes est donc due à la fois à la géométrie du canyon qui agit sur le rayonnement direct mais aussi à la nature des matériaux des façades qui influence la quantité de rayonnement réfléchi reçue par les capteurs.

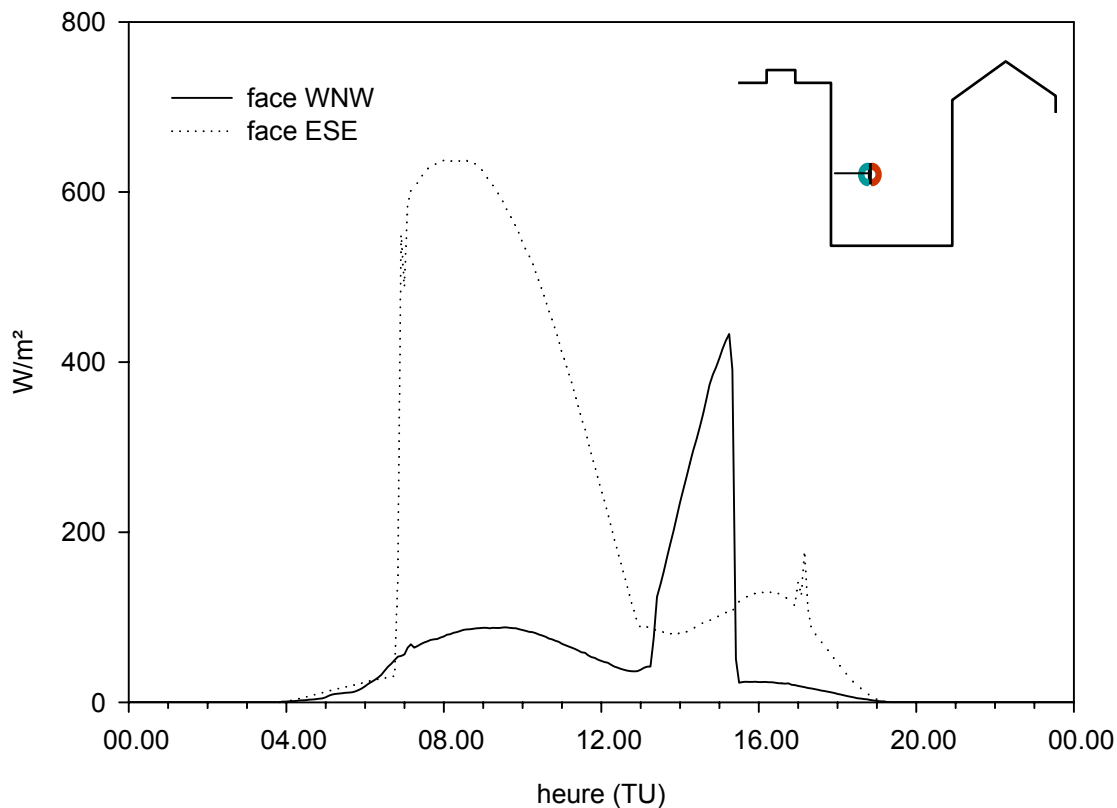


Figure 3.7 Rayonnement incident mesuré parallèlement aux façades (28 juillet, niveau 2)

3.2.1.4 Estimations d'albédo

Nous disposons à présent des composantes nécessaires à la détermination d'un albédo, puisque celui-ci correspond au rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement incident. L'opération est effectuée pendant la période où la surface considérée reçoit le maximum d'énergie solaire directe. Nous avons ainsi déterminé un albédo pour différents sites (figure 3.8) :

- dans le cas du canyon, nous avons vu auparavant que le rayonnement global incident était le même à chaque niveau à partir du moment où le capteur était au soleil, tandis que le rayonnement réfléchi diminuait à mesure que l'on s'élevait : cela se répercute donc logiquement sur les valeurs d'albédo, qui passent de 0,14 au premier niveau (au moment où celui-ci reçoit le maximum d'énergie solaire directe) à 0,09 au sommet du canyon.
- Pour les façades verticales de la rue de l'Argonne, l'albédo est obtenu grâce au rapport entre les mesures de la face « à l'ombre » et celle « au soleil » de l'albédomètre disposé parallèlement aux façades au niveau 2. La face « au soleil » traduit donc le rayonnement global incident sur la façade orientée dans la même direction tandis que la face « à l'ombre » enregistre le rayonnement réfléchi par cette façade. L'albédo du bâtiment de la Faculté de Géographie est ainsi obtenu en milieu de matinée, lorsque celle-ci reçoit un maximum d'énergie : il est de 0,16. Pour la façade opposée, il est obtenu en milieu d'après midi, et est plus élevé, avec une valeur de 0,25.
- au sommet des mâts du PEGE et de l'IPG, soit à l'échelle du quartier. Le rapport entre rayonnement réfléchi et incident nous donne un albédo de 0,13 pour le site de l'IPG contre 0,09 pour celui du PEGE, ce qui correspond à la valeur obtenue au sommet du canyon de la rue de l'Argonne. Bien que le rapport H/W ne soit pas le même que pour la rue de l'Argonne, cela nous indique que le site du PEGE se comporte comme un canyon, ce qui confirme qu'à partir d'un certain degré d'intégration, les valeurs d'albédo obtenues en milieu urbain semblent s'homogénéiser. La valeur plus élevée obtenue sur le site de l'IPG s'explique probablement par l'environnement du capteur où le pourcentage des surfaces végétalisées est plus important, contribuant ainsi à augmenter l'albédo.

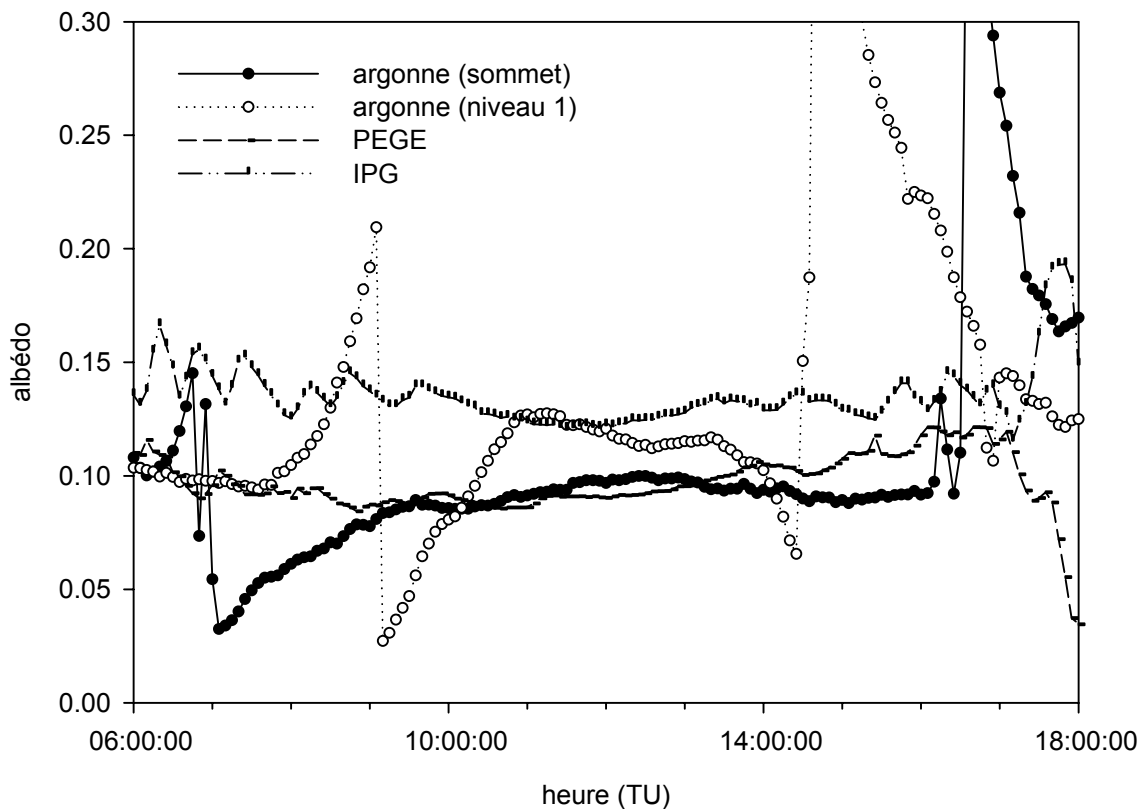


Figure 3.8 Albédos calculés à partir des mesures

3.2.2 Le rayonnement infrarouge

Sur le toit de l'IPCB, le rayonnement atmosphérique descendant par temps clair baisse jusqu'à 320W/m^2 en fin de nuit (le 28/07) alors qu'il dépasse les 370W/m^2 en début d'après midi (figure 3.9). Les valeurs sont encore plus élevées pour la journée du 29, où ce rayonnement atteint les 390W/m^2 . Cette journée se situe après une journée de temps beau et chaud, favorable à une augmentation de polluants dans l'atmosphère, ce qui explique vraisemblablement un rayonnement atmosphérique plus élevé pour la journée du 29. Par ciel couvert, du fait de l'émission et de la réflexion du rayonnement par les nuages, le rayonnement atmosphérique présente des valeurs plus élevées, surtout la nuit comme nous pouvons le constater pour la journée du 26, où les valeurs sont proches de 350W/m^2 la nuit, pour grimper jusqu'au dessus de 400W/m^2 et s'y maintenir tout au long de l'après midi. Que ce soit par temps clair ou couvert, il apparaît clairement que ce terme alimentant le bilan radiatif présente bien moins de fluctuations que le rayonnement global.

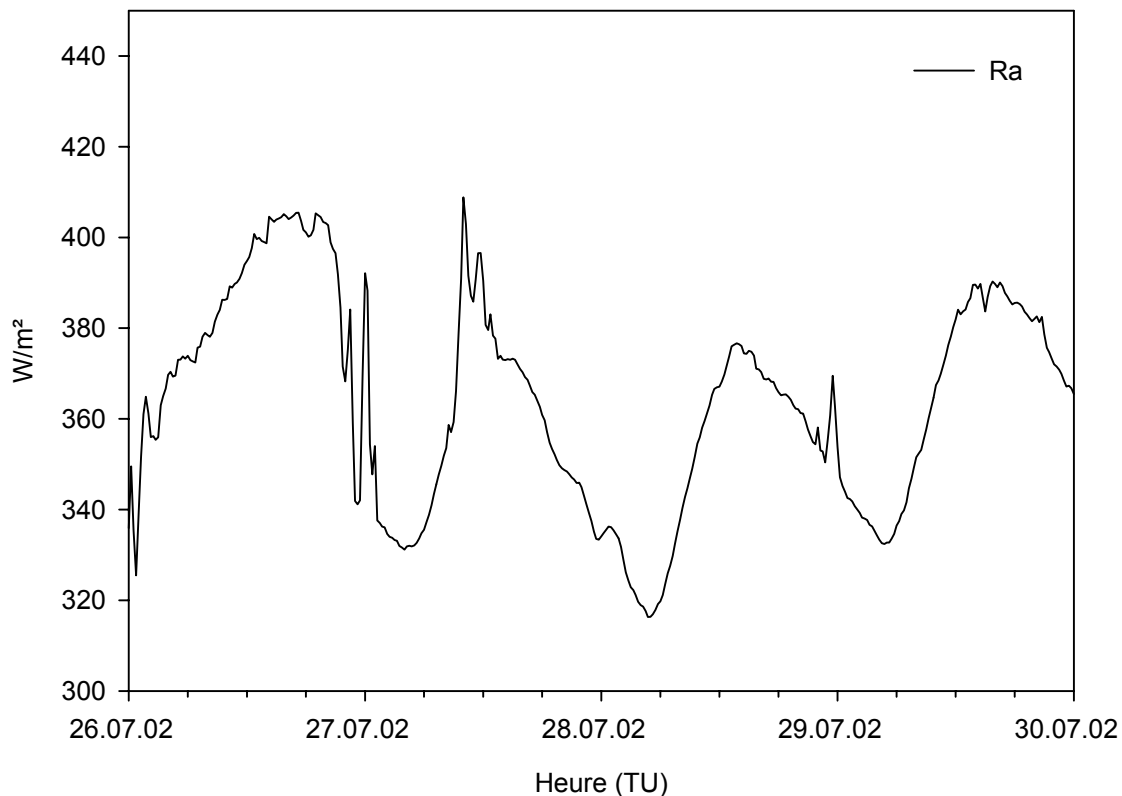


Figure 3.9 Rayonnement atmosphérique (IR) mesuré sur le site de l'IPCB

3.2.2.1 Echelle du canyon

La figure 3.10 représente le rayonnement infrarouge atmosphérique (descendant, noté IN), ainsi que le rayonnement terrestre (ascendant, noté OUT) mesurés à différents niveau du canyon.

- pour le rayonnement infrarouge descendant (IN) on observe un parallélisme presque parfait entre celui mesuré sur le toit et ceux mesurés dans le canyon. La seule différence vient du fait que l'infrarouge incident au sommet est inférieur de $30 Wm^{-2}$ à celui dans le canyon. Cette différence est certainement due au fait que l'infrarouge incident mesuré au sommet du canyon provient essentiellement de l'atmosphère, alors que les capteurs placés dans le canyon intègrent une quantité non négligeable d'infrarouge en provenance des façades, en raison des émissions multiples de rayonnement par celles ci. Cette part sera plus importante à mesure que l'on se place plus bas dans le canyon et qu'une plus grande surface de façades est prise en compte.
- les courbes de l'infrarouge ascendant (OUT) présentent des écarts très faibles la nuit. Cependant, en journée, lorsque le canyon reçoit le plus de rayonnement global, l'infrarouge émis par la surface visée au niveau 1 est nettement supérieur à celui mesuré à partir des parties hautes. En effet, il est fortement influencé par la température de surface du sol (asphalte), alors que les capteurs placés plus haut intègrent une plus grande part de façades plus fraîches. Par ailleurs, une partie du rayonnement émis par la base du canyon est absorbée suite aux réflexions multiples contre les façades, et ne parvient donc pas jusqu'aux capteurs placés plus haut. Cela a pour conséquence d'obtenir un rayonnement émis par les toits plus important que par le canyon en journée. L'inverse se produit la nuit puisque les toits se refroidissent plus vite

que le canyon qui restitue l'énergie absorbée en journée à partir d'une surface émettrice plus importante (Fischer, 2001).

En faisant le bilan de l'infrarouge entre le rayonnement atmosphérique incident et le rayonnement émis par la surface, on s'aperçoit que celui-ci est négatif puisque ce qui sort du canyon est à toute heure et à tout niveau supérieur à ce qui y rentre. Le déficit est le plus marqué en milieu de journée, lorsque les surfaces, recevant le rayonnement direct, sont les plus chaudes.

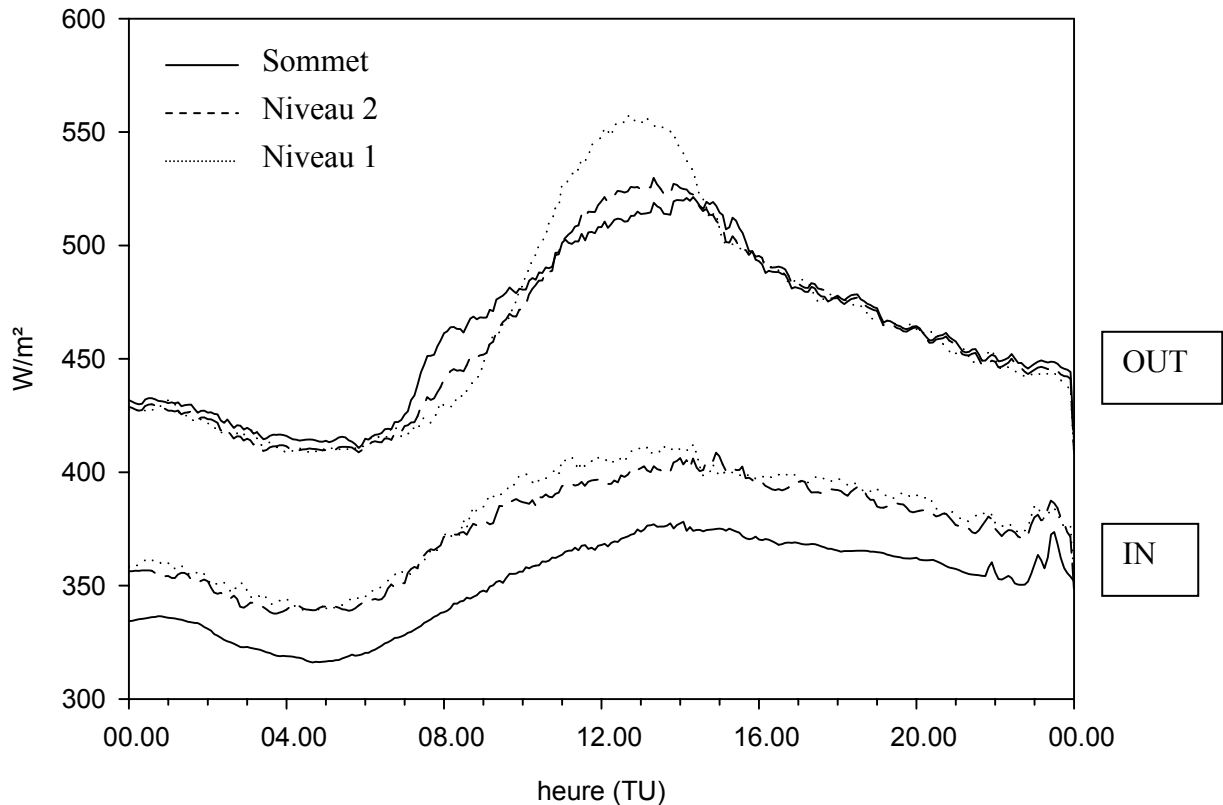


Figure 3.10 Infrarouge incident (IN) et émis et réfléchi (OUT) par la surface à différents niveaux de l'échafaudage

Des pyrgéomètres ont également été disposés parallèlement aux murs, aux premier et deuxième niveaux de l'échafaudage (figure 3.11), de manière à recevoir le rayonnement émis par le mur orienté vers l'ESE (façade de la faculté de Géographie). Le rayonnement mesuré aux deux niveaux présente des valeurs voisines, à l'exception du milieu de matinée où le rayonnement émis augmente plus rapidement au deuxième niveau, qui commence à recevoir du rayonnement solaire direct, tandis que les parties plus basses de la façade sont encore à l'ombre.

Pendant la nuit, les courbes de rayonnement émis par la façade se superposent parfaitement à celle du rayonnement émis par la rue. Par contre, des différences interviennent en journée. Le pic correspondant à l'heure où la façade émet le maximum d'énergie intervient plus tôt que pour la rue, puisque cette façade, orientée vers l'ESE, reçoit le rayonnement solaire direct avant que le fond du canyon ne soit ensoleillé. Mais ce pic présente des valeurs plus faibles que celui de la rue pour différentes raisons :

- l'albédo plus élevé pour les matériaux des façades que pour l'asphalte, comme nous avons pu le voir auparavant.
- un angle d'incidence défavorable qui fait qu'une même quantité d'énergie est répartie sur une plus grande surface que si elle arrivait sur une surface horizontale comme le fond du canyon

Il apparaît ainsi que dans la rue, les aspects solaires sont essentiels à considérer.

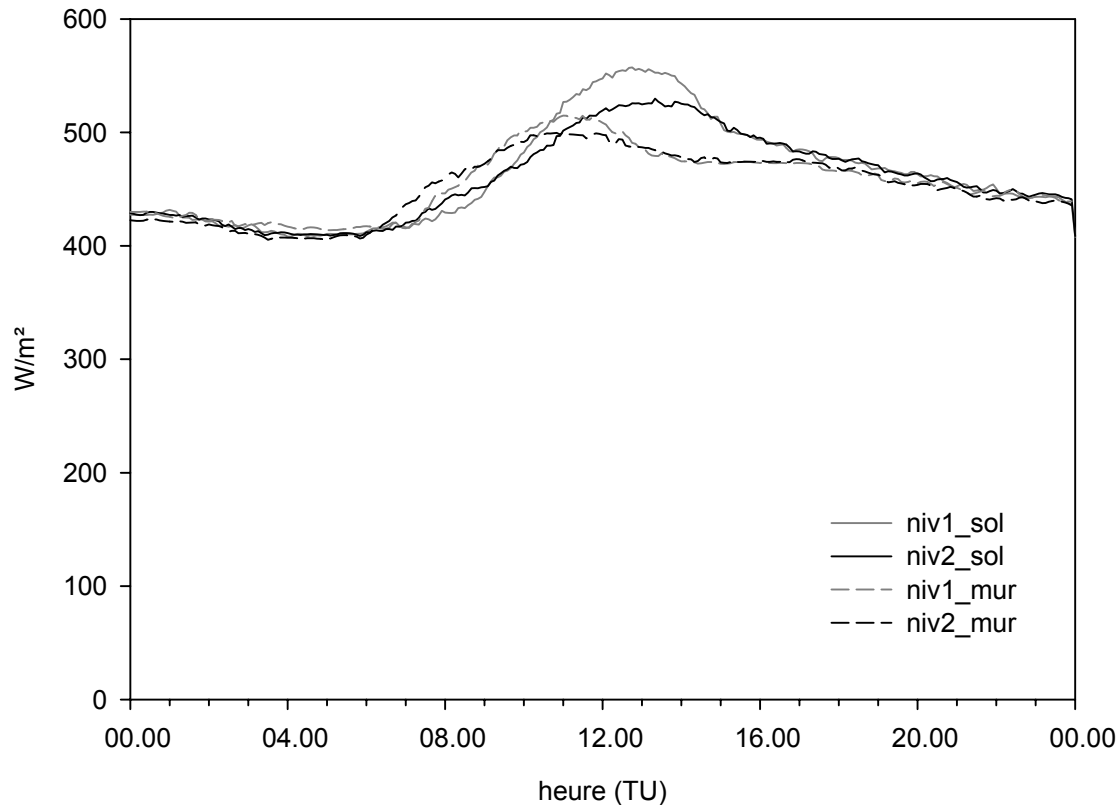


Figure 3.11 Comparaison du rayonnement émis par la base du canyon et par le mur orienté ESE aux 2 premiers niveaux de l'échafaudage

3.2.2.2 Echelle du fragment urbain.

La comparaison du rayonnement infrarouge émis au dessus de la rue de l'Argonne, de l'IPG et du site du PEGE nous donne des écarts significatifs (figure 3.12). Notons que si pour la rue de l'Argonne, ce terme est mesuré directement, il est déduit des autres termes du bilan radiatif pour les sites du PEGE et de l'IPG, où seuls le rayonnement net, ainsi que le global incident et réfléchi sont mesurés, tandis que pour le rayonnement atmosphérique, on considère qu'il est égal à celui mesuré sur le site de référence de l'IPCB, étant donné l'absence de masque. En journée, les valeurs sont nettement plus importantes au niveau des sites du PEGE et de l'IPG (autour de 550 contre 480 W/m^2 rue de l'Argonne). Sans même tenir compte des caractéristiques thermiques des matériaux de construction utilisés sur les 3 sites, plusieurs facteurs semblent pouvoir expliquer cet écart. Il convient tout d'abord de préciser que le capteur situé au sommet de la rue de l'Argonne n'intègre que les murs et le fond du canyon, mais pas les toits contrairement à ceux situés sur les mâts du PEGE et de l'IPG. Or, les toits reçoivent beaucoup d'énergie qu'ils émettent sous forme de flux infrarouge.

De plus, les 3 sites ne présentent pas le même rapport H/W : de 0,9 pour la rue de l'Argonne, il est inférieur à 0,5 pour la cour du PEGE, tandis que le bâti est encore plus lâche autour de l'IPG. Les capteurs placés au dessus des sites du PEGE et de l'IPG intègrent donc moins de façades, plus fraîches que le fond du canyon ou les toits, que celui placé au dessus de la rue. Cela entraîne également une quantité d'énergie absorbée suite aux réflexions multiples plus faible sur les sites du PEGE et de l'IPG où l'énergie émise par la surface parvient plus facilement au capteur.

Enfin, bien que le PEGE et l'IPG présentent des courbes similaires, il apparaît que le maximum d'émission intervient plus tôt dans la journée pour le site du PEGE. Ce décalage est difficile à interpréter. On peut avancer l'hypothèse qu'il tiendrait à la configuration du site du PEGE, dont la cour présente une ouverture vers l'est, permettant au soleil d'éclairer une grande partie du site dès le début de la matinée. Ainsi, la plupart des façades intérieures du PEGE reçoivent de l'éclairage solaire sous forme directe.

Au cours de la nuit, les trois sites présentent un rayonnement émis similaire, entre 410 et 430 W/m², avec des valeurs légèrement plus élevées au dessus du site de l'IPG.

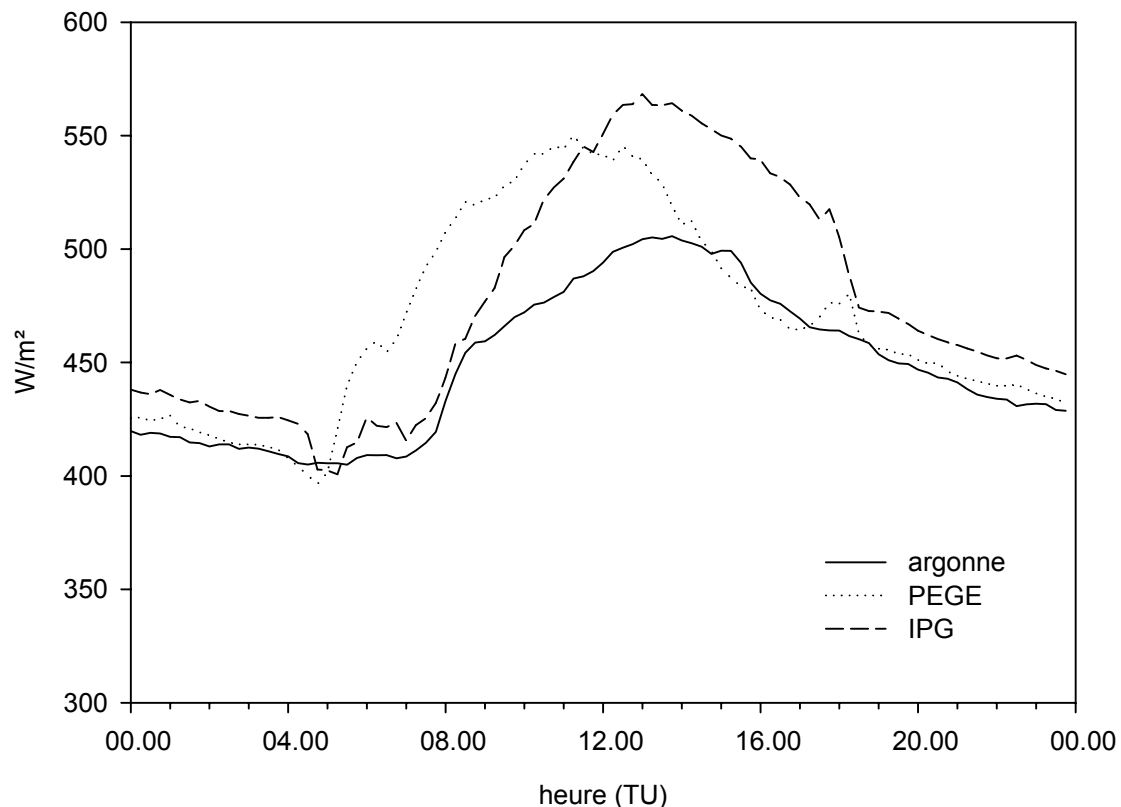


Figure 3.12 Rayonnement émis au dessus de différents sites (15/08/2002)

3.2.3 Le rayonnement net

Il constitue la somme des entrées et sorties du rayonnement dans les domaines du visible et de l'infrarouge. La Figure 3.13 présente le rayonnement net obtenu à l'échelle du canyon (sommet de la rue de l'Argonne) et du quartier (PEGE et IPG). Dans le cas des quartiers, il a été mesuré directement au sommet d'un mât, alors que pour le canyon, il a été calculé à partir des autres termes du bilan radiatif mesurés au sommet de la rue de l'Argonne. Précisons que des corrections ont été appliquées aux données de rayonnement net mesurées sur le sommet des mâts afin de corriger l'influence du rayonnement global sur le capteur utilisé.

Si le rayonnement net mesuré au dessus des deux quartiers présente des valeurs similaires, il apparaît que la courbe du rayonnement net calculé au sommet de la rue de l'Argonne se démarque nettement. On y observe en milieu de journée un rayonnement net (600 Wm⁻²) supérieur à ceux mesurés au niveau des quartiers (540 Wm⁻²), alors que la nuit les trois peuvent être considérés comme identiques (entre -60 et -80 Wm⁻² d'un site à l'autre, avec les valeurs les plus élevées pour la rue de l'Argonne).

On retrouve ici l'influence de la plus grande perte d'infrarouge thermique pour les sites du PEGE et de l'IPG qui se répercute logiquement sur le rayonnement net. Comme le montrent la figure 3.14, représentant l'ensemble des termes du bilan radiatif mesurés respectivement au sommet de la rue de l'Argonne et au dessus du quartier du PEGE, les autres termes présentent des valeurs très proches. Cette comparaison en démontrant que le bilan radiatif mesuré au sommet d'un canyon diffère de celui mesuré à l'échelle du quartier nous confirme l'importance de mener des mesures à des échelles d'investigation différentes.

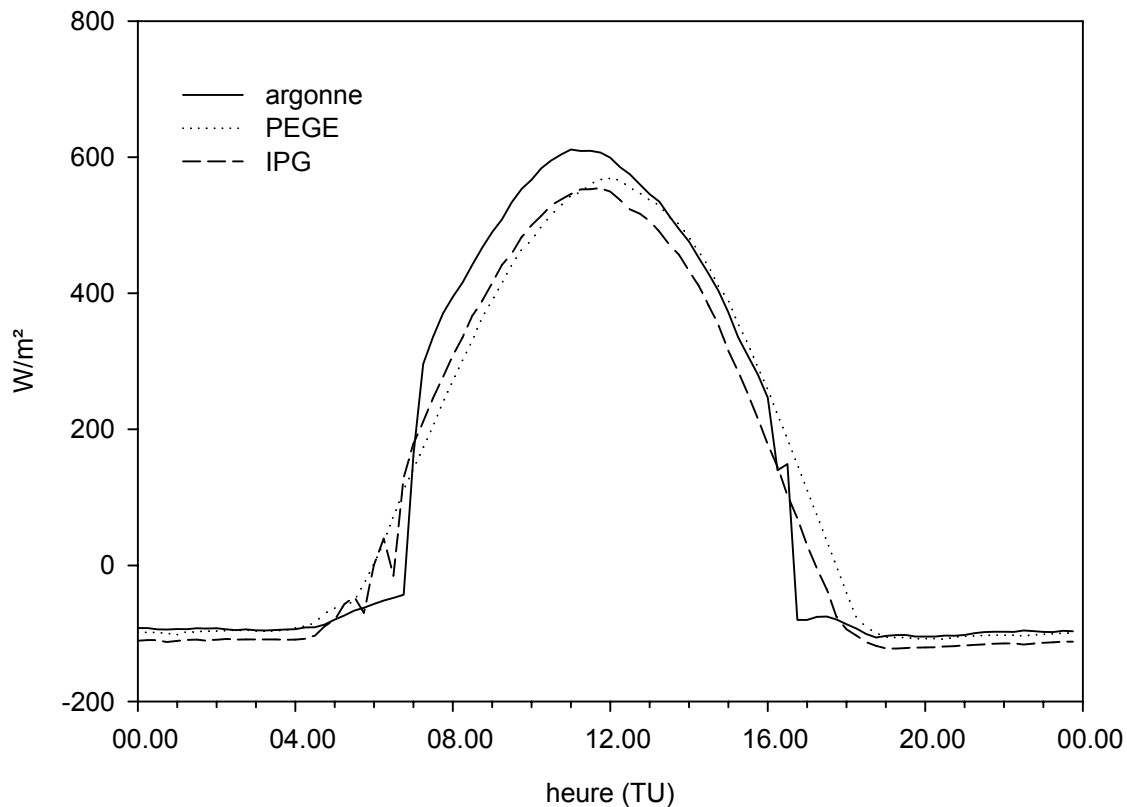


Figure 3.13 Rayonnement net mesuré au dessus de 3 sites (15/08/2002)

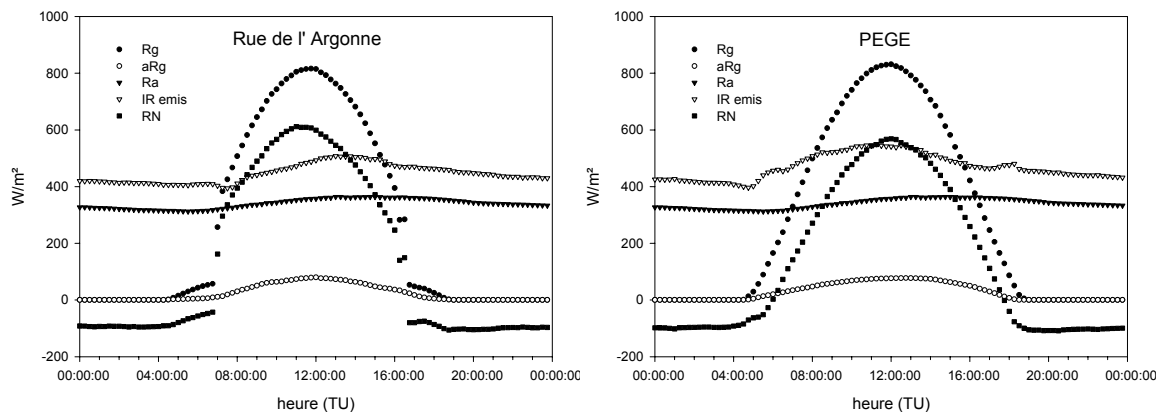


Figure 3.14 Bilan radiatif au sommet du canyon de la rue de l'Argonne et au dessus du site du PEGE

3.2.4 Les températures de brillance

La figure 3.15 montre l'évolution de la température de brillance du sol (asphalte) ainsi que celle de la façade orientée WNW (mur), mesurées à l'aide de radiomètres Everest. Pendant la nuit, la différence entre les courbes est faible, ce qui reflète un état proche de l'équilibre thermodynamique à l'intérieur du canyon. Pendant le jour, l'allure des courbes de la température de brillance de la rue et de la façade répond bien à l'évolution des conditions radiatives : au moment où ces surfaces sont éclairées par le rayonnement solaire direct, leur température de brillance augmente fortement et diminue dès qu'elles repassent à l'ombre. Ceci se traduit par une forte amplitude thermique journalière qui ne se voit pas sur la température de l'air. Ainsi, pour l'asphalte, la température passe de 17°C en fin de nuit à 48°C en début d'après midi. En journée, on peut observer trois phases sur cette courbe : jusqu'à 11 heures, où seul le rayonnement diffus pénètre dans le fond du canyon, la température de la rue croît très légèrement mais reste faible. Puis à partir de 11 heures et l'arrivée du rayonnement sous forme directe, elle va brusquement augmenter, gagnant près de 20°C en 1 heure, avant de continuer à croître lentement jusque 14h30, moment où la surface de la route repasse à l'ombre. Ce qui se traduit par une baisse immédiate de la température de l'asphalte, d'abord très marquée, avant de rejoindre progressivement la température de l'air.

La façade réagit de la même façon, avec cependant des contrastes moins marqués, en raison d'une quantité d'énergie plus faible apportée par le rayonnement solaire en fin d'après midi qu'à la mi-journée.

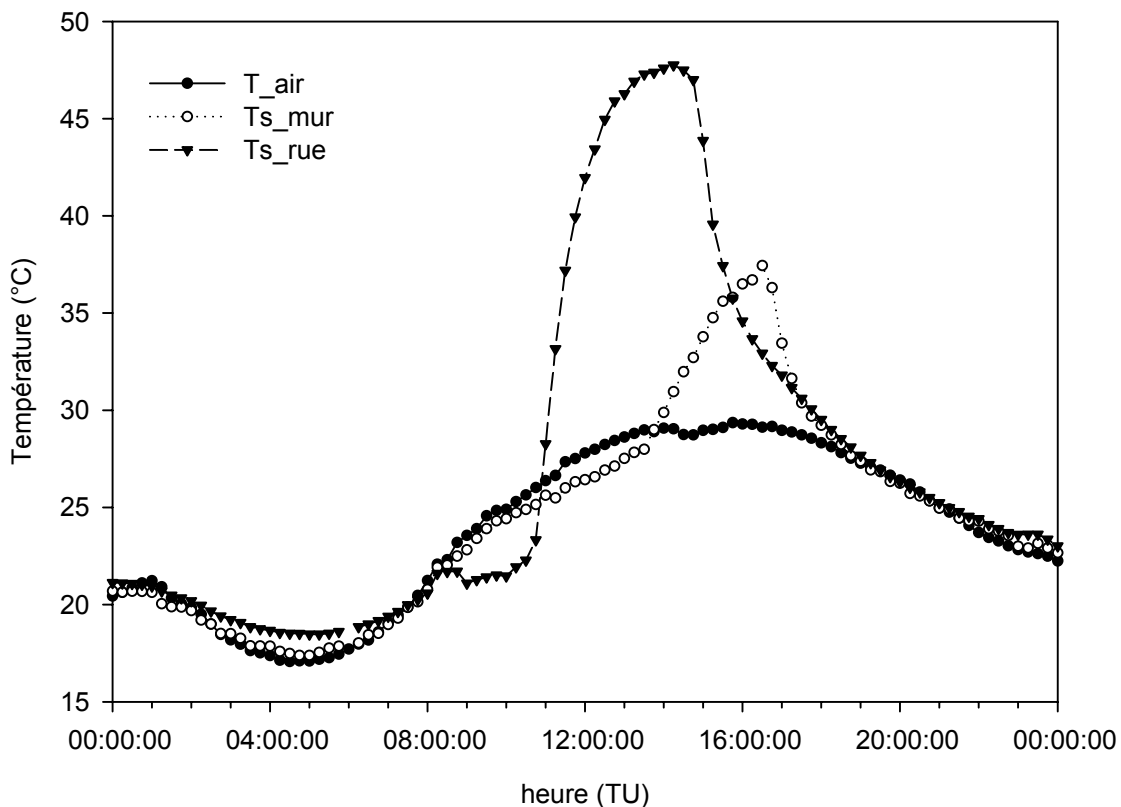


Figure 3.15 Comparaison entre la température de brillance de la rue, du mur orienté ESE et la température de l'air (28/07/2002)

3.3 Flux d'énergie

3.3.1 Rue de l'Argonne

Les flux de chaleur sensible et latente sont mesurés aux quatre niveaux de l'échafaudage de la rue de l'Argonne. Le traitement des données relatives aux trois premiers niveaux n'étant pas terminé, nous présenterons ici uniquement les données enregistrées au quatrième niveau. Nous rappelons que nous disposons également du rayonnement net (cf 3.2), calculé à partir de l'addition des termes du bilan radiatif. Ainsi, en considérant l'énergie anthropique comme négligeable, l'énergie stockée dans le sol et les bâtiments est déduite par différence: nous disposons alors de tous les termes du bilan d'énergie pour le sommet du canyon. Les résultats, présentés sur la figure 3.16 sont similaires à ceux obtenus dans les villes nord-américaines (Oke, 1982), avec :

- LE n'est pas négligeable, même s'il n'atteint pas des valeurs aussi élevées qu'au dessus de surfaces rurales. Le flux de chaleur latente est nul la nuit, puis commence à augmenter en cours de matinée, avant de se maintenir entre 60 et 80 W/m² entre 9 et 14 heures. Il s'agit de la période où le soleil éclaire la végétation se trouvant à coté de l'échafaudage. Cette présence de végétation peut expliquer des valeurs légèrement plus élevées que celles enregistrées lors de campagnes dans des villes d'Amérique du Nord, dans des canyons dépourvus de végétation.
- H présente également des valeurs les plus élevées en milieu de journée, lorsque les températures de surfaces et par conséquent leur écarts avec les température de l'air sont les plus élevées. Ce terme peut être estimé en moyenne à 220 W/m² entre 9 et 14 heures ce qui est comparable à ce qui est obtenu aussi bien dans les villes américaines que sur des surfaces rurales. Cela confirme donc que le flux de chaleur sensible n'est pas vraiment affecté par le passage d'un milieu rural à un milieu urbain, et ne peut donc être seul responsable de l'îlot de chaleur urbain. Comme LE, ce flux est quasiment nul la nuit.
- G est le terme du bilan d'énergie qui apparaît le plus élevé en journée. L'énergie stockée augmente fortement, parallèlement au rayonnement net en début de matinée, avant de se stabiliser autour de 300 W/m² entre 8 et 16 heures. Ce terme devient négatif la nuit, où il suit un palier autour de 100W/m², valeur attribuée habituellement à ce terme en milieu urbain (Mestayer, Anquetin, 1995). Il s'agit de la restitution de l'énergie absorbée pendant la journée, qui, étant bien plus importante qu'au dessus des surfaces rurales, contribue à la formation d'un îlot de chaleur urbain.

Les valeurs obtenues au quatrième niveau de l'échafaudage sont parfaitement en accord avec des valeurs considérées comme référence en milieu urbain. Elles confirment que H varie très peu dans une ville par rapport à la campagne, contrairement à LE et G.

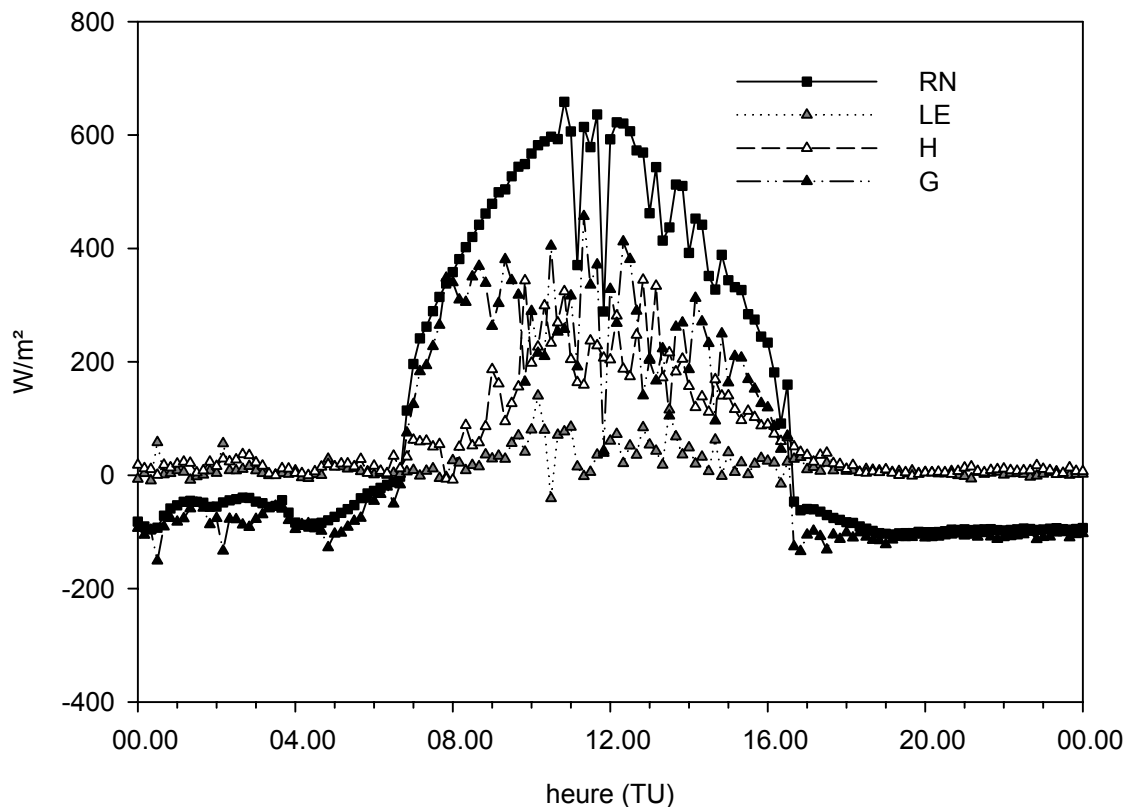


Figure 3.16 Bilan d'énergie réalisé au 4^{ème} niveau de l'échafaudage de la rue de l'Argonne (14/08)

3.3.2 Flux de chaleur sensible mesurés au PEGE et à l'IPG

En plus du rayonnement net, seul le flux de chaleur sensible est mesuré sur les mâts du PEGE et de l'IPG (figure 3.17). Ils apparaissent moins élevés que rue de l'Argonne, avec une moyenne de 170 W/m^2 en milieu de journée pour le PEGE et 150 W/m^2 pour l'IPG, contre 220 W/m^2 rue de l'Argonne. Ces variations peuvent s'expliquer par:

- l'emplacement du capteur: du fait de la hauteur du capteur, notamment par rapport aux toits, la mesure est, contrairement à la rue de l'Argonne, représentative du quartier. La moindre variabilité de H observée sur les sites du PEGE et de l'IPG par rapport à la rue de l'Argonne pourrait laisser à penser que la turbulence y est moins forte, et que le mélange a été effectué.
- Le fait que les capteurs utilisés pour mesurer H au sommet des mâts ne soient pas les mêmes que sur l'échafaudage de la rue de l'Argonne: une partie de l'écart constaté peut donc être imputé au capteur et constituer la marge d'incertitude expérimentale.

En revanche, les mesures PEGE et IPG se prêtent davantage à des comparaisons, puisque le même capteur est utilisé, et celui-ci est placé dans les deux cas au dessus du niveau des toits. Tout au long de la période retenue, et notamment par périodes de beau temps, caractérisées par des flux plus élevés, les flux mesurés sur le mat du PEGE sont plus élevés (figure 3.17).

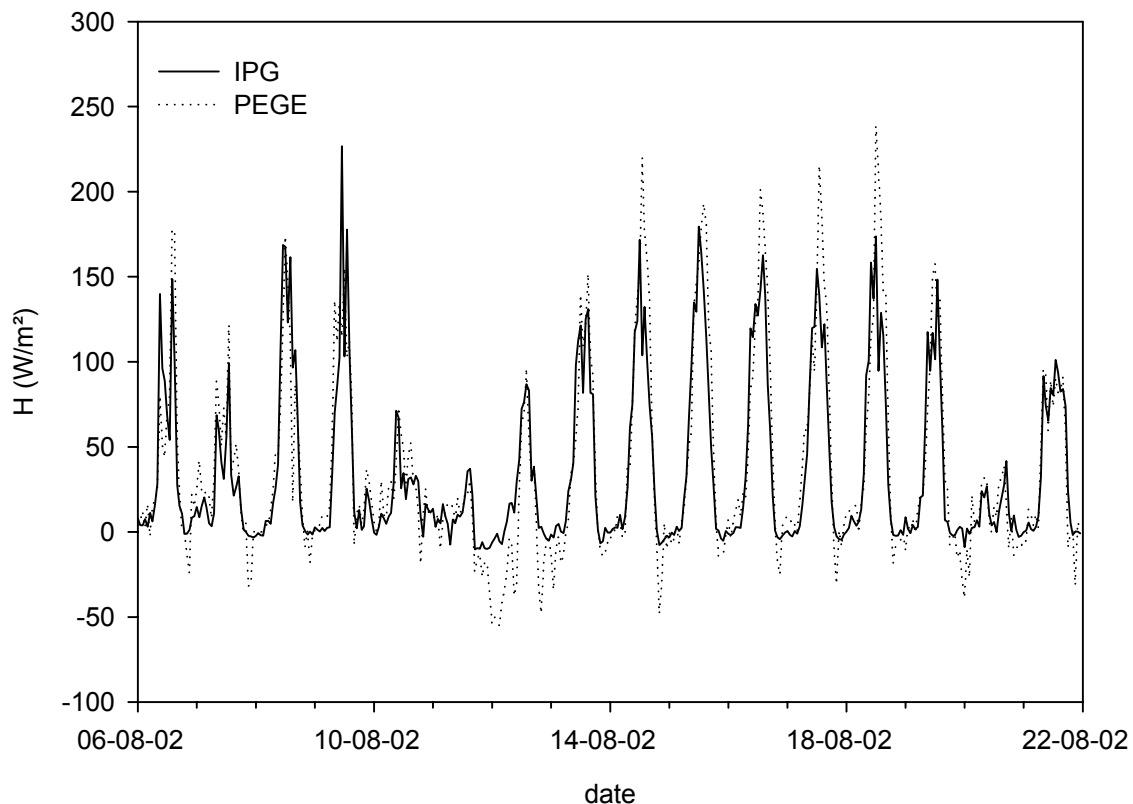


Figure 3.17 Variation du flux de chaleur sensible entre les 6 et 21 août sur les mâts du PEGE et de l'IPG.

3.4 Paramètres géophysiques : réflectances spectrales, albédo, température, émissivité

Les mesures suivantes correspondent à des mesures de contrôle réalisées au sol. Elles sont soit simultanées aux vols pour les paramètres comme la température de surface qui subissent de fortes fluctuations dans le temps, pour valider les acquisitions aéroportées ; soit réalisées indépendamment pour les paramètres plus « stables » dans le temps (albédo, émissivité).

3.4.1 Température de brillance

3.4.1.1 Température de l'eau

La figure 3.18 représente les enregistrements de température de brillance réalisés sur l'III parallèlement aux vols sur les journées des 27 et 28 juillet et du 14 août 2002. Rappelons que la fréquence d'acquisition des données n'est pas la même dans les 2 cas (cf 2.4.3.3). Il apparaît que tout au long de ces périodes de mesures, la température de l'eau est globalement stable dans le temps, On note cependant, lors des mesures simultanées au vol DAIS du matin, des valeurs initiales plus faibles, un petit maximum et une lente décroissance sur la durée de l'expérience : l'explication la plus vraisemblable est qu'il s'agit de valeurs enregistrées trop tôt après la mise en marche du capteur, celui-ci n'ayant pas encore eu le temps de se stabiliser. La solution adoptée est de prendre la valeur asymptotique mais cette donnée doit être considérée avec prudence.

Contrairement à ce qu'on pourrait imaginer, on ne constate guère d'augmentation significative de la température de l'eau dans la journée avec l'apport d'énergie solaire, et les températures mesurées d'une période de vol à une autre sont très proches.

Néanmoins, l'écart entre les courbes de températures mesurées lors des passages de l'avion est nettement plus conséquent que l'écart entre les courbes de température mesurées lors des survols de l'hélicoptère : cet écart atteint près de 1° entre le premier et le deuxième vol DAIS, contre à peine 0,2° entre les deux premiers survols de l'hélicoptère. Mise à part le fait que les mesures de contrôle des acquisitions réalisées avec l'avion s'étalent sur 2 journées, nous n'avons pas d'explication à fournir pour expliquer ces fluctuations plus importantes d'une période à l'autre.

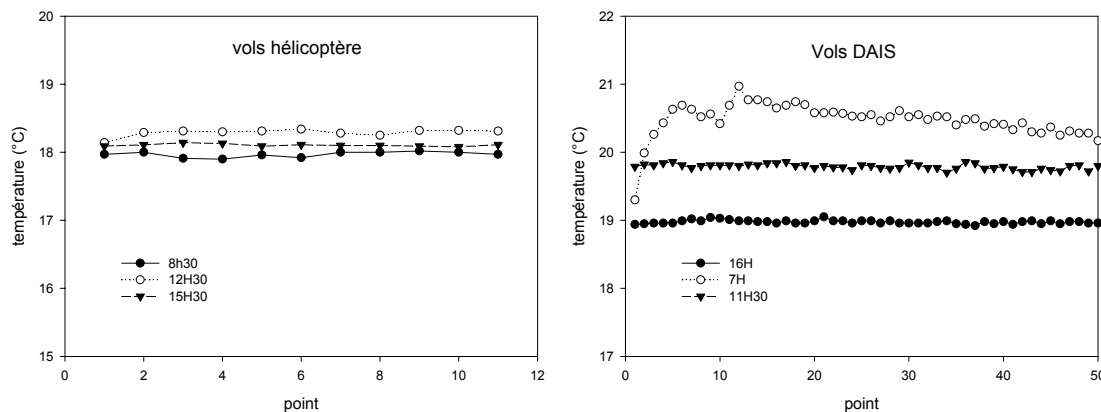


Figure 3.18 Température de brillance de l'eau : vols hélicoptères et vols DAIS

3.4.1.2 Température de l'asphalte (PEGE)

Les mesures réalisées à un pas de temps de 10 secondes pendant une courte période au moment des passages de l'hélicoptère ne mettent pas en évidence de variation significative de la température de surface (figure 3.19). En revanche, la dynamique de la température de surface dans la journée est parfaitement visible, avec une température de brillance voisine de 28°C en matinée (8h30) sur une surface qui commence à être éclairée, qui monte à près de 45°C au midi solaire, là où l'apport énergétique est le plus fort. Enfin, elle a commencé à diminuer dans l'après midi, pour avoisiner les 40°C au dernier passage de l'hélicoptère (15h30). Compte tenu de cette dynamique, il est essentiel que la comparaison des mesures de température soit en exacte coïncidence temporelle.

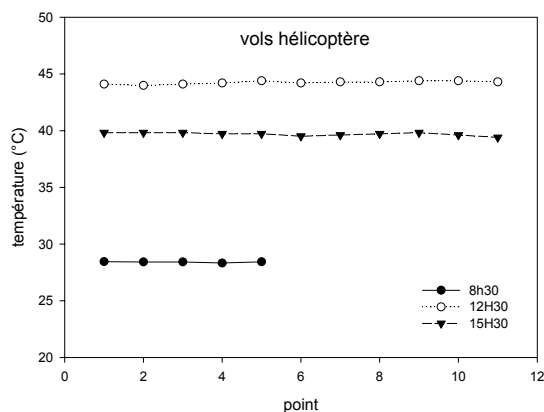


Figure 3.19 Températures de brillance mesurées dans la cour du PEGE lors des survols de l'hélicoptère

3.4.1.3 Parvis de la Faculté de Droit

Sur cette esplanade, des mesures sous forme de plusieurs transects perpendiculaires se sont succédées au moment des survols de l'avion. Pour chaque transect, la moyenne des températures de surface mesurées a été calculée de façon à obtenir une valeur représentative de la surface dans son ensemble. La figure 3.20 présente ces résultats, et fait clairement apparaître, à partir du troisième transect, le début de l'éclaircissement direct de la place pour les données recueillies le matin. Pour les mesures correspondant au midi solaire, une légère augmentation de la température est également visible, puisqu'en raison de l'inertie thermique des matériaux, ceux-ci continuent à s'échauffer quelques temps après que le rayonnement incident ait atteint sa valeur maximale. En revanche, on pourrait s'attendre, pour les mesures réalisées le soir, à une lente diminution de la température avec le temps, ce qui n'est pas visible, notamment en raison d'une première valeur étonnement basse (figure 3.20a). Il est possible que ceci traduit le fait qu'au cours de ce premier transect, des mesures ont été effectuées sur des portions partiellement ombragées de la place du fait de la présence de massifs d'arbustes en périphérie, et que ces portions ont été évitées par la suite.

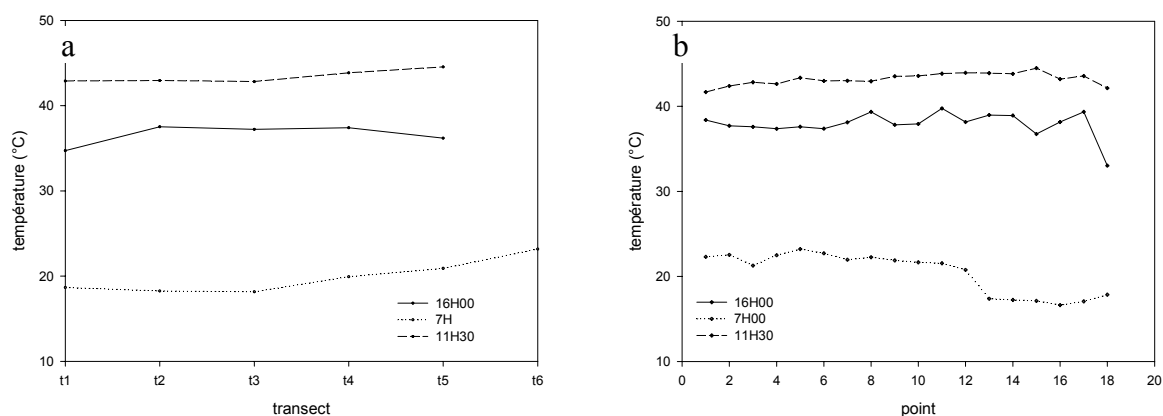


Figure 3.20 Températures de surface mesurées sur le parvis de la Faculté de Droit : a) moyenne calculée lors de chaque transect, b) transects réalisés au moment des survols

Concentrons nous à présent sur les transects réalisés à l'heure des survols de l'avion, dans l'optique de valider les températures de surface déduites des acquisitions aéroportées pour cette place. La figure 3.20b montre le détail des valeurs enregistrées au cours du transect concerné, qui correspond au troisième transect (figure 3.20a). Il apparaît que le transect réalisé à midi présente des mesures relativement homogènes, ce qui est également le cas, à un degré moindre de celui du soir. Les écarts types sont respectivement de 0,71 et de 1,46°C. Pour les mesures matinales, la situation est un peu plus délicate, puisque les premières mesures ont été réalisées sur des portions qui commençaient à être ensoleillées, et donc plus chaudes, alors que les dernières proviennent de parties encore ombragées. Des différences de température atteignant 5°C peuvent donc être observées sur la place à ce moment-là. Cela se répercute sur l'écart type de la série qui est de 2,42°C.

Pour toutes les mesures récoltées sur les différents sites au moment des survols, exceptées celles réalisées sur le parvis de la Faculté de Droit, la variabilité est très faible, et n'excède pas les marges d'erreur propre à l'instrument (bruit).

Etant donné l'incertitude sur le moment exact des survols, notamment de l'avion pas forcément visible depuis le sol, les valeurs de chaque série de mesures sont moyennées et les moyennes obtenues serviront de référence et de contrôle pour les résultats des traitements des acquisitions aéroportées. Les valeurs retenues sont listées dans le tableau suivant (tableau 3.1) :

vol	Moment de la journée	Température de brillance 1	Température de brillance 2
Avion (DAIS)	Matin (7h)	20,47 ±0,25	18,23 ± 2,42
	Midi (11h30)	19,79 ± 0,04	42,89 ± 0,71
	Soir (15h30)	18,98 ± 0,03	37,23 ± 1,46
Hélicoptère	Matin (8h30)	17,94 ± 0,04	28,41 ± 0,05
	Midi (11h30)	18,29 ± 0,05	44,16 ± 0,14
	Soir (15h)	18,08 ± 0,02	39,91 ± 0,27

Tableau 3.1 Température de brillance mesurées pendant les vols : températures de brillance 1 sur l'eau, et température de brillance 2 sur le parvis de la Faculté de Droit pour les vols DAIS et dans la cour du PEGE pour les survols hélico (TU)

Il apparaît que les mesures réalisées dans la cour du PEGE pendant les survols de l'hélicoptère et sur le parvis de la Faculté de Droit lors des passages de l'avion ont logiquement une plus forte amplitude. Bien que les dates du survol, et par conséquent les conditions atmosphériques ne soient pas les mêmes, les valeurs obtenues sont comparables dans les deux cas, à l'exception du matin, puisque le survol en hélicoptère est intervenu plus tard et que la surface a eu le temps de s'échauffer un peu.

3.4.2 Réflectances

En examinant les courbes de réflectance obtenues pour chaque point lors des transects E-W correspondant à l'heure des vols (figure 3.21), on remarque que la forme générale de la courbe est respectée, mais qu'une certaine variabilité spatiale est mise en évidence. Cependant, elle n'excède jamais 0,05, que ce soit pour le transect réalisé au passage de l'avion le matin, à midi ou le soir. Précisons que 3 fenêtres apparaissent, liées à l'absorption par l'atmosphère, où le signal est perturbé par le bruit (après 1,3µm, après 1,8 µm, et aux alentours de 2,4 µm), elles seront supprimées par la suite.

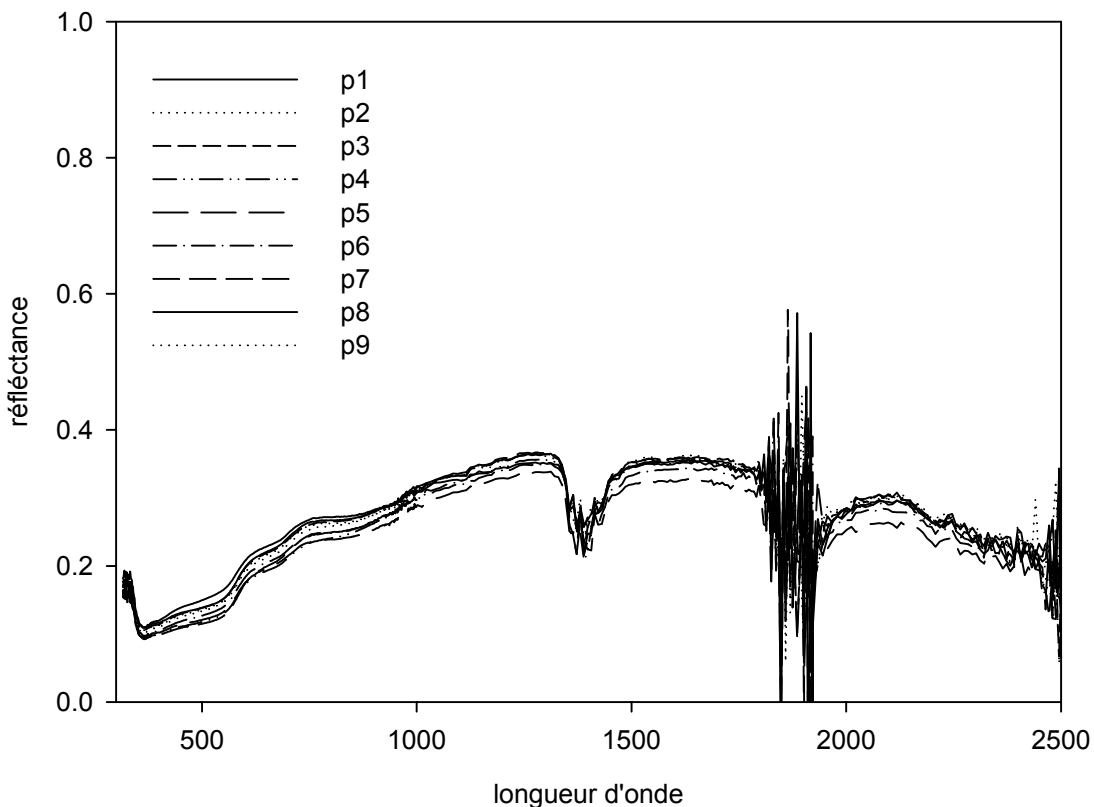


Figure 3.21 Réflectances mesurées en différents points du parvis de la Faculté de Droit

Afin d'obtenir une réflectance spectrale caractéristique du parvis de la Faculté de Droit, et de pouvoir la mettre en relation avec ce qui sera extrait des images aériennes, nous avons calculé la moyenne des signatures spectrales de réflectance obtenues au cours de chaque transect, ainsi que l'écart type correspondant.

Il apparaît que les signatures spectrales moyennes correspondant aux 3 vols et donc à 3 moments de la journée sont très semblables, avec de faibles valeurs de réflectance dans le visible, pour augmenter progressivement, jusqu'à ce qu'elles suivent un palier dans le moyen infrarouge, avoisinant 0,35 (figure 3.22). Les écarts entre les courbes ne sont guère significatifs compte tenu de la variabilité spatiale. Néanmoins, on ne saurait totalement exclure une influence de l'élévation solaire liée à un effet d'anisotropie de la réflectance bidirectionnelle.

L'étude des réflectances sur les autres surfaces permet de bien différencier les surfaces végétales des matériaux urbains (figure 3.23). En effet, on distingue nettement sur les signatures spectrales de l'herbe et des arbres le maximum de réflectance du proche infrarouge et les deux maxima secondaires de part et d'autre des bandes d'absorption de l'eau dans le moyen infrarouge qui sont spécifiques à la végétation. Les surfaces minérales présentent, elles, des signatures moins prononcées, augmentant progressivement des courtes longueurs d'ondes vers les longueurs d'onde plus élevées, à l'exception de la tôle qui présente une signature quasiment plate. Notons que parmi ces matériaux caractéristiques de la ville, aucun ne présente de réflectance aussi élevée que celle atteinte par le revêtement du parvis de la Faculté de Droit.

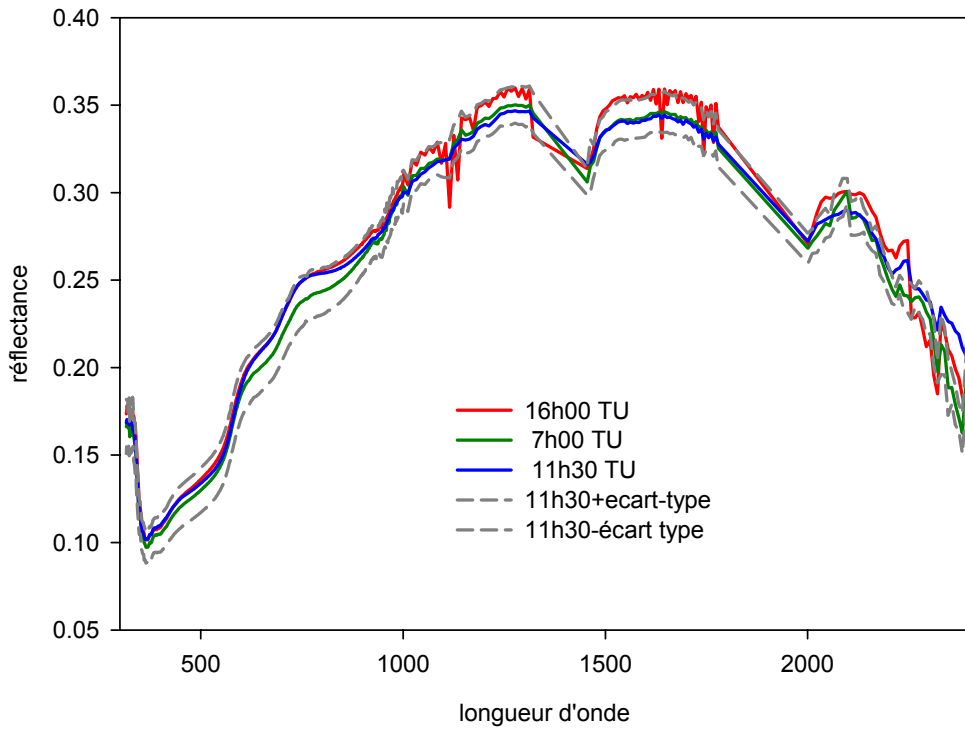


Figure 3.22 Réflectances moyennes du parvis de la Faculté de Droit mesurées à l'heure des survols DAIS

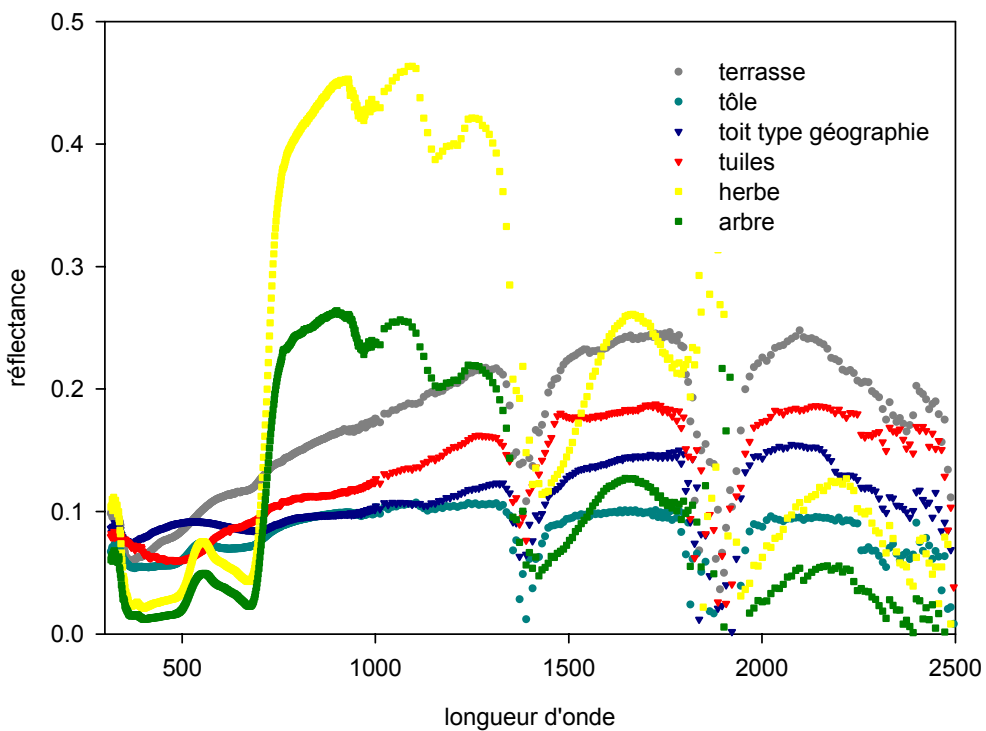


Figure 3.23 Réflectances mesurées sur des surfaces identifiables sur les images DAIS

3.4.3 Albédo

surface	albédo	Ecart-type
Parvis Faculté de Droit	0,186	0,0067
Asphalte (campus)	0,127	0,0063
Asphalte (cour du PEGE)	0,102	0,0032
Toit en terrasse	0,123	0,0050
Place en terre battue (campus)	0,194	0,0089
Herbe (campus)	0,229	0,0076
Stade Vauban : pelouse	0,249	0,0085
Stade Vauban : pelouse synthétique	0,256	0,0059
Stade Vauban : terrain stabilisé 1	0,187	0,016
Stade Vauban : terrain stabilisé 2	0,200	0,0057

Tableau 3.2 Albédos mesurés

Plusieurs mesures successives ont été effectuées sur les différentes surfaces, à partir desquelles un albédo moyen a été calculé (tableau 3.2). Les faibles écarts type traduisent la bonne stabilité de l'albédo d'une mesure à l'autre, ce qui nous indique que le bruit de l'instrument est quasiment négligeable, et que l'état du ciel restait stable au moment des mesures. Ces mesures effectuées en milieu de journée ne donnent en revanche aucune information sur la variation de l'albédo au cours de la journée. Ces albédos mesurés serviront à valider l'algorithme utilisé pour extraire cette grandeur à partir des images DAIS (4.3.2.1).

Il apparaît que les surfaces végétales se démarquent également par leurs valeurs d'albédo plus élevées, comme le démontrent les mesures réalisées sur l'herbe du campus ou la pelouse des stades (tableau 3.2). Les surfaces minérales présentent des albédos plus faibles, avec des valeurs ne dépassant pas 0,12 pour des matériaux caractéristiques des villes comme l'asphalte ou le revêtement des toits en terrasses. Ces observations tendent donc à confirmer le moindre pouvoir réflecteur des surfaces urbaines, sans même que n'intervienne l'effet de piège entre les bâtiments.

3.4.4 Emissivité

Les mesures d'émissivité ont également été réalisées par un ciel dégagé, et sont associées à des mesures de rayonnement atmosphérique descendant. Ces données alimentent un algorithme, le TES (voir annexe A), qui permet d'obtenir des émissivités dans les 5 canaux répartis dans la bande 8-14 μ m. Nous séparons ici les résultats obtenus sur les sites de mesures permanents (rue de l'Argonne et PEGE) de ceux obtenus sur des surfaces facilement identifiables sur les images.

3.4.4.1 PEGE et Rue de l'Argonne

Nous pouvons regrouper les signatures spectrales des différents matériaux de sol échantillonnés (asphalte sur les sites du PEGE et de la rue de l'Argonne, pavés, et cour du PEGE visée depuis les toits), qui présentent un comportement similaire (figure 3.25). On relève néanmoins que dans les 3 premiers canaux spectraux, la cour du PEGE visée du toit présente une émissivité quelque peu supérieure à celle que l'on obtient directement à la surface. Cela peut s'expliquer par une tache d'analyse qui n'est pas la même, puisque d'environ 30 cm lorsque la mesure est réalisée au niveau du sol, elle passe à 3 mètres pour une mesure effectuée à partir des toits. Une autre explication pourrait résider dans la mesure du rayonnement descendant qui intervient dans le calcul de l'émissivité.

Il est probable que celui-ci contienne une composante due au rayonnement issu des éléments du voisinage lorsque la mesure est effectuée à l'intérieur de la cour.

Les signatures des matériaux constitutifs de toiture ne sont pas très différentes des précédentes, avec toutefois une émissivité plus élevée dans le premier canal pour les toits en mammoth du PEGE. Seule la signature des façades du PEGE, faites de briques et de glaces, se démarque fortement des autres, avec une émissivité constamment comprise entre 0,95 et 0,98 dans les canaux considérés. Il convient d'être prudent dans ce cas précis quant à la fiabilité des mesures, puisqu'il est délicat de mesurer une émissivité sur une surface verticale selon ce protocole, le rayonnement atmosphérique descendant à prendre en compte étant très difficile à évaluer.

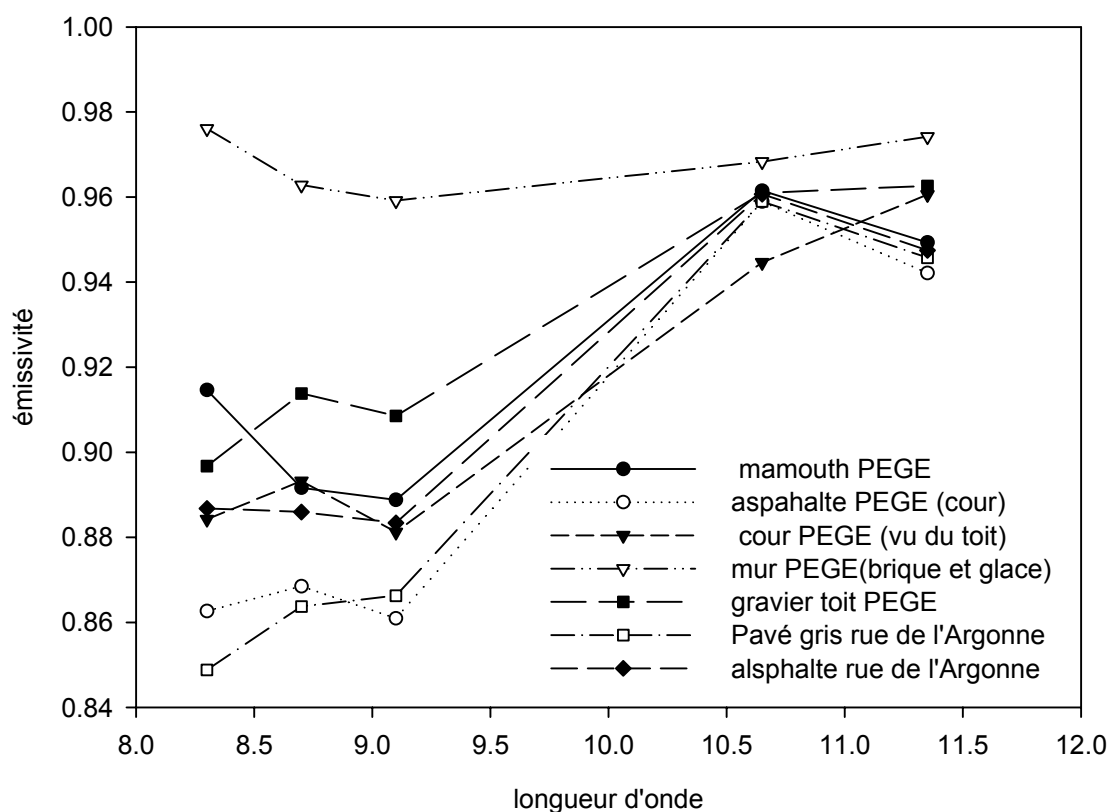


Figure 3.25 Emissivités mesurées sur les sites du PEGE et de la rue de l'Argonne

3.4.4.2. Surfaces identifiables sur les images

Les émissivités de ces surfaces apparaissent bien plus contrastées que les précédentes. trois points méritent d'être soulignés (figure 3.26) :

- l'émissivité du stade, élevée dans toutes les bandes (autour de 0,98) et qui se différencie peu d'une bande à l'autre, ce qui est conforme aux valeurs figurant dans la littérature pour la végétation
- l'émissivité mesurée sur l'asphalte de la cour du lycée Jean Rostand, nettement plus faible que celles mesurées auparavant sur le même matériau (autour de 0,80 contre des valeurs avoisinant les 0,86 pour les sites de la rue de l'Argonne et du PEGE) pour les 3 premières bandes, ainsi que dans la 5^{ème} (0,87 contre 0,95)

- les grandes différences d'émissivité entre les dalles du parvis de la faculté de droit en fonction de leur couleur, puisque celle-ci est élevée pour les dalles noires, alors qu'elle est nettement plus basse pour les dalles rouges (moins 10% pour les 3 premières bandes). Cela peut compliquer l'étude des images aéroportées sur cette surface.

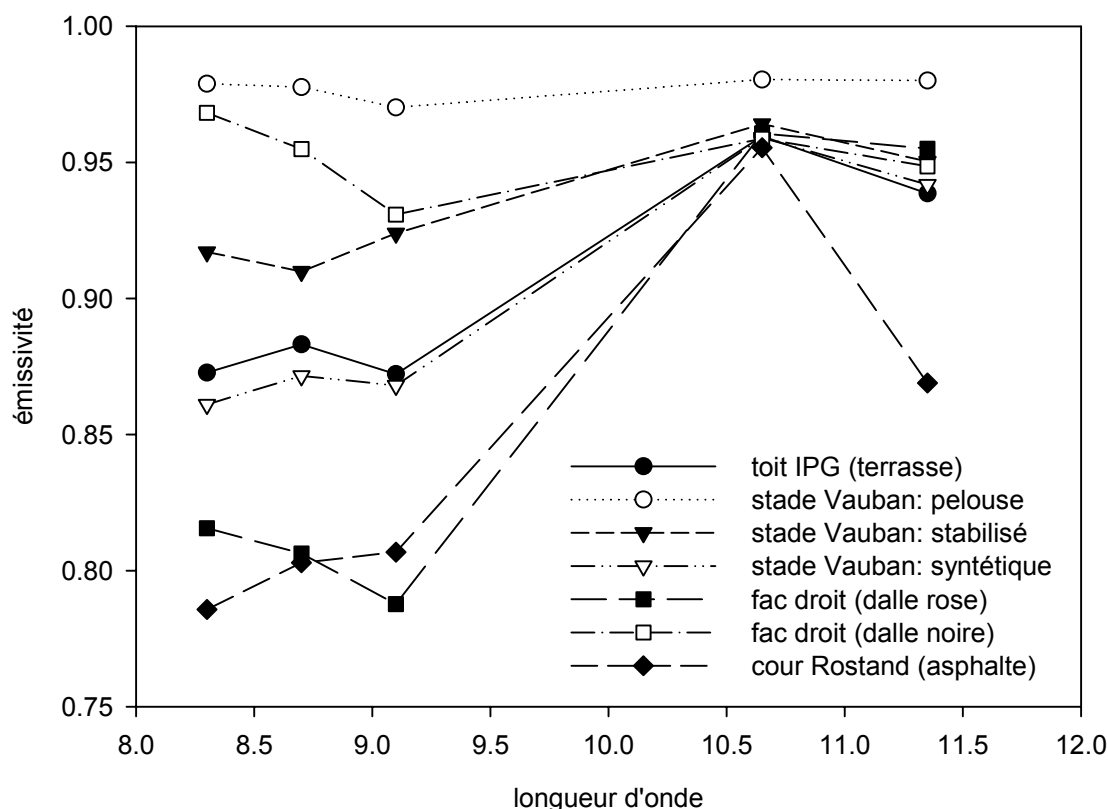


Figure 3.26 Emissivités mesurées sur des surfaces identifiables sur les images DAIS

3.4.4.3 Emissivité relative à la bande 8-14μm

L'émissivité est une donnée fondamentale pour l'obtention de la température de surface. Comme nous le montrent les différentes signatures spectrales, l'émissivité est très variable sur la bande 8-14 : il faut alors calculer une valeur d'émissivité attribuable à l'ensemble de la fenêtre en question (tableau 3.3) afin de pouvoir passer des températures de brillance aux températures de surface mesurées à l'aide d'un radio-thermomètre ou d'une caméra larges bandes. Le principe de cette détermination est succinctement donné dans l'Annexe A. Il faut noter toutefois que cette détermination est délicate et nécessite en particulier la connaissance exacte de la bande spectrale de l'instrument. Cette donnée est souvent très approximative, notamment pour un radiomètre de type Everest, ce qui peut entraîner une incertitude non négligeable sur la température de surface.

site	surface	Emissivité 8-14
PEGE	Mammouth	0,93
	Asphalte cour	0,92
	Cour (vu du toit)	0,93
	Mur (vu du toit)	0,97
	Gravier (toit)	0,94
Rue de l'Argonne	Pavés gris	0,92
	Asphalte	0,93
IPG	Toit en terrasse	0,92
Stade Vauban	Pelouse	0,98
	Terrain stabilisé	0,94
	Terrain synthétique	0,92
Parvis faculté de droit	Plaque rose	0,90
	Plaque noire	0,95
Lycée J. Rostand	Asphalte	0,86

Tableau 3.3: Emissivités moyennes calculées sur la bande 8-14 μ m

3.5 Télédétection : bilan des acquisitions

Au cours des périodes d'observations intensives, un certain nombre de données ont été obtenues par la télédétection : on entend par télédétection non seulement l'acquisition de mesures à distance sans contact, mais aussi nécessairement sous forme d'images c'est à dire de mesures distribuées. Pour cette raison, à côté des acquisitions par voie aéroportée et hélicoptée dont il a été question, on inclut dans télédétection des thermographies (images de température de brillance) réalisées au sol dans le canyon en coïncidence avec les survols.

Ces thermographies ont été réalisées avec une caméra infrarouge AGA 780LW déplacée à bord d'un chariot. Des images infrarouges des façades sont ainsi recueillies tous les 8 mètres, des deux cotés de la rue, plus de la moitié de la longueur du canyon étant couverte, la limitation venant uniquement du temps nécessaire à l'obtention de l'ensemble des images.

Le tableau 3.4 rassemble les informations sur l'ensemble des acquisitions de télédétection réalisées au cours de la campagne de mesures :

instrument	Date-heure	acquisitions
DAIS	27/07 (16h), 28/07(7h, 11h30)	Luminance spectrale (visible, proche infrarouge, infrarouge thermique)
Caméra hélicoptée	14/08 (8h30, 12h30, 15h30)	Température de brillance
Caméra AGA	27/07 (16h), 28/07 (7h, 11h30), 14/08 (8h30, 12h30, 15h30)	Température de brillance

Tableau 3.4 Récapitulatif des acquisitions de télédétection

Conclusion du chapitre :

Une base de données conséquente a été bâtie lors de cette campagne, puisqu'elle comporte tous les termes des bilans radiatif et d'énergie aux échelles canyon et fragment, les données et paramètres climatologiques, des profils atmosphériques par radiosondage, le rayonnement global incident (diffus et direct) et le rayonnement atmosphérique descendant mesurés sur un site de référence, les images obtenues par télédétection ainsi que les mesures de contrôle associées, et le modèle numérique d'élévation établi sur une grande partie de l'agglomération. Les différents paramètres et grandeurs mesurés aux différents points du canyon et au sommet des mâts lors de cette campagne vont être ensuite confrontés aux sorties du modèle SOLENE. L'exploitation des images acquises lors des survols nécessite un certain nombre de mises en forme et de traitements préparatoires avant d'accéder à la restitution de grandeurs géophysiques, qui sont exposés dans le chapitre suivant.

4- Télédétection

La télédétection est la seule technique permettant en ce qui concerne les paramètres géophysiques de surface, d'assurer le changement d'échelle, de l'échelle locale jusqu'à celle englobant l'ensemble de l'agglomération dans son contexte régional ; c'est aussi, du fait d'une approche image, la seule méthode d'investigation d'un système hétérogène comme le milieu urbain. La finalité de la télédétection étant d'accéder aux paramètres géophysiques nécessaires à l'obtention du bilan radiatif, les efforts se sont concentrés sur l'albédo, la température et l'émissivité. Les moyens d'observation utilisés ont été introduits dans le chapitre 2, section 4.3, ainsi que les mesures d'accompagnement nécessaires à l'exploitation des données acquises.

Le présent chapitre est consacré à la mise en œuvre de la télédétection et son utilisation, pour laquelle un certain nombre d'opérations particulières doivent être effectuées, opérations qui dépendent du type de capteur-image d'une part, de l'impact de l'atmosphère et ses propriétés radiatives, d'autre part.

4.1 Objectifs : échelle du quartier avec mesures terrain associées

Nous allons nous intéresser à la télédétection sous l'angle de l'exploitation du signal pour la détermination de paramètres géophysiques et de grandeurs de surface qui serviront soit comme données d'entrée au modèle, soit et surtout pour la validation des sorties de modèle, et enfin pour l'intégration spatiale des termes du bilan radiatif.

En ce qui concerne l'exploitation des acquisitions de télédétection, elle passe par plusieurs étapes techniques et physiques pour la mise en forme, la vérification de la cohérence des données, enfin leur traduction en terme de grandeurs physiques à valider par des mesures terrains de contrôle.

Le bilan récapitulatif des données de télédétection acquises lors des périodes d'observation intensives, dates et heures de survol, a été donné en section 3.5.

Ne sont concernées ici que les données acquises par voie aéroportée par le capteur DAIS sur l'ensemble du domaine optique (solaire réfléchi et infrarouge thermique), et celles acquises par caméra infrarouge embarquée à bord d'un hélicoptère. Les données avion couvrent une bonne partie de l'agglomération strasbourgeoise, tandis que les données obtenues par caméra hélicoptée se concentrent plus particulièrement sur les sites instrumentés (rue de l'Argonne et PEGE).

L'utilisation de la caméra infrarouge hélicoptée et des données aéroportées DAIS est complémentaire, dans la mesure où la caméra offre la possibilité d'opérer à des altitudes plus faibles ainsi qu'une plus grande flexibilité temporelle par rapport à DAIS qui lui apporte les avantages d'un imageur hyperspectral sur l'ensemble du domaine optique. Dans les deux cas, les vols sont complétés par une importante base de données atmosphériques (11 radiosondages pendant les jours de vols) et par une série de mesures ponctuelles effectuées au niveau du sol pour le calage et la validation de ces données images (cf 3.4).

L'analyse et l'exploitation des mesures de télédétection en liaison avec les mesures de flux réalisées dans une perspective de modélisation constituent une partie fondamentale de notre étude. Il s'agit notamment :

- d'extraire des données de télédétection des grandeurs géophysiques (albédo, émissivité) avec autant que possible la marge d'erreur associée.
- de confronter les mesures de télédétection avec les mesures directes des termes du bilan radiatif et les mesures de flux.
- de renseigner sur la variabilité spatiale des paramètres du bilan radiatif en liaison avec l'occupation du sol et la géométrie.

- d'examiner la représentativité et la signification des mesures de télédétection vis à vis des modèles développés pour le canyon et le quartier. A ces deux échelles, elle permet de valider les sorties de modèles, soit pour l'évaluation des paramètres de surface relatifs à la canopée urbaine, soit pour calculer les flux et donc la pertinence des paramétrisations utilisées.

4.2 Mesures héliportées quartier

4.2.1 Capture des images

Pour des raisons techniques, les images de la caméra sont, en vol, enregistrées sous forme analogique sur cassette vidéo. En même temps que l'image sont enregistrés un certain nombre de paramètres instrumentaux, notamment la dynamique de l'image exprimée en degré C à laquelle est associée une mire en échelle de gris (figure 4.1).

Lors de la visualisation ultérieure des bandes, la première étape consiste à identifier les passages au dessus des sites d'intérêt, puis à sélectionner et enregistrer les images concernées via une carte de numérisation. On rappelle que les survols ont été systématiquement réalisés avec deux objectifs de focales différentes, donc de champ de vue différents. En dépit d'une meilleure résolution spatiale, les images obtenues avec l'objectif « 3x » ont un champ de vue trop petit pour être facilement exploitables. En conséquence, seules sont exploitées dans ce qui suit les images obtenues avec l'objectif « 1x », conduisant à une résolution au sol de 0.7*0.7 m.

Pour couvrir les sites, soit de la rue de l'Argonne, soit du PEGE, il est nécessaire de capturer plusieurs images successives. Dans le cas de la rue de l'Argonne, un survol de l'hélicoptère suffit pour couvrir la largeur de la rue et les bâtiments qui l'entourent, et entre 3 et 5 captures d'images (en fonction de la hauteur de l'appareil, le vol du matin ayant été réalisé plus bas que les suivants) sont nécessaires pour avoir toute la longueur de la rue. L'opération se complique pour le PEGE, puisqu'en raison des dimensions, plusieurs passages de l'hélicoptères sont effectués pour avoir l'intégralité du site, qui est alors couvert par 9 à 15 images selon le vol.

A chaque pixel des images extraites est ensuite associée une valeur sous forme de compte numérique, représentée par 256 niveaux de gris. A chaque image sélectionnée est donc associée la distribution des comptes numériques de la mire, dont les bornes correspondent aux valeurs minimales et maximales du champ d'acquisition des données de température de brillance (figure 4.1).

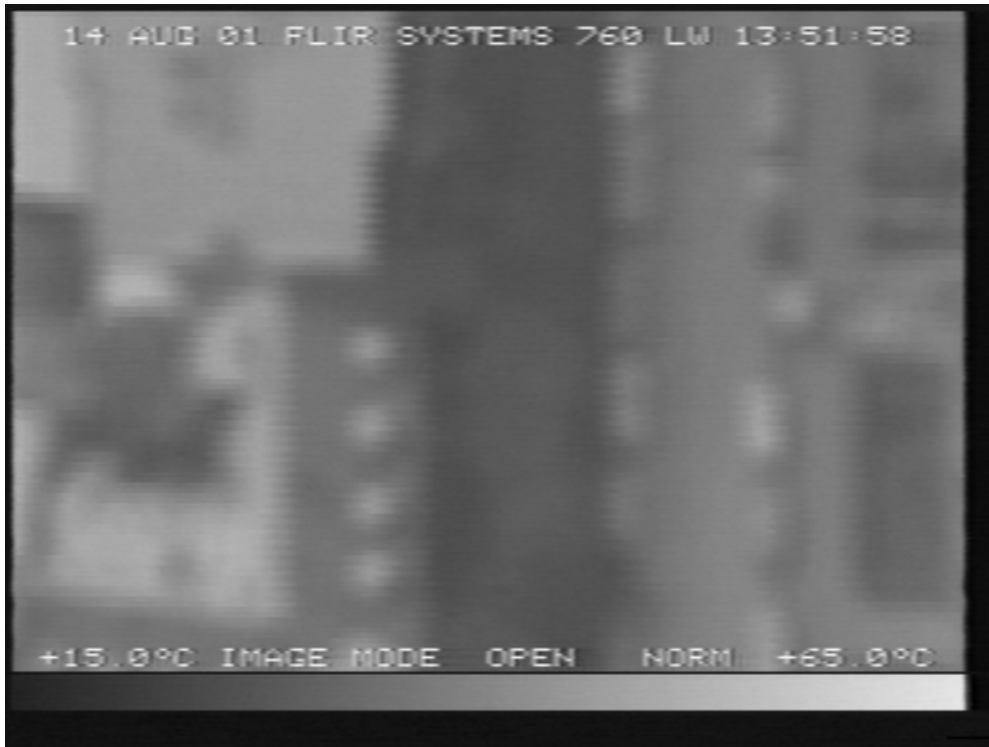


Figure 4.1 Image extraite de la bande vidéo fournie par la caméra hélicoptérée

4.2.2 Passage des comptes numériques aux températures de surface

Les températures de brillance des extrémités de la mire sont transformées en luminance, puisque la relation est linéaire entre les comptes numériques et la quantité d'énergie détectée, ce qui n'est pas le cas pour les températures de brillance. On utilise la Luminance Spectrale Equivalente LSE définie par la relation suivante :

$$LSE_{\lambda}^0(T) = \frac{\int_{7.25\mu m}^{13.25\mu m} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{[\exp(c_2 / \lambda T) - 1]} S(\lambda) d\lambda}{\int_{7.25\mu m}^{13.25\mu m} S(\lambda) d\lambda}$$

où $S(\lambda)$ est la fonction filtre de la caméra.

i) L'estimation numérique de la quantité $LSE_{\lambda}^0(T)$ a été effectuée pour une gamme de température allant de 15 à 65 degrés (qui correspond à l'étendue des températures susceptibles d'être mesurées), par pas de 5 degrés, $d\lambda$ étant constant (0,25 μm).

Puis nous avons établi une régression polynomiale entre la température de brillance et la luminance spectrale équivalente LSE. Une tentative d'approximation par une loi de puissance a été faite, mais n'a pu être appliquée car la dynamique des températures est trop importante. Nous avons alors adopté une régression polynomiale d'ordre 3 et obtenu les relations suivantes :

- pour passer de la température de brillance à la luminance :

$$y = 3,33 \times 10^{-11} x^3 + 7,33 \times 10^{-8} x^2 + 1,12 \times 10^{-5} x + 5,88 \times 10^{-4}$$

- de la même façon, pour passer de la luminance à la température de brillance :

$$y = 7308964405,80x^3 - 41224018,96x^2 + 123988,67x - 59,60$$

L'erreur résiduelle entre la température réelle (calculée à partir des luminances mesurées à partir de la fonction de Planck et de la fonction filtre de la caméra) et la température donnée par la régression ci dessus est de l'ordre du centième de degrés (0,014), ce qui est tout à fait satisfaisant et très largement suffisant.

ii) Une relation linéaire est établie entre les comptes numériques CN1 et CN2 des bornes de la mire et $LSE_{\lambda}^0(T1)$ et $LSE_{\lambda}^0(T2)$ du type :

$$LSE = aCN + b$$

où les coefficients a et b sont propres à chaque image car les dynamiques de chaque image sont différentes.

La transformation est affectée à l'ensemble de l'image sélectionnée, aboutissant à des images de luminances de la scène permettant l'application des corrections atmosphériques.

4.2.3 « Corrections atmosphériques » sur les mesures sol

Les mesures de température de brillance réalisées au niveau du sol en coïncidence avec les passages de l'hélicoptère sont rassemblées dans le tableau 4.1. Deux méthodes sont possibles : soit ramener les mesures caméra héliportée au niveau du sol en effectuant les corrections atmosphériques sur les luminances mesurées, soit transformer les mesures sol en mesures en entrée capteur en introduisant les perturbations atmosphériques fonctions en particulier de l'altitude de l'hélicoptère. C'est la deuxième méthode qui a été appliquée.

Mesures sol			Luminances images caméra hélico ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)				
Site/matériau	heure	Tb °C	Nb pixels	Lum min	Lum max	Lum <>	σ
Eau	matin	17,94	5084	7,85 E-4	8,19 E-4	8,06 E-4	4 E-6
	midi	18,29	3538	8,15 E-4	8,94 E-4	8,58 E-4	11 E-6
	soir	18,08	2958	7,97 E-4	8,73 E-4	8,31 E-4	12 E-6
Asphalte	matin	28,41	2944	9,52 E-4	9,88 E-4	9,69 E-4	6 E-6
	midi	44,16	1610	11,21 E-4	12,4 E-4	11,96 E-4	23 E-6
	soir	39,91	2744	11,06 E-4	11,93 E-4	11,53 E-4	13 E-6

Tableau 4.1 Températures de brillance mesurées au sol et luminances obtenues sur les images pour les mêmes surfaces

Les grandeurs atmosphériques, transmission $\tau(z)$, luminance montante, luminance descendante ont été calculées par MODTRAN-4 sur les profils-ballons du 14.08. Les résultats sont donnés dans le tableau 4.2 : l'altitude de survol n'étant pas constante, les calculs ont été faits pour trois altitudes : 300m, 400m, 100Km (hauteur nécessaire au calcul de la luminance atmosphérique descendante) et une interpolation quadratique établie pour obtenir $\tau(z)$ et $L\uparrow(z)$.

Altitude (m)	site	Ta couche l (°K)	τ	L_{\uparrow} (W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹)	L_{\downarrow} W m ⁻² sr ⁻¹ μm ⁻¹
TU 08 :30					
187m	Arg / PEGE		0,9390	3,4445 E-5	
258m	eau		0,9148	4,9822 E-5	
300m		291,6	0,9002	5,9532 E-5	
400m			0,8646	8,4410 E-5	
100km			0,5660	2,5375 E-4	3,5404 E-4
TU 12 :30					
300m		298,7	0,9065	5,9323E-5	
390m	eau		0,8682	8,1790E-5	
400m			0,8736	8,2217 E-5	
426m	Arg / PEGE		0,8649	8,8427 E-5	
100km			0,5801	2,4692 E-4	3,4825 E-4
TU 15:30					
300m		298,8	0,9038	6,3390 E-5	
390m			0,8758	8,3699 E-5	
400m	Arg / PEGE		0,8727	8,5992 E-5	
420m	eau		0,8666	9,060 E-5	
100km			0,5883	2,4697 E-4	3,5114 E-4

Tableau 4.2: corrections atmosphériques calculées par MODTRAN (14/08)

Notons que l'altitude réelle a été déterminée de trois façons différentes: i) par l'altimètre de bord ; ii) par mesures de dimension linéaire sur les images, connaissant la dimension au sol ; iii) par la pression atmosphérique mesurée grâce à une sonde (pression, température, humidité) embarquée à bord de l'hélicoptère (cf : Annexe B).

L'incertitude sur l'altitude ne devrait pas dépasser ± 10 m.

Les opérations à effectuer diffèrent selon le capteur :

i) PRT-5 (eau) : la longueur d'onde centrale est prise égale à $11,5\mu\text{m}$, constante (à cause de la très faible variation de température de l'eau). On effectue d'abord une correction d'émissivité de l'eau ($\epsilon_{\text{PRT-5}} = 0,988$) ce qui revient à introduire un terme de réflexion du rayonnement infrarouge atmosphérique descendant dans l'expression de la luminance spectrale mesurée :

$$t_B \rightarrow T_B \rightarrow L_{\lambda=11,5}^0(T_B) = \epsilon_{\text{PRT-5}} L_{\lambda=11,5}^0(T_s) + (1 - \epsilon_{\text{PRT-5}}) L_{\downarrow}$$

t_B est la température de brillance « eau » mesurée, exprimée en °C, convertie en °K T_B , convertie ensuite en luminance $L_{\lambda=11,5}^0(T_B)$

La luminance atmosphérique descendante a été estimée à $2,510^{-4} \text{ Wcm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$, constante sur la journée (à rapprocher de la valeur $3,5 \cdot 10^{-4}$ pour la bande caméra).

On calcule ainsi $L_{\lambda=11,5}^0(T_s) \rightarrow T_s$.

On recalcule ensuite cette luminance sol vue par la fonction filtre de la caméra, en utilisant les relations numériques pré-établies entre luminance / température / longueur d'onde centrale caméra (cf 4.2.2.); la longueur d'onde centrale est recalculée à chaque étape:

$$L_{\lambda_c}^0(T_B) = \epsilon_{\text{cam}} L_{\lambda_c}^0(T_s) + (1 - \epsilon_{\text{cam}}) L_{\text{cam}}^{\downarrow}$$

L'émissivité de l'eau pour la bande passante de la caméra est prise égale à 0,986

Enfin, on ramène ceci à l'altitude de survol de l'hélicoptère

$$L_{\lambda_c}^0(T_i) = L_{\lambda_c}^0(T_{B-sol}) \times \tau(z) + L^\uparrow(z)$$

ii) EVEREST (asphalte) : ne connaissant pas de façon précise la fonction filtre de l'instrument opérant dans la bande [8-14 μ m], on admet que l'on peut utiliser les mêmes relations numériques pour la longueur d'onde centrale, que celles établies pour la caméra. Dans ces conditions, l'instrument au sol mesurant la luminance sol dans la bande spectrale de la caméra hélico, il suffit de passer directement à la luminance capteur, comme ci-dessus.

Le tableau suivant rassemble et compare les valeurs obtenues à celles issues de la caméra héliportée :

		surface		capteur		
site	heure	T _B mes. K	Lum surf	Lum calc	Lum <> mes	Δ TB
Eau	matin	291,10	8,1559 E-4	7,959 E-4	8,06 E-4	-0,73
	midi	291,45	8,2047 E-4	7,993 E-4	8,58 E-4	-4,14
	soir	291,24	8,1753 E-4	7,990 E-4	8,31 E-4	-2,28
Asph alte	matin	301,57	9,6841 E-4	9,437 E-4	9,69 E-4	-1,64
	midi	317,32	1,2362 E-3	1,1576 E-3	1,196 E-3	-2,18
	soir	313,07	1,1603 E-3	1,099 E-3	1,153 E-3	-3,09

Tableau 4.3 Comparaison entre les luminances calculées à partir des mesures sols et les luminances obtenues sur les images hélicoptère (en W m⁻² sr⁻¹ μ m⁻¹)(14/08)

4.2.4 Re-étalonnage de la caméra

Les luminances capteur calculées sont systématiquement inférieures aux luminances moyennes images ; en revanche, elles sont, notamment pour l'eau, très proches des luminances images minimales (cf : tableau 4.1).

Le cas de l'eau pose question en raison de valeurs anormalement élevées de la variance σ (cf Tableau 4.1) (midi et soir) pour un milieu en principe très homogène. Un examen attentif des images suggère l'existence d'un effet de miroitement dû à la rugosité de la surface : s'ajouterait à la luminance émise par l'eau une faible fraction de la luminance infrarouge solaire directe réfléchie spéculairement sur les « facettes » de la surface. L'observation se faisant au nadir, cet effet de miroitement est déterminé par la position du soleil (élévation) et est modulé par la distribution statistique des pentes de la surface.

Une évaluation grossière est donnée en Annexe C.

Le matin, l'élévation du soleil est trop faible (occultation) pour donner un effet de miroitement. Si cette interprétation est correcte, une solution serait de prendre comme valeur de luminance eau la valeur minimale observée augmentée de la variance σ pour tenir compte du bruit instrumental, soit 8,26 E-4 (midi) et 8,09 E-4 (soir).

Pour le site PEGE-asphalte, ce sont les valeurs moyennes qui doivent être considérées comme représentatives.

Les résultats sont les suivants (figure 4.2) :

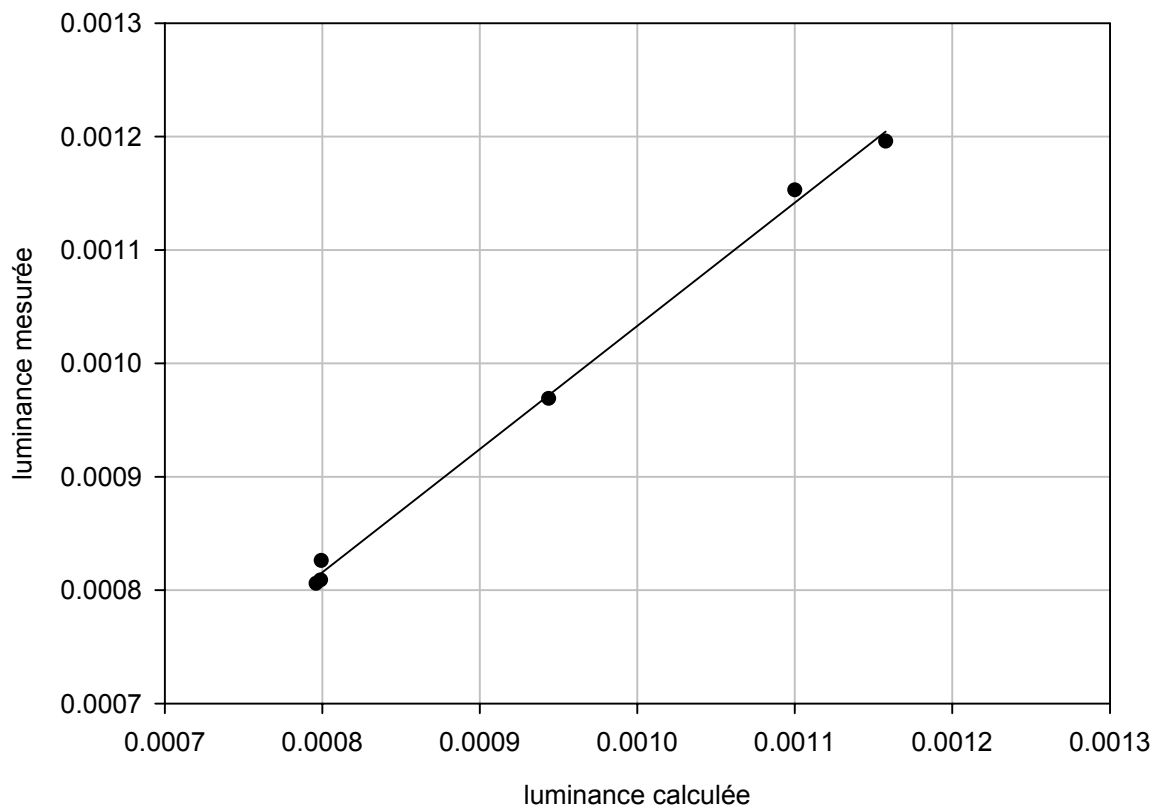


Figure 4.2 Corrélation entre les luminances calculées et les luminances mesurées ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$)

Avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,997$

On obtient donc les relations suivantes :

- Luminance capteur calculée vs luminance capteur mesurée :

$$L_{\text{mesurée}}^{\text{capteur}} = 1,087 \times L_{\text{calc}}^{\text{capteur}} - 5,360 \times 10^{-5}$$

- Luminance capteur mesurée vs luminance capteur calculée :

$$L_{\text{calc}}^{\text{capteur}} = 0,920 \times L_{\text{mesurée}}^{\text{capteur}} + 4,931 \times 10^{-5}$$

La deuxième relation permet donc de re-étalonner la caméra : les luminances calculées sont ensuite ramenées au niveau de la surface par correction atmosphérique.

Exprimée en températures, les relations de re-étalonnage sont les suivantes :

$$T_{mes}(K) = 1,071 \times T_{calc}(K) - 19,44$$

$$t_{mes}(^{\circ}C) = 1,071 \times t_{calc}(^{\circ}C) - 0,123$$

$$T_{calc}(K) = 0,934 \times T_{mes}(K) + 18,156$$

$$t_{calc}(^{\circ}C) = 0,934 \times t_{mes}(^{\circ}C) + 0,120$$

4.2.5 Images : génération de mosaïques et vérification des températures

Les images recouvrant les secteurs correspondant à la rue de l'Argonne et au PEGE ont été rassemblées pour les trois vols, de façon à obtenir une seule image sous forme de mosaïque pour chacun de ces sites (figure 4.3).

Une vérification de la qualité des mesures obtenues avec la caméra re-étalonnée a été effectuée sur la mosaïque rue de l'Argonne, en comparant pour chacun des survols, la moyenne de températures des pixels « rue » de l'image avec la mesure au sol donnée par le radiomètre EVEREST. Les résultats, présentés sur la figure 4.4 sont tout à fait satisfaisants pour les vols de 8h30 et 15h30 (moins de 1°C de différence), mais pour le vol de la mi-journée la température déterminée sur l'image est surestimée de près de 4°C. Ce désaccord semble devoir être attribué aux mesures sols plutôt qu'à la mesure par caméra héliportée. En effet, un examen attentif des mesures radiométriques prises au milieu de la rue pendant toute la durée de la campagne suggère que les températures mesurées en milieu de journée à partir de début Août environ sont sous-évaluées de quelques degrés, pour une raison qui n'a pas pu être établie avec certitude.

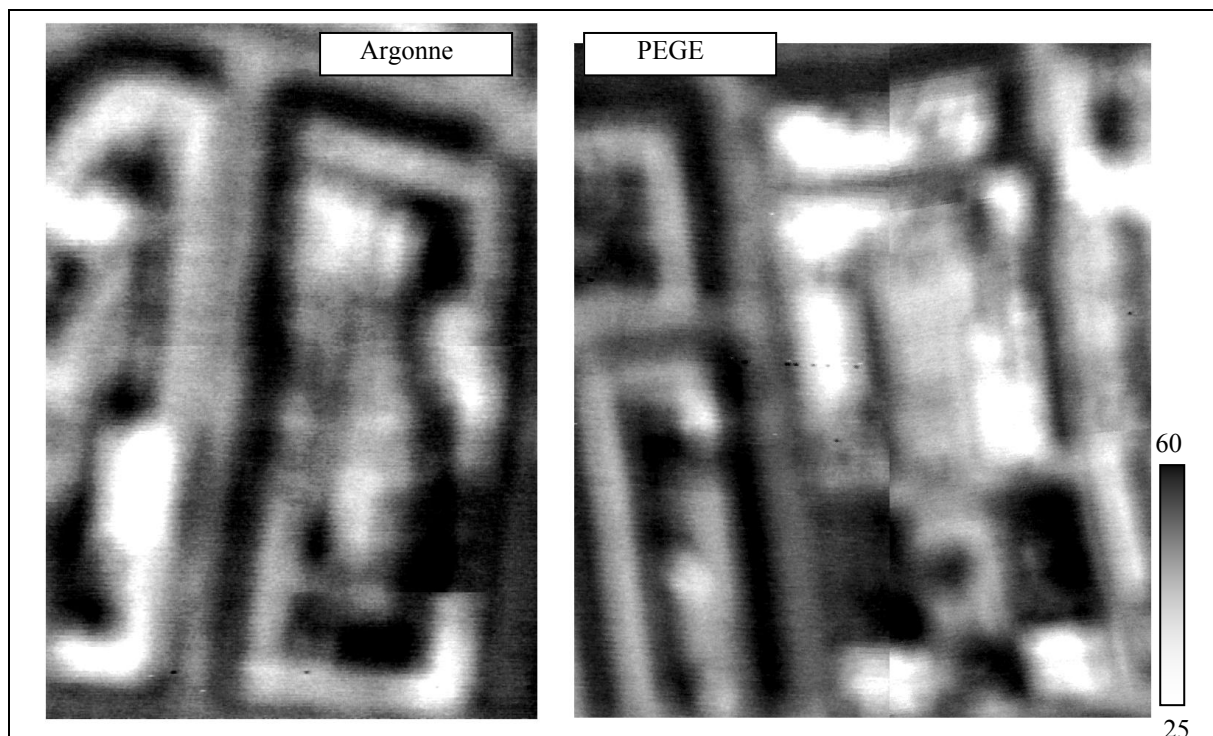


Figure 4.3 Température de surface (°C) : mosaïques réalisées sur les sites de la rue de l'Argonne et du PEGE

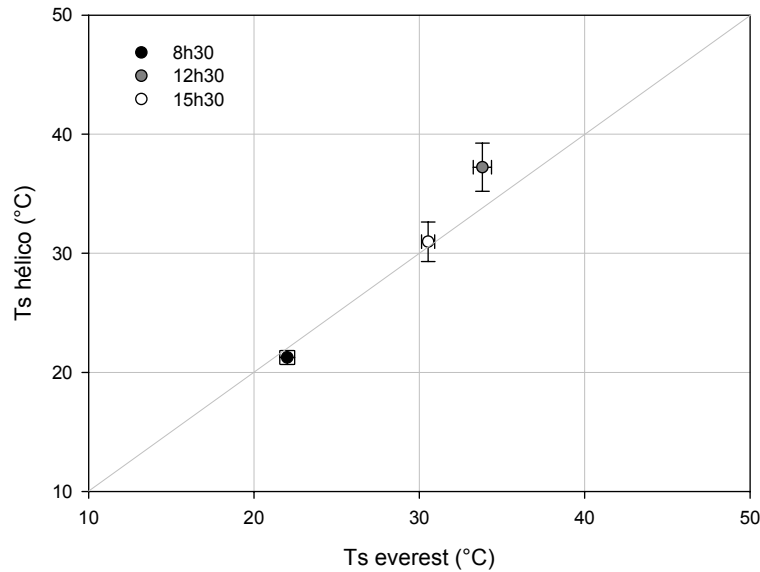


Figure 4.4 Comparaison entre les températures de surface mesurées par le radiomètre EVEREST et les températures de surface obtenues avec les images hélicoptère sur l'asphalte de la rue de l'Argonne.

4.3 Mesures aéroportées sur l'agglomération

4.3.1 Prétraitement des images DAIS

En règle générale, les images nécessitent deux types de pré-traitements : i) les pré-traitements géométriques destinés à corriger les distorsions et *in fine* à géoréférencer les images ; ii) les pré-traitements radiométriques. Avec les images DAIS, il s'avère que les déformations sont très fortes et que la correction des distorsions et surtout le géoréférencement sont quasi impossibles. C'est pourquoi il n'a pas été réalisé de corrections géométriques dont le résultat aurait été peu efficace et qui auraient entraîné d'importantes distorsions radiométriques du fait des ré-échantillonnages. L'absence de corrections géométriques n'est pas gênante aussi longtemps qu'il ne s'agit pas de superposer plusieurs images et par ailleurs cela n'obère pas la possibilité d'identifier les sites sur les images.

4.3.1.1 Corrections atmosphériques

La nécessité et le principe des corrections radiométriques sont brièvement rappelés dans l'annexe A. Ces corrections concernent l'ensemble du spectre. Que ce soit dans le domaine des courtes longueurs d'onde (domaine solaire réfléchi) ou dans l'infrarouge thermique, les grandeurs atmosphériques transmission et luminances atmosphériques montantes et descendantes, sont calculées par le code MODTRAN-4 renseigné par les profils de pression, température et humidité issus des radiosondages. Dans le domaine des courtes longueurs d'ondes, la diffusion par les aérosols joue un rôle important. L'information sur les aérosols est obtenue, à défaut de mesures directes, par la donnée de la visibilité fournie par les stations météorologiques. Dans le cas présent, les vols ont été réalisés par condition d'atmosphère très claire avec une visibilité de l'ordre de 30 Km. L'impact des aérosols est donc globalement faible sur les images.

Une fois les corrections atmosphériques effectuées, les luminances mesurées sont ramenées au niveau de la surface et les paramètres géophysiques de surface peuvent être extraits : réflectivité bi-directionnelles dans le solaire réfléchi, émissivité et température de surface dans l'infrarouge.

4.3.1.2 Re-étalonnage, vérifications

Avant de poursuivre l'exploitation des paramètres extraits des images, il est nécessaire d'évaluer leurs qualités et incertitudes associées en confrontant les paramètres extraits des images avec des mesures effectuées au sol en coïncidence.

i) Domaine réflectif

Dans le domaine réflectif, nous avons effectué cette vérification en comparant les signatures spectrales extraites des images à celles mesurées sur le terrain sur trois sites représentatifs : végétation (pelouse stade Vauban), parvis de la Faculté de Droit, place asphaltée. Plusieurs constatations en résultent :

1) certaines régions spectrales ne sont pas renseignées car DAIS n'a pas de canaux utilisables. 2) l'accord est tout sauf très bon, néanmoins acceptable pour la végétation et plus généralement dans la première partie du spectre ; 3) dans le cas du parvis de la Faculté de Droit, une contamination de la signature par la végétation présente en bordure n'est pas exclue totalement.

Ces résultats indiquent clairement que la qualité de DAIS en tant qu'imageur spectral est modeste et qu'il est illusoire d'essayer de restituer une signature complète, de même qu'il est illusoire d'effectuer un re-étalonnage du capteur.

ii) Domaine infrarouge

Dans l'infrarouge, la méthode consiste à comparer les luminances mesurées sur les images dans les canaux thermiques avec les luminances obtenues par l'intermédiaire des mesures de contrôle réalisées au sol. Afin de rendre ces grandeurs comparables, il convient de ramener les luminances mesurées au niveau du sol à l'altitude du capteur aéroporté en tenant compte de la luminance atmosphérique descendante, du rayonnement ascendant, et de la transmission atmosphérique, selon le même principe que précédemment. Cette opération ne peut s'effectuer que pour les 4 premières bandes thermiques de l'imageur DAIS (tableau 4.4), car on ne dispose pas de mesures terrain de validation pour les canaux 78 et 79. Il n'est en effet pas possible d'interpoler les résultats obtenus avec le CIMEL au-delà de 11,7 μ m.

Numéro de canal	74	75	76	77
Longueur d'onde (μ m)	8,57	9,51	10,30	11,01

Tableau 4.4 Longueurs d'ondes correspondant aux canaux thermiques utilisés

Une fois cette étape franchie, nous pouvons comparer ces luminances recalculées (L-calculées) avec les luminances obtenues sur les images DAIS (L-images). Les mesures de contrôle sol concernent l'eau et le parvis de la Faculté de Droit.

Afin de mieux mettre en valeur les écarts entre ces grandeurs, nous avons converti les luminances en températures de brillance, et représenté leur différence (tableau 4.5).

canal		Surface/heure	L-image $\text{mWm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	L-calculées $\text{mWm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$	ΔT_B
bande 74 (8.57 μm)		Fac.Droit 7h	7960,5	8101,2	-0,88
		Fac.Droit 11h30	10307,8	9824,6	2,63
		Fac.Droit 16h	9585,5	9307,0	1,58
		Eau 7h	7808,1	7921,1	-0,72
		Eau 11h30	7963,5	8033,0	-0,44
		Eau 16h	7880,7	7902,5	-0,14
Bande 75 (9.51 μm)		Fac.Droit 7h	8618,2	8734,0	-0,69
		Fac.Droit 11h30	11291,5	10784,1	2,60
		Fac.Droit 16h	10479,7	10232,3	1,32
		Eau 7h	8424,0	8448,6	-0,15
		Eau 11h30	8582,8	8535,8	0,28
		Eau 16h	8492,6	8408,5	0,51
Bande 76 (10.296 μm)		Fac.Droit 7h	9059,6	8916,2	0,84
		Fac.Droit 11h30	11681,9	10760,3	4,66
		Fac.Droit 16h	10879,9	10230,0	3,43
		Eau 7h	8463,2	8459,3	0,02
		Eau 11h30	8616,6	8565,1	0,31
		Eau 16h	8534,3	8432,5	0,62
Bande 77 (11.012 μm)		Fac.Droit 7h	9061,2	8828,1	1,37
		Fac.Droit 11h30	11407,5	10418,6	5,10
		Fac.Droit 16h	10687,1	9937,2	4,02
		Eau 7h	8297,6	8305,2	-0,05
		Eau 11h30	8441,7	8388,3	0,33
		Eau 16h	8371,3	8271,1	0,62

Tableau 4.5 Comparaison entre les luminances mesurées au sol et les luminances obtenues sur les images DAIS (27-28/07)

Il apparaît d'emblée que, comme dans le cas des mesures hélicoptère, les luminances recalculées pour les observations de contrôle sont la plupart du temps inférieures aux luminances moyenne image ($\Delta T_B > 0$).

Nous constatons que, quelque soit le canal, les valeurs obtenues sur l'eau par mesures sols et mesures DAIS sont proches, la différence restant toujours nettement inférieure à 1°C. Pour le parvis de la Faculté de Droit, les écarts sont plus marqués, notamment lors des mesures de midi et à un degré moindre du soir. Les mesures matinales échappent à la règle, puisque les valeurs restent proches, dépassant pour la seule bande 77 un écart d'un degré entre mesures sol et mesures aériennes. L'étude des différences bande par bande montrent qu'elles sont plus marquées dans les bandes 76 et 77 pour le parvis de la faculté de droit, où elles avoisinent les 5°C en milieu de journée.

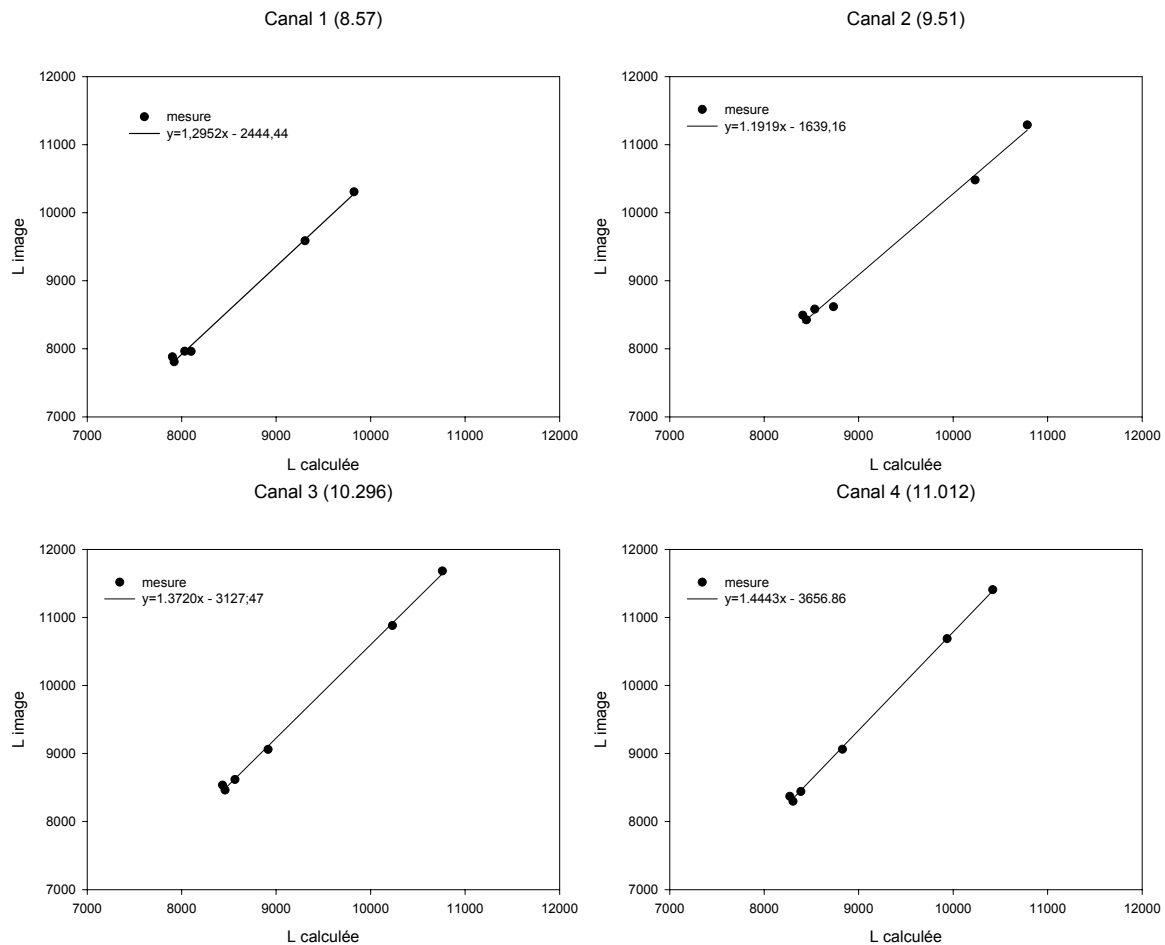


Figure 4.5 Corrélation entre la luminance calculée à partir des mesures sols et la luminance DAIS pour les 4 canaux thermiques ($\text{mWm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$).

Pour chaque bande, l'équation de régression de type $y = ax + b$ obtenue (figure 4.5) nous donne la correction à affecter aux luminances de chaque bande pour l'ensemble de l'image. On obtient les relations suivantes :

Bande n°	équation
74	$y=1,2952x - 2444,44$
75	$y=1.1919x - 1639,16$
76	$y=1.3720x - 3127,47$
77	$y=1.4443x - 3656.86$

Tableau 4.6 Corrections à effectuer sur les luminances DAIS pour les canaux infrarouges thermiques utilisés.

Ces relations permettent donc de ré-étalonner les images DAIS. Une fois les données corrigées, les corrections atmosphériques ramènent les luminances au niveau de la surface.

Comme pour les mesures héliportées, une vérification a été effectuée sur les pixels « rue de l'Argonne » en comparant les données images aux mesures sol EVEREST. Le résultat est donné figure 4.6.

Il est évidemment impossible de retrouver sur les images DAIS la portion exacte de surface de la rue visée par le radiomètre. Nous procédons donc à un calcul de température moyenne sur un certain nombre de pixels se trouvant sur la rue, face au bâtiment de la Faculté de Géographie, parfaitement identifiable sur les images.

Concernant les mesures radiométriques au sol, étant donné l'incertitude liée à l'heure exacte de survol, une température moyenne est calculée en considérant les valeurs enregistrées à l'heure annoncée du passage de l'avion ainsi qu'à t+15 et t-15 minutes.

Comme en atteste la figure 4.6, les températures de surface sont légèrement sous-estimées sur les images DAIS, avec un écart avec les mesures sol qui fluctue entre 1 et 2,5°C selon le moment de la journée. Les écarts types très élevés à midi s'expliquent par le fait qu'à ce moment de la journée, une partie de la rue est à l'ombre et l'autre au soleil.

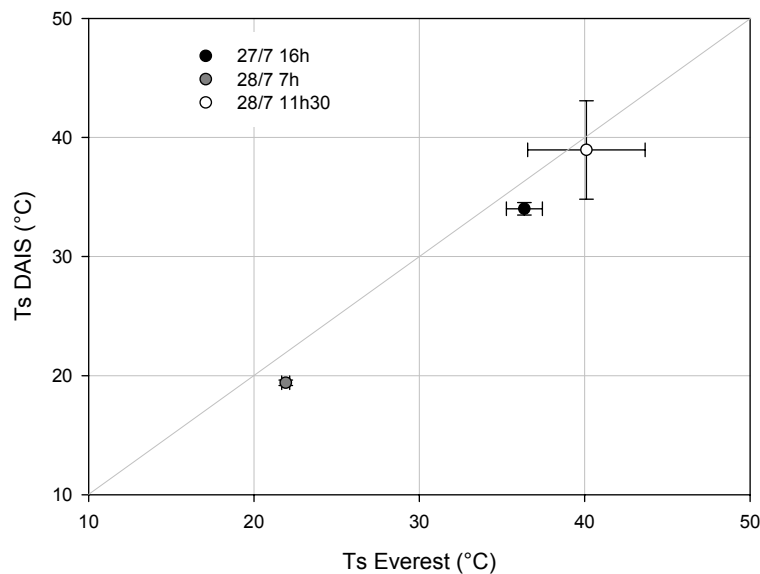


Figure 4.6 Comparaison entre la température de surface de la rue de l'Argonne obtenue par le radiomètre Everest et celle obtenue par DAIS

Ces résultats appellent les commentaires suivants :

- durant la phase de re-étalonnage effectué sur les données de l'esplanade de la Faculté de Droit, il a été constaté que les températures de surface « DAIS » étaient supérieures aux températures de surfaces calculées à partir de données sol. Le re-étalonnage est sensé corriger cette surestimation.
- Les écarts observés ici, lors de la vérification sur les données sols rue de l'Argonne, sont de signe contraire. : une explication plausible est que ces écarts sont le résultat d'une mauvaise estimation des émissivités du fait que les mesures DAIS concernent les 4 premiers canaux dans la bande [8,6-11,0µm] tandis que les mesures radiométriques EVEREST sont relatives à la bande [8-14µm]. Les différences de température observées peuvent s'expliquer autant par une sous-estimation de l'émissivité EVEREST que par une possible surestimation des émissivités DAIS, de l'ordre de 2%.
- Dans le domaine infrarouge, que ce soit pour les mesures par caméra ou pour les mesures effectuées sur les images DAIS, il apparaît que, toutes erreurs confondues, la restitution de la température de surface implique une marge d'incertitude pouvant atteindre $\pm 2^{\circ}\text{K}$. Autrement dit, des températures mesurées – calculées qui ne s'écartent pas de plus de 2°K devront être considérées comme en accord satisfaisant.

4.3.2 Paramètres géophysiques (ou thermo-optiques)

Les paramètres que nous cherchons à extraire sont en premier lieu ceux qui interviennent dans le bilan radiatif, albédo, émissivité et température de surface, d'où l'appellation de paramètres *thermo-optiques*.

4.3.2.1 Domaine réflectif

Un algorithme à 4 canaux est utilisé pour l'estimation de l'albédo : les canaux ont été choisis là où l'accord entre observations avion et mesures terrain est convenable : canal 2 (0,514 μm), canal 32 (1,035 μm), canal 35 (1,603 μm), canal 55 (2,17 μm). On a pu vérifier que la valeur d'albédo est peu sensible à un choix un peu différent des canaux.

Les résultats obtenus sur les images DAIS par le biais de cet algorithme sont confrontés, pour les vols de midi, avec les mesures réalisées sur un certain nombre de sites (cf 3.4.3). Les résultats sont satisfaisants (figure 4.7) : néanmoins, si l'écart moyen est de l'ordre de 0,007 l'écart maximum atteint 0,025.

Il sera donc prudent de considérer que la marge d'incertitude associée à la détermination d'un albédo à partir des images DAIS est au moins de $\pm 0,01$

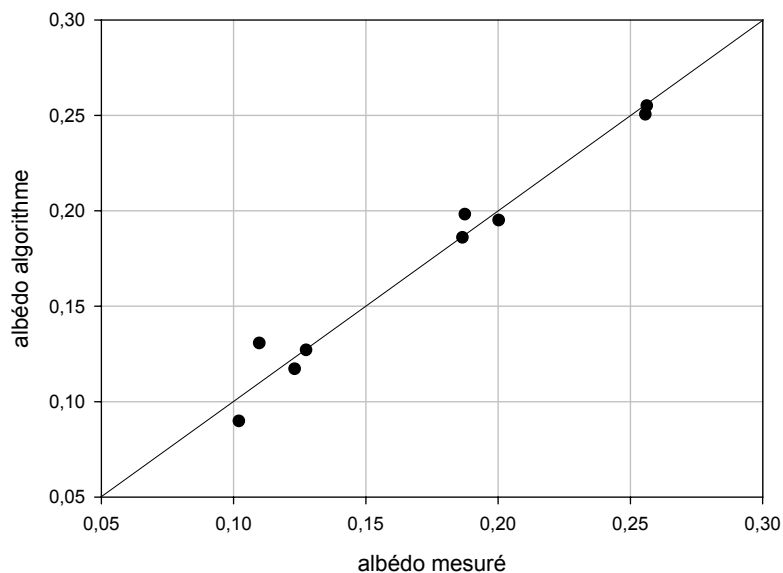


Figure 4.7 Comparaison entre l'albédo mesuré sur le terrain et l'albédo calculé à l'aide d'un algorithme pour les images DAIS

4.3.2.2 Domaine infrarouge thermique

Afin de comparer les émissivités obtenues sur les images DAIS avec les mesures réalisées avec le radiomètre CIMEL, nous avons retenu trois surfaces dégagées, pour bien les distinguer sur les images, et au comportement spectral différent : une place asphaltée, et deux stades, l'un en pelouse synthétique, l'autre en herbe (figure 4.8). L'algorithme « TES » est utilisé dans les deux cas pour accéder à l'émissivité. Afin de faciliter la comparaison, nous avons interpolé les émissivités mesurées sur le terrain à l'aide d'un outil d'ENVI, logiciel de traitement d'image, de manière à disposer des valeurs aux mêmes longueurs d'ondes que celles des canaux thermiques DAIS.

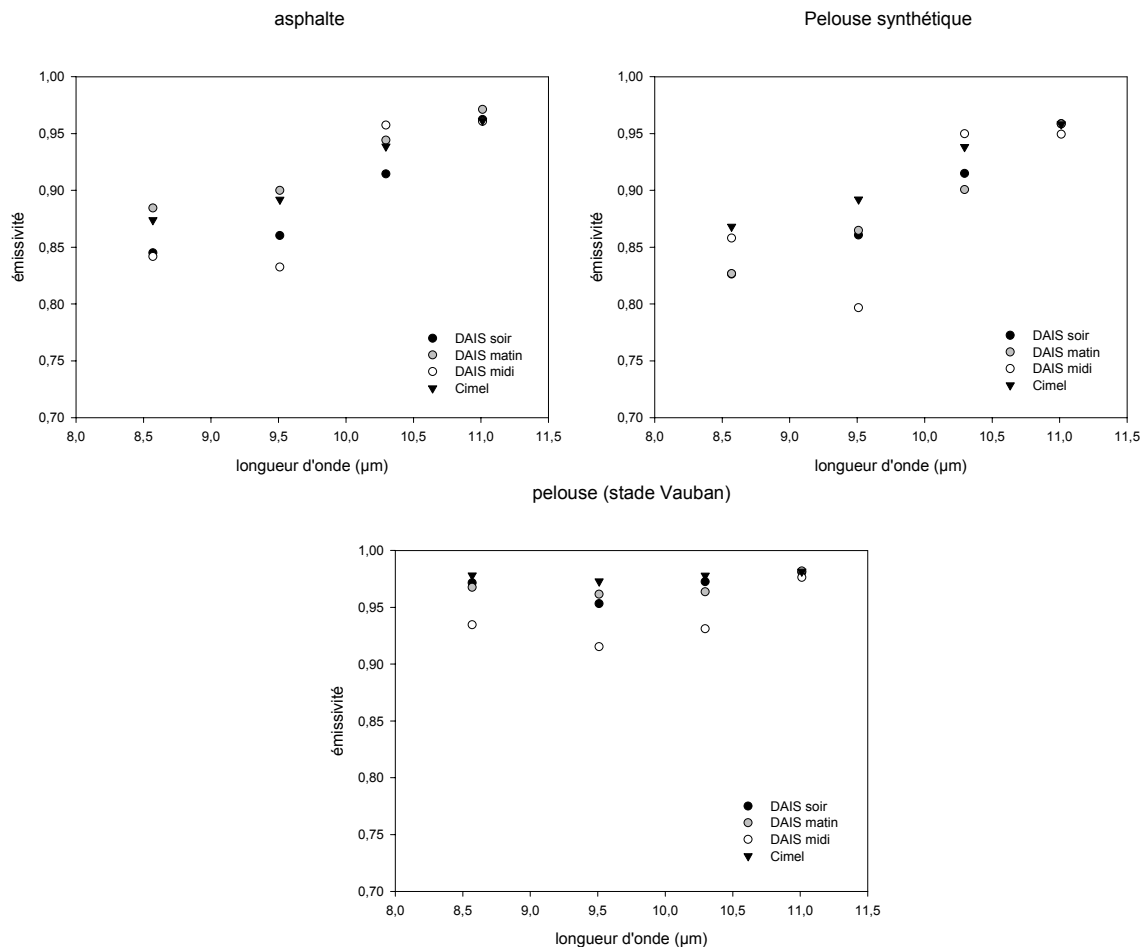


Figure 4.8 Comparaisons entre les émissivités déterminées pour les 3 vols DAIS et l'émissivité mesurée au sol

Cette comparaison montre que dans les 4 canaux, l'émissivité calculée sur les images DAIS du matin coïncide bien avec celle mesurée sur le terrain, pour pelouse et asphalte où la différence n'excède jamais 0,01. L'allure générale de la variation spectrale est bien restituée. Il en est sensiblement de même pour la pelouse synthétique où néanmoins les écarts peuvent atteindre 0,04 (9,5 μm). En revanche, les émissivités DAIS calculées pour les vols du soir, et plus encore de midi présentent des écarts bien plus importants avec les émissivités mesurées. Ces écarts sont difficiles à interpréter car ils peuvent avoir plusieurs origines : i) un biais sur l'étalonnage radiométrique de DAIS ; ii) des corrections atmosphériques imparfaites ; iii) un artefact lié à l'algorithme TES. Une autre explication qui peut être avancée proviendrait d'un gradient de température (hétérogénéité) plus important sur la surface à ces heures, alors qu'idéalement, il faudrait une surface homogène pour calculer l'émissivité. On note que l'écart entre mesure terrain et mesure DAIS atteint 0,10 pour le vol de la mi-journée sur la pelouse synthétique et 0,07 sur l'asphalte ainsi que sur l'herbe, dans le canal 75 dans les deux cas. C'est justement dans ce canal que l'on observe les écarts les plus marqués, alors que les écarts sont minimales dans le canal 77, y compris pour le vol de midi. Dans le canal 77, les écarts entre l'émissivité mesurée sur le terrain et l'émissivité calculée sur les images DAIS ne dépassent jamais 0,02. Il n'est pas exclu que l'imageur DAIS présente un défaut de linéarité aux luminances élevées qui se traduit par une surestimation des températures élevées (d'autres éléments dans ce sens seront notés par la suite).

Il est donc prudent pour la restitution des émissivités d'éviter les situations amenant des températures élevées.

Nous retiendrons donc que le vol de 7h fournit des valeurs d'émissivité en très bonne concordance avec les mesures réalisées au sol, et que ce sont les images de ce vol qu'il faudra utiliser de préférence lorsque l'on souhaitera déterminer l'émissivité d'une surface.

4.3.2.3 Cartes d'albédo et d'émissivité

i) La carte d'albédo que nous présentons ici (figure 4.9) concerne la partie du transect EW réalisé le 28 juillet à 11h30 entre le port du Rhin et le centre ville.

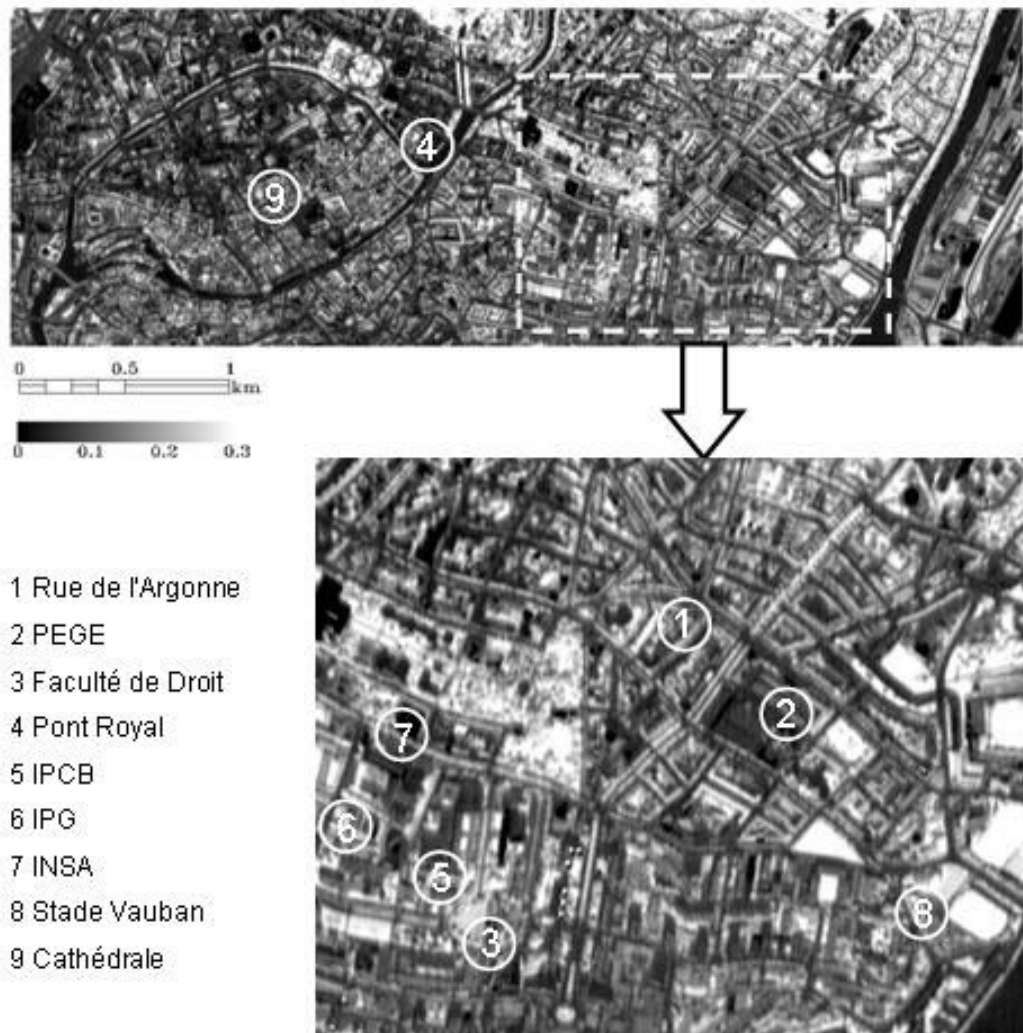


Figure 4.9 Cartographie d'albédo réalisée à partir des images DAIS (28/07, 11h30)

En calculant un albédo moyen sur toute cette zone, on obtient une valeur de 0,115, ce qui correspond à la valeur attribuée dans la littérature pour l'albédo au dessus d'une ville. Cependant, des différences d'albédo apparaissent en fonction du type de bâti. Ainsi, le centre ville, qui s'étend autour de la cathédrale (9), possède une forte densité de bâti qui se caractérise par des valeurs d'albédo faibles, au contraire des quartiers résidentiels se situant au NE de cette image (quartier Orangerie, quartier des XV). Les constructions de ces derniers sont plus espacées, et la végétation davantage présente, ce qui contribue à augmenter leur albédo. Cette cartographie fait particulièrement bien ressortir les cours d'eau du fait de leur très faible albédo (couleur sombre), comme nous pouvons le constater avec l'III qui encercle le centre ville, ou les bassins portuaires à l'Est de l'image. Inversement, les zones fortement végétalisées apparaissent en clair du fait de leur valeur d'albédo élevée, ce qui permet de bien les distinguer : c'est le cas des stades Vauban (8), ou du Jardin Botanique, situé entre la rue de l'Argonne et l'INSA (1 et 7). Le tracé des rues est bien visible, du fait des faibles valeurs d'albédo de l'asphalte, ainsi que les rangées d'arbres qui bordent certaines d'entre elles, comme c'est le cas du

boulevard de la Marne (axe orienté dans le sens NNE-SSW) entre le PEGE (2) et la rue de l'Argonne (1). Le zoom réalisé sur le secteur où se concentrent nos sites de mesures permet de mieux visualiser leur environnement. Il est intéressant de constater que l'environnement de l'IPG (6) présente des albédos plus élevés que celui du PEGE (2), ce qui confirme les mesures réalisées au sommet des mâts de ces sites (Cf 3.2.1.4).

ii) émissivité : en raison de leur meilleure concordance avec les mesures terrain (Cf 4.3.2.2), ce sont les émissivités calculées à partir des images de 7h qui sont retenues. Comme nous l'avons vu auparavant (3.4.4 et 4.3.2.2), les canaux 74 et 75 permettent de bien discriminer les surfaces car les émissivités y sont variables, contrairement aux canaux 76 et 77. L'exemple suivant (figure 4.10), qui présente l'émissivité d'une même partie de la ville dans les canaux 75 et 77 illustre parfaitement ce point. Il s'agit du secteur sur lequel a été effectué le zoom sur la carte d'albédo. Dans le canal 77, comme le montre la figure 4.10, toute identification est délicate, par contre, avec le canal 75, trois « niveaux de gris », correspondant à autant d'intervalles d'émissivité semblent se détacher :

- les teintes très claires (émissivités supérieures à 0,95), qui permettent de bien distinguer l'eau (coin SE) et la végétation (parc botanique, arbres le long de certaines rues...)
- les teintes très sombres (émissivités inférieures à 0,85), qui permettent de bien distinguer l'asphalte et le béton. Ainsi, les rues apparaissent très bien, tout comme l'esplanade de la Faculté de Droit, vaste surface de teinte noire au SW de l'image.
- Les teintes intermédiaires (émissivité entre 0,85 et 0,95), qui permettent de distinguer bon nombre de toits d'habitations dans ce secteur.

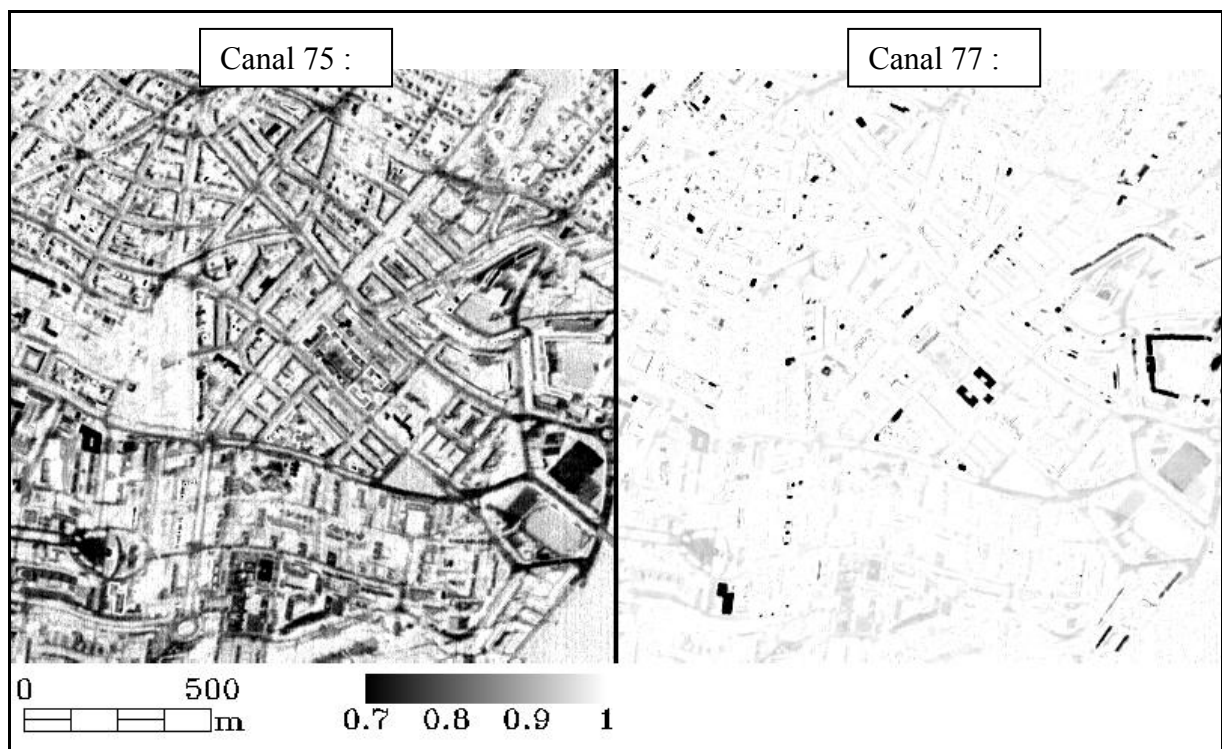


Figure 4.10 Cartographie d'émissivité réalisée à partir des images DAIS pour les canaux 75 et 77 (28/07, 7h)

Conclusion du chapitre :

Après avoir procédé aux rééchantillonnages et aux corrections atmosphériques, nous disposons à présent des paramètres nécessaires à l'obtention du bilan radiatif, à savoir l'albédo, l'émissivité et la température de surface. Les résultats à l'échelle locale sont globalement en bon accord avec les mesures terrain de contrôles, ainsi :

- l'albédo restitué à partir des images DAIS correspondant au vol de midi ne diffère pas fortement de celui mesuré sur le terrain, et la marge d'incertitude n'excède pas 10%. Il convient de préciser qu'à une échelle non locale, la restitution de l'albédo s'avère plus complexe en raison des ombres portées par les bâtiments, a fortiori pour les vols du soir et du matin
- les valeurs d'émissivité fournies par le vol DAIS de 7h sont en très bonne concordance avec les mesures réalisées au sol, avec une marge d'incertitude la plupart du temps nettement inférieure à 5%. La restitution d'émissivité est moins satisfaisante pour les deux autres vols, par conséquent, ce sont les images de ce vol qu'il faudra utiliser lorsque l'on souhaitera déterminer l'émissivité d'une surface
- les valeurs de température de surface obtenues aussi bien sur les images DAIS que sur les images hélicoptères apparaissent satisfaisantes, et la marge d'incertitude avoisine les 2°K. Toutefois, l'analyse des images DAIS laisse entrevoir que les températures de surface élevées pourraient être surévaluées sur les images.

Si nous disposons des moyens d'accéder au bilan radiatif à l'échelle locale et d'établir des cartes d'albédo, de température et d'émissivité à partir des images de télédétection, la validité et la signification de ces grandeurs devront être vérifiées et discutées à échelle non locale. Ceci sera abordé dans le chapitre 7.

5- SOLENE

Après avoir introduit brièvement ce modèle dans la section 1.3, il est temps à présent de le décrire plus en détail et de prendre connaissance des quantités à introduire et de quelle façon, ainsi que des différentes sorties. L'introduction de la géométrie urbaine sous forme d'un modèle de morphologie urbaine en trois dimensions va nous permettre de simuler à l'intérieur de la scène restituée et pour chaque élément de la géométrie les différents flux du bilan radiatif, la température de surface ainsi que le flux de chaleur sensible.

5.1 Description du modèle

SOLENE est organisé autour d'un nombre limité d'objets liés entre eux : le projet, qui regroupe tous les éléments nécessaires à une simulation, les géométries, les ciels, les descripteurs et les matériaux.

5.1.1 La géométrie

La géométrie peut être élaborée directement à partir du logiciel, en créant différentes formes et en choisissant leurs dimensions et leurs positions les unes par rapport aux autres, afin de reconstituer la géométrie concernée. Mais SOLENE permet surtout l'import d'une géométrie externe, élaborée avec une grande précision et reproduisant fidèlement la géométrie des quartiers étudiés. C'est dans cette optique que nous utilisons ce modèle, puisque nous disposons d'une restitution en 3 dimensions d'une partie de l'agglomération strasbourgeoise, élaborée à partir de TIPHON, logiciel de photogrammétrie aérienne mis au point par l'INSA. La mise en forme de ces données à un format utilisable par SOLENE a fait l'objet du travail de DEA de Julien Bernard (Bernard, 2002).

Afin d'être traitée, la géométrie apparaît sous forme d'un ensemble de faces planes disjointes, à chacune desquelles sera associé un matériau représenté par ses caractéristiques physiques. Un matériau détermine ainsi le comportement de la face en réponse aux phénomènes physiques qui lui sont appliqués. Il est renseigné par ses caractéristiques solaires, ainsi que ses propriétés lumineuses et thermiques. Les polygones constitutifs de la géométrie sont définis par les coordonnées de leur sommet, et possèdent chacun leur propre normale.

Dans le but de bien couvrir l'espace étudié et d'analyser un phénomène variable dans l'espace, une discrétisation spatiale est effectuée à l'aide d'une fonction de triangulation, et chaque face se retrouve ainsi constituée d'une série de contours, sous forme de triangles dans notre cas.

Précisons que le ciel, qui accompagne toutes les simulations, constitue une géométrie particulière, qui n'est pas modifiable par l'utilisateur (voûte hémisphérique), et sur laquelle on ne peut appliquer que certaines fonctions bien spécifiques.

Une visualisation graphique en 3 dimensions fournie par Open Inventor nous offre une représentation de toutes les géométries de la scène (figure 5.1).



Figure 5.1 Illustration de la géométrie dans SOLENE : exemple du quartier où se trouvent les sites du PEGE et de la rue de l'Argonne

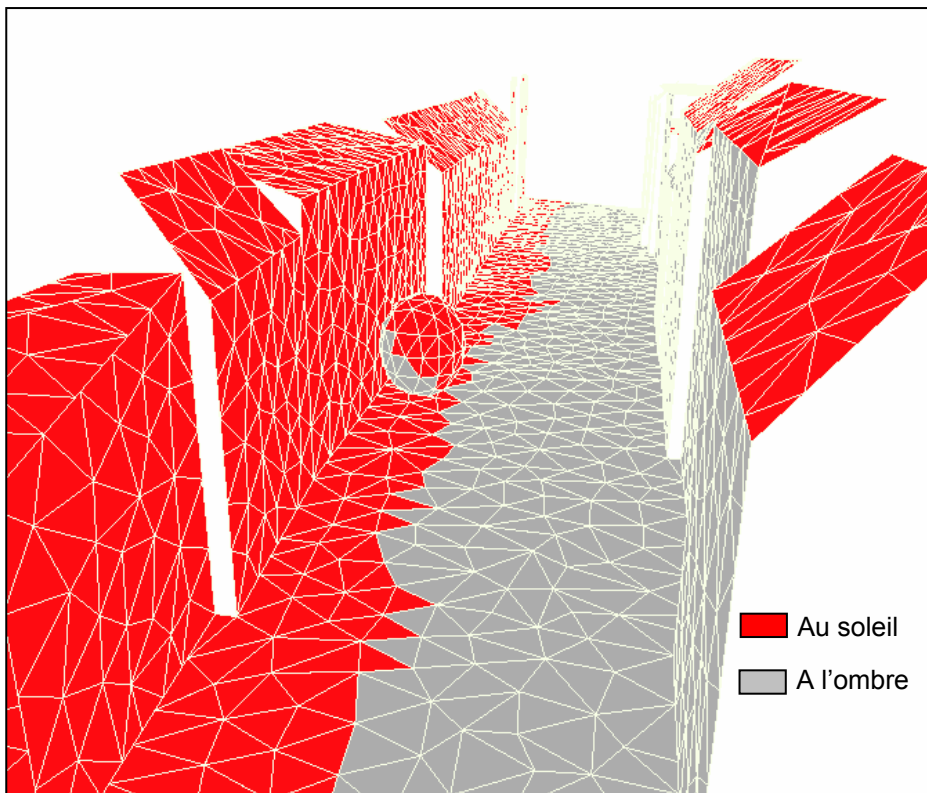


Figure 5.2 Tracé d'ombre par SOLENE sur le canyon de la rue de l'Argonne (14/08 à 10h)

5.1.2 Les descripteurs

L'information attachée aux contours ou aux faces est fournie sous forme de descripteurs qui permettent l'analyse et la visualisation des géométries suivant différents critères. Un descripteur peut être constant, ou variable au cours du temps et découler de différentes opérations. Il peut être :

- créé automatiquement à partir de la géométrie : il s'agit par exemple de l'aire ou du périmètre des facettes,
- fixé par l'utilisateur, comme c'est le cas dans la base des matériaux où on définit leurs caractéristiques (albédo, conductivité...) et où on les attribue pour chaque face de la géométrie,
- issus des résultats d'une simulation, comme la température de surface ou le rayonnement diffus,
- résultats d'opération entre deux descripteurs existants : par exemple l'addition du rayonnement direct et du diffus nous donne le global.

Notons que les valeurs des descripteurs obtenus après simulation apparaissent au niveau des contours, mais peuvent être globalisés au niveau des faces ou même de la géométrie : on peut alors obtenir des valeurs moyennes par face ou par entité géométrique.

5.1.3 Simulation

Le principe de fonctionnement de SOLENE consiste en une application de fonctions sur les géométries, allant des transformations géométriques (rotation, triangulation...) aux simulations de phénomènes physiques. Ces dernières concernent notamment les différents phénomènes physiques relatifs à l'ensoleillement et l'énergie solaire, à l'éclairement naturel provenant de la voûte céleste, au rayonnement et aux températures de parois.

A partir de l'interface du logiciel SOLENE, un certain nombre de fonctions sont accessibles, qui concernent principalement :

- les transformations géométriques (translation, rotation, triangulation...),
- la visualisation de géométries (choix des couleurs utilisées, descripteur affiché...),
- les opérations applicables aux descripteurs (création, calcul, modification...),
- les simulations de phénomènes physiques (ensoleillement, rayonnement, température de surface...).

Mais il existe aussi de nombreuses fonctions externes, qui s'exécutent en dehors de l'interface SOLENE, à l'intérieur d'une fenêtre DOS. Elles offrent une gamme plus étendue de simulations, permettent d'introduire des données supplémentaires en entrée (rayonnement solaire direct et diffus, rayonnement atmosphérique...) tandis que certaines constituent d'excellents outils d'analyse de résultats. Les heures s'expriment en Temps Solaire Vrai (TSV) dans SOLENE.

5.2 Ce qui doit être renseigné, et comment

5.2.1 Etapes préliminaires

5.2.1.1 Aspects géométriques et masques

La première étape d'une simulation SOLENE est basée sur les aspects géométriques, puisque c'est à partir de la localisation et de l'élévation des différents points que les premiers traitements sont effectués. Elle consiste à déterminer les effets de masques, d'intervisibilité entre les différentes mailles et entre chaque maille et le ciel. Cette étape ne requière aucune donnée prélevée lors de la campagne, puisque les informations à introduire sont uniquement relatives au lieu (latitude) ou au temps (date, heure).

Dans le but de bien couvrir l'espace à étudier, une discrétisation spatiale est effectuée à l'aide d'une fonction de triangulation. De la taille des mailles choisie lors de la triangulation dépendra la précision de la simulation, qui est effectuée au centre de gravité d'une maille et qui est valable sur toute son étendue.

La connaissance de la trajectoire du soleil permet d'effectuer une simulation d'ensoleillement à tout moment de l'année et de distinguer sur la scène les parties exposées au rayonnement solaire direct de celles à l'ombre, en tenant compte des effets de masques engendrés par la géométrie (figure 5.2). Seule la position du soleil à l'instant étudié et la configuration géométrique du site considéré interviennent lors de cette simulation. La position du soleil est déterminée dans le logiciel SOLENE par les équations de trajectoire solaire qui décrivent le mouvement apparent de la terre autour du soleil en fonction de l'équation du temps, de l'angle horaire, de la déclinaison, de l'altitude et de l'azimut. Le résultat est un descripteur nous indiquant à chaque pas de temps de la période simulée les parties de la scène exposées au soleil et celles à l'ombre.

5.2.1.2 Les facteurs de forme

De nombreux échanges d'énergie par rayonnement électromagnétique, amplifiés par les multiples réflexions entre les parois, ont lieu à l'intérieur du canyon entre les différents éléments qui le constituent. C'est pourquoi il convient de considérer chaque maille par rapport aux autres mailles de la scène. Ainsi, chaque élément de la scène se comporte comme un émetteur et un récepteur. Le calcul des flux échangés entre deux éléments dépend de leurs relations géométriques telle que leur distance et leur orientation relative, appréhendées au travers de leur facteur de forme (Miguet, 2000).

Pour chaque contour de chaque face de la scène discrétisée, une projection perspective grand angle couvrant l'ensemble de la scène est réalisée. Les facteurs de forme sont alors calculés avec tous les éléments visibles de la scène. Ils traduisent, à partir d'une facette, la proportion visible d'une autre facette par rapport à l'espace total visible (figure 5.3) : ils sont donc proportionnels à l'angle solide sous lequel une surface émettrice voit une surface réceptrice. La somme des facteurs de forme pour un élément est de 1 dans le cas d'une scène entièrement fermée, et inférieure à 1 dans le cas de scènes ouvertes vers le ciel, comme c'est le cas des canyons urbains. Plus la somme des facteurs de forme d'un élément est proche de 1, plus il est susceptible d'échanger de l'énergie avec les autres éléments. On obtient alors une matrice des facteurs de forme entre les facettes de la scène, ainsi que pour chaque contour, la somme des facteurs de forme avec la scène. Selon le même principe, les facteurs de forme de chaque contour sont évalués avec l'extérieur de la scène (environnement non modélisé et le ciel).

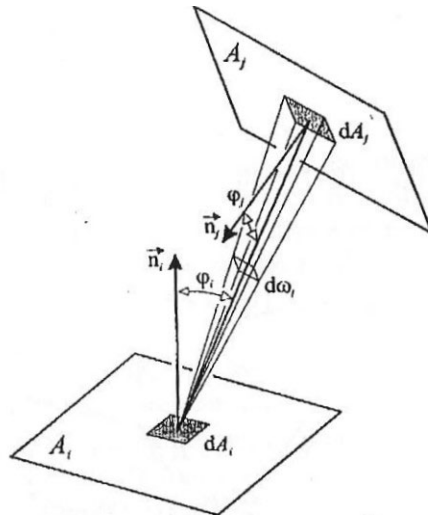


Figure 5.3 Facteur de forme entre 2 surfaces (d'après Vinet, 2000)

5.2.1.3 Le modèle de ciel

Le ciel intervient lors des simulations, et il convient donc de le modéliser au préalable, afin de distribuer la luminance. En raison de la non uniformité des valeurs de luminance dans le ciel, il est nécessaire de subdiviser l'hémisphère, afin que chaque élément soit porteur d'une information spécifique. Chaque élément de surface de ce ciel artificiel est alors considéré comme un émetteur d'énergie isotrope (Groleau, 2000). La potentialité d'éclairage des différentes parties du ciel est fonction notamment de la position du soleil, autour duquel les luminances seront naturellement plus élevées. La triangulation se fait de la même manière que pour la géométrie urbaine. Dans les traitements, la voûte céleste s'apparente à une sorte de dôme qui recouvre la scène, dont seuls les angles solides et directions sont pris en compte. La scène urbaine dans son ensemble est donc située au centre de l'hémisphère.

Les radiances sont calculées à partir d'un modèle de ciel mis au point par Perez (1993). Il repose sur une fonction de distribution statistique qui se base sur des mesures effectuées pendant une longue période. En plus de la position de l'élément de ciel considéré sur la voûte céleste, ce modèle prend en compte le temps et le lieu qui fixent la position du soleil dans le ciel ainsi que le type de ciel. Ce dernier est défini à l'aide de deux coefficients que nous devons introduire, l'un renseignant sur la couverture nuageuse, l'autre sur l'épaisseur des nuages (luminosité). Ce modèle présente l'avantage de pouvoir simuler tout types de ciel à partir de ces deux coefficients, et de bien s'adapter à la grande variabilité des conditions climatiques européennes.

5.2.1.4 Détermination du rayonnement solaire incident

Une fois ces étapes franchies, on peut déterminer le rayonnement solaire parvenant sur la scène, sous forme directe ou diffuse. Ces deux composantes sont évaluées séparément et serviront de paramètres d'entrée à toutes les simulations de température de surface ou d'échanges radiatif, et demandent donc d'être calculées avec précision. C'est pourquoi nous utilisons une fonction externe à SOLENE, qui nous permet d'entrer les valeurs de rayonnement mesurées lors de la campagne.

Le rayonnement direct est évalué à chaque pas de temps pour les facettes qui sont exposées au soleil. En l'absence de valeurs mesurées, le rayonnement solaire direct est calculé à partir d'une formule de Perrin de Brichambaut qui distingue trois types de ciel pour lesquels elle calcule la valeur de l'éclairage solaire direct pour une surface perpendiculaire aux rayons solaires. Les valeurs sont ensuite pondérées par l'inclinaison et l'orientation des éléments de la scène. Mais puisque nous disposons de mesures précises recueillies sur une surface normale, elles serviront d'entrées au modèle, et le rayonnement direct incident est simplement calculé pour chaque facette éclairée en fonction de l'angle d'incidence solaire.

Le calcul du rayonnement diffus repose sur la distribution des luminances obtenues par le modèle de ciel. Il consiste à identifier les portions de ciel vues par un élément de la scène, et à cumuler les luminances de ces éléments en tenant compte de l'angle solide et de l'angle d'incidence sous lesquels ce point voit les éléments du ciel (Miguet, 2000). Puis lorsque, comme dans notre cas, le rayonnement diffus est mesuré sur une surface horizontale dégagée, il est comparé à celui obtenu à partir du modèle de ciel. Les valeurs issues du modèle de ciel sont alors corrigées grâce aux mesures terrain, ce qui permet une nouvelle distribution des luminances du ciel. Le rayonnement diffus parvenant sur chaque maille est alors déterminé à partir de ces valeurs en reprenant l'opération initiale.

Les données recueillies sur le toit de l'IPCB, site de référence pour les mesures de rayonnement servent donc de paramètres d'entrée. Elles sont moyennées au quart d'heure, qui est le pas de temps choisi pour nos simulations. Nous souhaitons travailler à un pas de temps assez court afin de bien prendre en compte les variations. Par ailleurs, ce pas de temps est celui utilisé pour moyennner les mesures de température de surface pour la rue et le mur réalisées avec le radiomètre Everest. L'addition des rayonnements direct et diffus donnée par une fonction externe donne le rayonnement global, pour chaque facette et pour chaque pas de temps.

5.2.2 Paramètres d'entrée et préparation d'une simulation

5.2.2.1 Constitution de la base des matériaux :

Il convient à présent de définir les différents matériaux présents dans la scène, et de les affecter aux faces de la géométrie, qui doivent être homogènes dans leurs propriétés. Nous allouons un matériau différent pour les toits, pour la rue, pour les façades et un dernier pour la végétation. Chaque matériau est défini par un certain nombre de caractéristiques, à savoir ses propriétés solaire et thermique que nous définirons ultérieurement (cf. 6.2.2 et 7.1)

5.2.2.2 La fonction transitoire-h-option1c

C'est la fonction qui va nous permettre d'obtenir les températures de surface, mais également les flux en courte et grande longueur d'onde, ainsi que le flux de chaleur sensible. Elle demande un certain nombre de paramètres d'entrée, que nous exposons ici dans l'ordre demandé. Ils concernent soit des données météorologiques mesurées (température de l'air, rayonnement infrarouge descendant...), soit des résultats de simulations préliminaires (facteur de forme, rayonnement global...), soit des données d'initialisation (température de surface au pas de temps précédent le lancement de la simulation) et font appel à la base des matériaux.

- 1) Nombre de période à simuler. Il est possible de reproduire plusieurs fois à la suite la même simulation, mais comme nous disposons de données pour chaque jour, nous travaillons sur une seule période comprenant toute la durée étudiée.
- 2) Heure de début. Nous avons choisi de commencer notre simulation à minuit étant donné la meilleure homogénéité des températures de surface à l'intérieur du canyon à ce moment là, et de leur proximité avec les températures de l'air.
- 3) Heure de fin. Nous effectuons une simulation sur trois journées consécutives, afin que le modèle prenne en compte la dynamique des deux journées précédant la journée de comparaison entre les mesures et la modélisation.
- 4) Température de l'air à chaque pas de temps. Les données recueillies rue de l'Argonne sont présentées dans un fichier texte sous forme d'un tableau avec l'heure et la température de l'air correspondante.

5) Température de surface initiale. Il s'agit de la température au pas de temps précédent le début de la simulation. Afin de faciliter le renseignement de ce terme, nous débutons la simulation en milieu de nuit, et nous lui attribuons la valeur de la température de l'air.

6) Température dans la première couche de mur ou de sol au pas de temps précédent le début de la simulation. La simulation débutant à minuit, on peut considérer cette valeur proche de la température de surface, et cette valeur sera donc reconduite ici.

7) Température dans la deuxième couche de sol, qui correspond également à celle au pas de temps précédant le début de la simulation. Comme pour la couche précédente, la valeur de la température de surface est reconduite.

8) Température de l'air à l'intérieur des bâtiments et à un mètre de profondeur dans le sol. Chaque facette « mur » est en contact avec une ambiance intérieure dont on doit donner la température. On la fixe à 22°C étant donné le temps perturbé lors des jours précédents le début de la simulation. Concernant le sol, on prendra la température de l'air moyenne des journées précédentes soit 20°C.

9) Les températures sont fixées pour les arbres dont la température de surface est considérée égale à celle de l'air ambiant grâce à l'évapotranspiration. Dans le modèle de calcul :

- l'arbre reçoit de l'énergie solaire sans qu'elle ne modifie sa température de surface, mais pour les échanges radiatifs, la partie réfléchi par l'arbre est considérée.
- l'arbre joue un rôle de masque solaire total pour le rayonnement global vers les façades et pour les multi-réflexions solaires, ainsi que pour les échanges radiatif grande longueur d'onde. Mais il intervient dans les échanges grande longueur d'onde et a donc un effet radiatif vers les façades et le sol. Il reçoit du rayonnement grande longueur d'onde du sol et des façades, qui ne modifient pas non plus sa température de surface.

10) Flux solaire incident : il s'agit des flux simulés à partir des valeurs de rayonnement direct et diffus mesurées sur une surface horizontale.

11) Albédo : un descripteur est créé permettant d'attribuer un albédo à chaque face de la géométrie étudiée.

12) Emissivité : un descripteur est créé permettant d'attribuer une émissivité à chaque face de la géométrie étudiée. Il s'agit de l'émissivité entre 5 et 50 μ m, ce qui rend une estimation précise délicate. Nous la fixons à 0,98 pour tous points de la scène.

13) Caractéristiques thermiques : à l'aide d'un fichier texte, on fournit au modèle les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés : leur épaisseur, leur conductivité, leur masse volumique et leur capacité calorifique.

14) Coefficient convectif extérieur. Il ne représente que le phénomène de convection, et n'inclut pas de terme de transfert radiatif linéarisé comme c'est souvent le cas en thermique du bâtiment. Nous attribuons la même valeur à chaque élément de la scène.

15) Coefficient de transfert intérieur, que nous fixons à 9 dans les bâtiments, et auquel nous fixons une valeur très forte dans les sols pour fixer la température à une certaine profondeur (=1000).

16) Surface : c'est un descripteur créé en même temps que la géométrie, qui indique la surface de chacune des mailles obtenues après triangulation.

17) Facteurs de forme entre les facettes de la scène élaborés auparavant.

18) Facteurs de forme de chaque facette avec le ciel, calculés auparavant.

19) Pas de temps utilisé lors de la simulation. Nous avons choisi un pas de temps de 15 minutes, soit 900 secondes.

20) Rayonnement atmosphérique descendant à chaque pas de temps, si ce dernier est mesuré. En l'absence de renseignement, SOLENE calculera lui même ce flux. Les données recueillies sur le toit de l'IPC B sont donc réunies dans un fichier texte sous forme d'un tableau pour imposer les valeurs mesurées en entrée du modèle.

21) Nom du fichier résultat : ces fichiers nous donnerons un compte rendu de la simulation, et si un problème se pose, il apparaîtra dans ces fichiers.

22) Nom du fichier de commande à créer : c'est ce fichier qui lancera la simulation.

L'exécution de cette fonction permet d'obtenir :

- les températures de surface extérieures,
- les températures au premier nœud,
- les températures au deuxième nœud du sol,
- les températures de surface intérieures,
- les flux nets dans les domaines solaire et infrarouge,
- les flux convectifs à la surface extérieure ;

5.3 Le déroulement de la simulation

5.3.1 Flux solaire net

Le modèle calcule d'abord les flux solaires nets par l'intermédiaire de la méthode dite « de radiosité ». Elle nécessite d'avoir calculé au préalable les facteurs de forme et le flux solaire incident en provenance du ciel, et d'avoir renseigné l'albédo des surfaces étudiées. A partir de ces paramètres d'entrée, le modèle va déterminer la contribution résultant des réflexions multiples dues à l'effet de piège à l'intérieur du canyon. Il recherche tout d'abord l'énergie totale réfléchie par la scène puis la distribue. La contribution d'une face sur les autres est déterminée grâce à une méthode à raffinement progressif, qui commence par considérer le contour réfléchissant le plus, et l'apport de l'énergie qu'il réfléchit sur les autres contours. La radiosité des autres éléments augmente à chaque itération, et ces éléments distribuent à leur tour de l'énergie. Le processus se poursuit jusqu'à ce que le flux à distribuer devienne inférieur à un seuil défini par l'utilisateur.

Ainsi, pour un contour j , $\Delta M(j) = \text{albedo}(j) * \Delta M(i) * F_{ij} * (\text{surf}(i) / \text{surf}(j)) * \text{trans}(ij)$

avec $\Delta M(j)$: l'énergie réfléchie par la face j

$\Delta M(i)$: énergie réfléchie par la face i qui présente l'albédo le plus élevé

$F_{ij} * \text{surf}(i) / \text{surf}(j)$: facteur de forme réciproque

$\text{Trans}(ij)$: transmission

Cette opération nous permet d'obtenir le flux réfléchi après les réflexions multiples, le flux incident, ainsi que le flux absorbé selon les relations suivantes :

M = flux réfléchi après les réflexions multiples

M^0 = M / albedo = flux incident

$M^0 - M$ = flux absorbé qui correspond donc au flux solaire net.

5.3.2 Températures équivalentes

Afin d'initialiser les flux de grandes longueur d'onde, des températures équivalentes sont calculées à chaque pas de calcul. Cette opération se base sur les flux solaires nets, la conductivité et l'épaisseur des matériaux de la géométrie, le coefficient externe de convection ainsi que des températures de l'air, et de l'intérieur des murs.

$$h(T_{eq} - T_{air}) + K(T_{eq} - T_{sol1}) = \phi_{clo,net}$$

$$D'où on déduit : T_{eq} = \frac{(h \times T_{air} + K \times T_{sol1} + \phi_{clo,net})}{(h + K)}$$

Avec :

T_{eq} : température équivalente

h : coefficient de transfert

T_{air} : température de l'air

K : conductivité (conductance par rapport à l'épaisseur)

T_{sol1} : température du sol

$\phi_{clo,net}$: flux d'énergie échangé par rayonnement en courte longueur d'onde.

A l'issue de cette étape, nous possédons une première approximation des températures de surface, qui seront revues par la suite.

5.3.3 Flux en grande longueur d'onde

Pour chaque élément de la géométrie, le modèle calcule à présent les flux de grandes longueurs d'ondes avec le ciel et les autres surfaces. Il s'appuie sur les facteurs de forme, préalablement calculés pour chaque élément, aussi bien avec les autres éléments de la scène qu'avec les éléments de la voûte céleste. Pour les flux infrarouges émis par les différentes parois la loi de Stefan-Boltzmann (annexe A) est utilisée, à partir des températures de surface précédemment calculées et de leur émissivité. Pour déterminer les flux infrarouges envoyés par le ciel, le modèle a recours à une équation empirique proposée par Monteith (2001), faisant intervenir la température de l'air (en °C) dans l'expression du rayonnement de grande longueur d'onde du ciel dégagé :

$$L \downarrow = 213 + 5.5 \times T_{air}$$

Ainsi, pour chaque élément (i) de paroi,

flux de grandes longueur d'onde échangés avec le ciel :

$$\varphi_{ciel} = F_{i-ciel} \times (\varepsilon_i \times \sigma \times T_s^4 - L \downarrow)$$

flux de grande longueur d'onde échangés avec les autres parois :

$$\varphi_{GLO} = F_{ij} \times \sigma \times \varepsilon_i (T_{Si}^4 - T_{Sj}^4)$$

avec :

F_{i-ciel} : facteur de forme entre l'élément i et le ciel

ε_i : émissivité

T_s : température de surface

$L \downarrow$: rayonnement atmosphérique en grande longueurs d'onde

F_{ij} : facteur de forme entre un élément i et les autres parois

Le flux de grande longueur d'onde est donc obtenu par addition du flux échangé avec le ciel et du flux échangé avec les autres parois. Notons que si les flux atmosphériques sont mesurés, ils peuvent être introduits en entrée dans le modèle, sous forme d'un fichier texte similaire à celui utilisé pour les températures de l'air. C'est le cas lors de nos simulations.

Toutes les données sont à présent réunies pour obtenir les températures de surface en appliquant le bilan thermique. Les températures sont calculées à la surface, mais également dans les murs et le sol, ainsi qu'à l'intérieur des bâtiments. Nous obtenons ainsi les températures en 5 points.

5.3.4 Température de surface

Pour les parois des bâtiments et la couche de sol, il est recommandé de représenter 2 couches de matériaux afin de faire intervenir l'inertie thermique. En effet, les parties qui reçoivent directement le rayonnement bénéficient d'une réponse plus rapide que les parties plus profondes. En dehors des caractéristiques thermiques des matériaux, la seule chose qui différencie le sol des parois des bâtiments est la température intérieure. Dans le cas des sols, la température à 1 mètre de profondeur est considérée comme constante et est fixée comme équivalente à la température moyenne de l'air sur 24 heures. En revanche, concernant les parois, elle correspond à la température de l'air à l'intérieur des bâtiments, et elle peut varier dans la journée. Cependant, nous la considérons comme constante lors de nos simulations.

Dans le cas d'un sol, on distingue une couche superficielle décrivant le revêtement utilisé (asphalte, pavé, béton...) sur une épaisseur de quelques centimètres d'une couche sous-jacente (terre, graviers...). Pour les parois des bâtiments, même dans le cas de structures homogènes, il est recommandé de séparer en 2 couches pour la raison évoquée précédemment. Dans les deux cas, on se retrouve en présence de deux couches, e1 et e2 (figure 5.4).

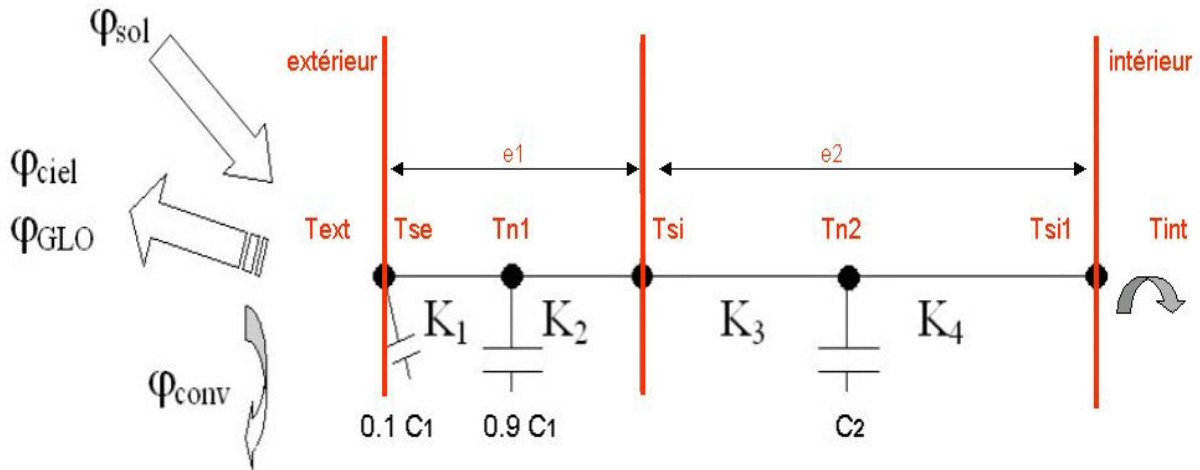


Figure 5.4 Modèle thermique d'une paroi

Le bilan thermique est calculé à chaque changement de couche (Tse, Tsi et Tsi1) et au centre de chaque couche (Tn1 et Tn2) :

- la surface extérieure de la première couche, en contact avec l'air, participe directement aux échanges énergétiques. Les flux solaire et infrarouge ainsi que le flux convectif interviennent donc dans le bilan thermique. Les nœuds de surface sont affectés d'une faible capacité calorifique ($1/10^{\text{ème}}$ de cette première couche de sol) en raison de la réponse thermique rapide des échanges superficiels. La température de cette couche est influencée par les variations de la température extérieure, et bénéficie donc d'une réponse thermique rapide aux variations externes (température de l'air, flux solaires et infrarouges). Le bilan thermique au nœud Tse s'écrit :

$$\frac{C_1}{10} \frac{dT_{Se}}{dt} + K_1(T_{Se} - T_{n1}) + h_c(T_{Se} - T_{n1}) + \varphi_{GLO} + \varphi_{ciel} = \alpha \cdot \varphi_{sol}$$

avec :

C_{sol1} : capacité équivalente du sol ou du mur

K_1 : conductance du mur entre les températures de surface extérieure (T_{Sext}) et dans la première couche de sol ou de mur (T_{sol1})

h_c : coefficient externe de convection

φ_{GLO} : flux de grande longueur d'onde échangé avec les parois

φ_{ciel} : flux de rayonnement en grande longueur d'onde échangé avec le ciel

φ_{sol} : flux de rayonnement échangé en courte longueur d'onde

- Le nœud dans la première couche, qui indique la température de cette première couche proprement dite, qui n'est ni en contact avec l'air, ni avec la couche sous-jacente. Contrairement au cas précédent, la réponse thermique est peu rapide et la capacité calorifique est fixée à 9/10^{ème} de la capacité totale du sol. La réponse à un apport énergétique est ici moins marqué. Le bilan au nœud Tn1 s'écrit :

$$\frac{9C_1}{10} \frac{dT_{n1}}{dt} + K_1(T_{n1} - T_{Se}) + K_2(T_{n1} - T_{Si}) = 0$$

- Le nœud à l'interface entre les 2 couches, c'est à dire entre la couche superficielle asphaltée et la couche suivante (terre, graviers...) dans le cas d'un sol, et entre 2 matériaux dans le cas de parois. Le bilan au nœud Tsi s'écrit :

$$K_2(T_{Si} - T_{n1}) + K_3(T_{Si} - T_{n2}) = 0$$

- Le nœud dans la 2^{ème} couche, qui indique la température de cette couche, moins sensible aux fluctuations de la température de l'air et du rayonnement. Le nœud est donc affecté d'une forte capacité calorifique. Le bilan au nœud Tn2 s'écrit :

$$C_2 \frac{dT_{n2}}{dt} + K_3(T_{n2} - T_{Si}) + K_4(T_{n2} - T_{Si1}) = 0$$

- La partie intérieure du mur, au contact avec l'air des pièces du bâtiment est influencée par le coefficient d'échange convectif à l'intérieur des bâtiments. Le bilan au nœud Tsi1 s'écrit :

$$K_4(T_{Si1} - T_{n2}) + h_{int}(T_{Si1} - T_{int}) = 0$$

5.3.5 Etude de la convergence des températures

Les températures de surface obtenues à ce stade sont comparées avec celles obtenues précédemment. Si l'écart est trop important, le calcul des flux en grande longueur d'onde est reffectué en prenant en compte les dernières températures de surfaces obtenues, et à l'issue de cette opération, de nouvelles températures de surface seront calculées. Le modèle procède à cette itération tant que l'écart maximum de température de surface entre deux itérations n'est pas inférieur à 0,1°C. Le processus est valable et réitéré à chaque pas de temps, et les résultats constituent l'initialisation pour le pas de calcul suivant.

5.4 Quelles sont les « sorties »

Nous rappelons que préalablement à cette simulation à partir de la fonction transitoire-h-option1c, le rayonnement solaire incident a été simulé à chaque pas de temps. La figure 5.5. représente le flux solaire global reçu par chaque facette à 10h, le 14 août.

Une fois que le test de convergence de température est réussi, les températures de surface et intérieures des parois sont sauvegardées, ainsi que le flux solaire net, le bilan en grande longueur d'onde, et les flux convectifs. Les sorties du modèle sont donc les suivantes, pour chaque pas de temps :

Ts : la température de surface extérieure (figure 5.6)

Tn1 : la température au premier nœud intérieur

Tn2 : la température au 2^{ème} nœud intérieur

Tsi1 : température de surface intérieure à la première couche de paroi (à l'interface entre la première et la 2ème paroi)

Tsi2 : température de surface intérieur des parois dans la cas de parois à 2 couches. Cette grandeur n'est pas calculée pour le sol, puisque, rappelons le, nous considérons la température à 1 mètre de profondeur comme étant constante durant la simulation

GLO : le bilan radiatif en grande longueur d'onde

GLOs : part du rayonnement infrarouge émis par la surface qui est échangée avec d'autres surfaces

GLOc : part du rayonnement infrarouge émis par la surface qui est renvoyée vers l'atmosphère

Conv : le flux convectif

Conclusion du chapitre :

Afin de confronter les mesures avec le modèle, nous allons lancer une simulation sur une période de trois jours et un pas de temps de 15 minutes, avec des conditions météorologiques favorables, c'est à dire un ciel clair et un vent faible, afin de bien analyser les aspects solaires et radiatifs. La comparaison mesures/modélisation s'effectuera lors de la troisième journée afin que SOLENE prenne en compte la dynamique des journées précédentes.

SOLENE dispose d'un certain nombre de fonctions externes permettant l'analyse des résultats que nous utilisons au long de ce travail. Il s'agit notamment de fonctions d'analyse des valeurs d'un descripteur (température de surface, rayonnement global...) en fonction du temps. L'analyse peut être effectuée aussi bien à l'échelle ponctuelle, c'est à dire en un point du maillage, à l'échelle d'une surface, par exemple du toit ou d'un mur d'un bâtiment, qu'à l'ensemble de la rue. Dans les deux derniers cas, l'analyse peut se faire sous forme de valeur cumulée des valeurs sur l'ensemble des mailles de la surface considérée, mais également par des valeurs moyennes ainsi que des valeurs moyennes pondérées par la surface.

Par ailleurs, des fonctions de calcul spécifiques permettent de placer des capteurs fictifs dans la scène et de comparer les grandeurs obtenues par les capteurs sur le terrain et les capteurs virtuels dans la simulation. C'est ainsi que nous procédons pour confronter les sorties du modèle avec le rayonnement (solaire ou infrarouge) mesuré sur le terrain. Il est également possible de déterminer le champ de vision d'un capteur, ce qui nous permet de comparer les températures de surfaces mesurées et modélisées sur les mailles visées par le capteur. Nous commençons par confronter mesures et modélisation à l'échelle du canyon, avant de passer par la suite à l'échelle du fragment urbain.

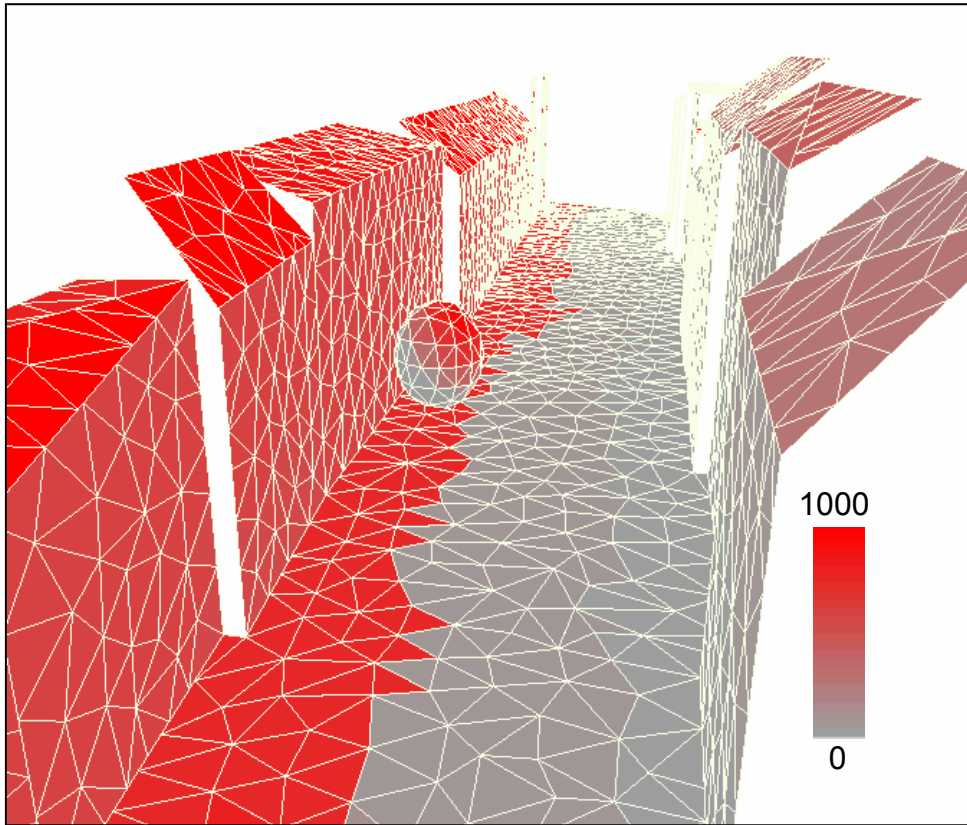


Figure 5.5 Rayonnement solaire global (W/m^2) simulé par SOLENE dans le canyon de la rue de l'Argonne (14/08 à 10h)

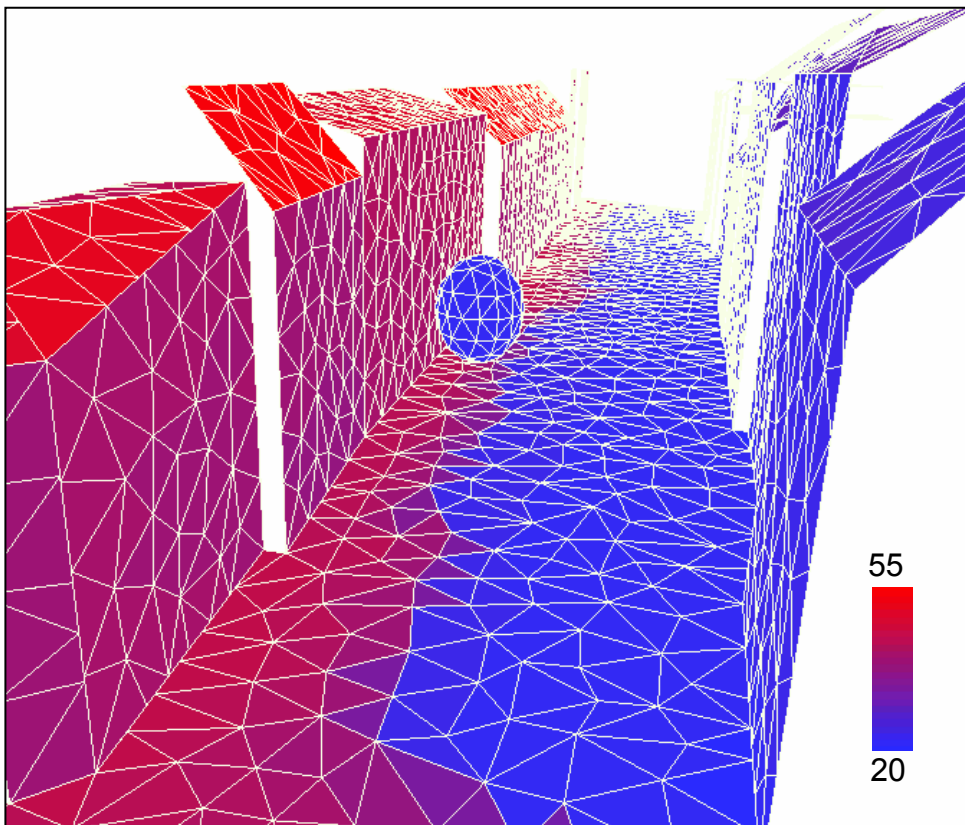


Figure 5.6 Température de surface ($^{\circ}\text{C}$) simulée par SOLENE dans le canyon de la rue de l'Argonne (14/08 à 10h)

6- Comparaison modèle/mesures intra-canopée

L'objectif à ce stade est de mettre en regard les mesures des paramètres et grandeurs effectuées aux différents points du canyon instrumenté et les sorties du modèle. Il s'agit d'examiner si le modèle est capable de restituer exactement les grandeurs, et en particulier leurs variations temporelles, mesurées. Cette comparaison doit permettre de valider la pertinence des paramètres mis dans le modèle, de même que sa conception elle-même le cas échéant.

Dans un premier temps, nous souhaitons confronter le modèle aux mesures relatives au rayonnement global et à ses composantes, puis dans un deuxième temps à des mesures radiométriques de température de surface, ponctuelles obtenues à l'aide de l'EVEREST, ou surfaciques réalisées à l'aide d'une caméra thermique.

6.1 Domaine du rayonnement global

Le rayonnement global incident est, comme nous l'avons vu, obtenu par addition des rayonnement diffus et direct mesurés sur un plan horizontal, auxquels s'ajoute une composante due au rayonnement réfléchi par les autres faces de la scène.

Une fonction externe de SOLENE nous permet de simuler le rayonnement parvenant à un capteur fictif placé dans la scène, avec une orientation à définir. Ainsi, avons-nous placé différents capteurs dans notre géométrie SOLENE correspondant à leur emplacement réel, de manière à simuler le rayonnement incident et réfléchi, aussi bien perpendiculairement que parallèlement aux façades et ce pour 3 niveaux. L'objectif de cette opération est de comparer le rayonnement mesuré par les capteurs et la même grandeur simulée par le modèle, et de valider les entrées d'albédo.

6.1.1 Le rayonnement global incident

Cette simulation fait d'emblée apparaître que la géométrie du canyon est parfaitement prise en compte par le modèle : à partir du moment où le capteur reçoit du rayonnement direct, le rayonnement incident simulé suit remarquablement la courbe des valeurs mesurées pour atteindre son maximum autour de midi solaire (figure 6.1). Le même constat est fait pendant la phase de décroissance.

Puis lorsque le capteur est entièrement à l'ombre, il ne perçoit plus que du rayonnement sous forme diffuse. Si en début de journée, la superposition était parfaite entre le rayonnement mesuré et simulé, on retrouve pour la fin de la journée des valeurs simulées très légèrement inférieures à celles mesurées. Cet écart peut provenir du rayonnement réfléchi par la façade orientée vers l'WSW. L'influence des façades et les réflexions multiples qu'elles occasionnent sont examinées lors des simulations suivantes.

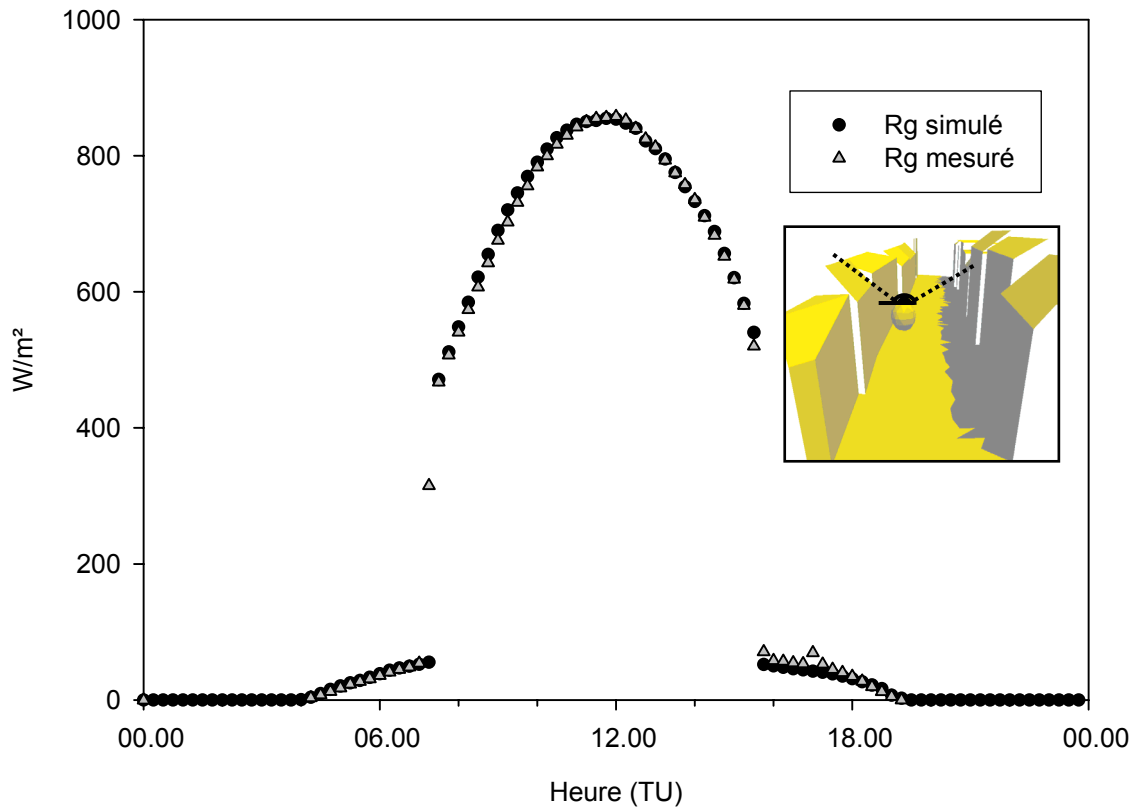


Figure 6.1 Comparaison entre le rayonnement global incident mesuré et simulé sur une surface horizontale (28/07/2002, niveau 2)

6.1.2 Choix des albédos et rayonnement réfléchi.

Il s'agit à présent de discuter des albédos que nous affectons à chaque élément de la géométrie, et de voir si SOLENE prend bien en compte les réflexions à l'intérieur du canyon.

L'albédo est un paramètre qu'il convient de bien renseigner, car la capacité d'un matériau à absorber ou à réfléchir le rayonnement solaire se répercute sur sa température de surface. Comme nous le montre la figure 6.2, à une diminution d'un dixième de l'albédo correspond une hausse de la température de surface d'environ 3°C au moment où elle est la plus élevée. Ce paramètre nécessite donc d'être déterminé avec une bonne précision. (NB : les chiffres indiqués ici se rapportent à la simulation de la température du fond du canyon, examinée ultérieurement ; ils n'ont pas de validité générale).

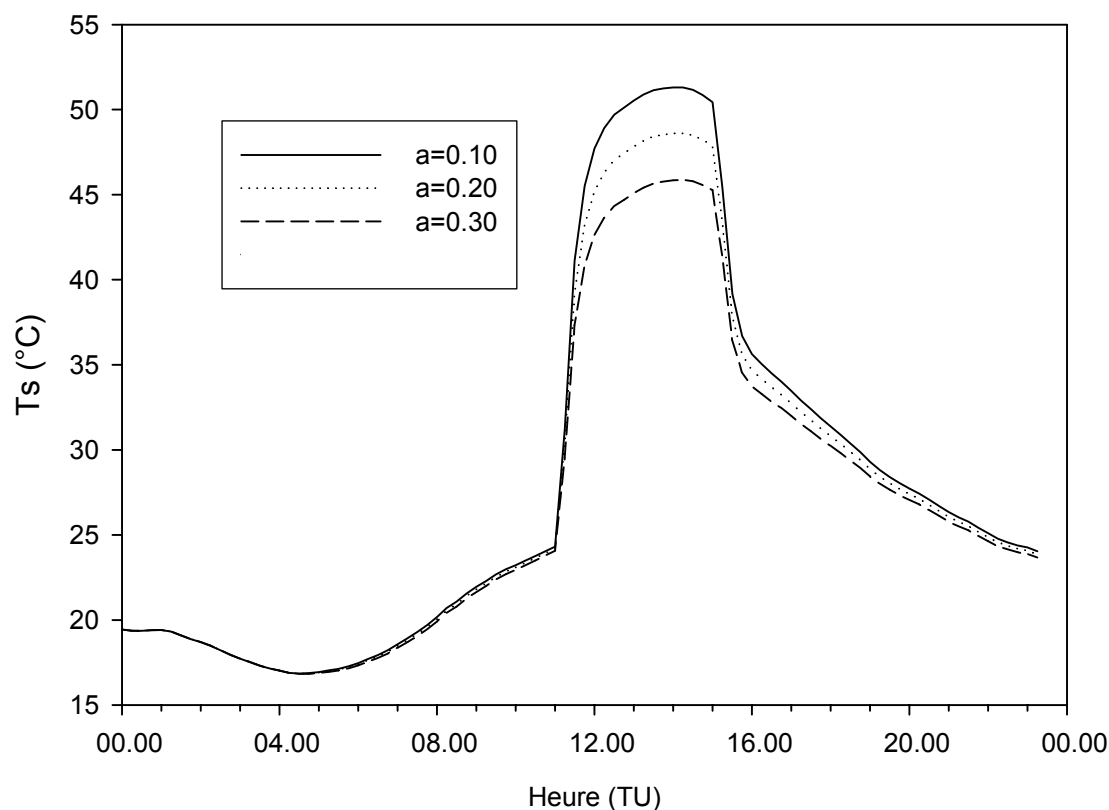


Figure 6.2 Illustration de la sensibilité de la température de surface à la valeur d'albédo

6.1.2.1 Fond du canyon

Pour le fond du canyon, 2 possibilités s'offrent à nous pour fixer une valeur d'albédo à cette surface :

- de nous baser sur les mesures d'albédo terrain, au dessus de surfaces asphaltées, mesures voisines de 0,10.
- de déterminer l'albédo à partir des mesures de rayonnement global réfléchi réalisées au premier niveau de l'échafaudage : la valeur expérimentale du rapport global réfléchi sur global incident est de l'ordre de 0,14 comme vu section 3.2.1.4, notamment en milieu de journée.

Le fond du canyon est modélisé tel une couche plate, englobant aussi bien la rue et les trottoirs que les parvis des immeubles, qui pour certains possèdent des plates-bandes en végétation. Son albédo s'éloigne donc de celui d'une surface d'asphalte homogène. Il nous semble plus réaliste d'utiliser les valeurs des mesures d'albédo du fond du canyon réalisées au premier niveau de l'échafaudage, même si ces dernières intègrent vraisemblablement une petite partie de la façade.

Ceci est confirmé par la simulation du rayonnement réfléchi. En plaçant dans notre géométrie un capteur dont l'emplacement correspond à celui du capteur installé au premier niveau, la comparaison entre mesure et simulations nous conforte dans le choix d'affecter au fond du canyon l'albédo déduit des mesures réalisées au premier niveau, soit 0,14 (figure 6.3).

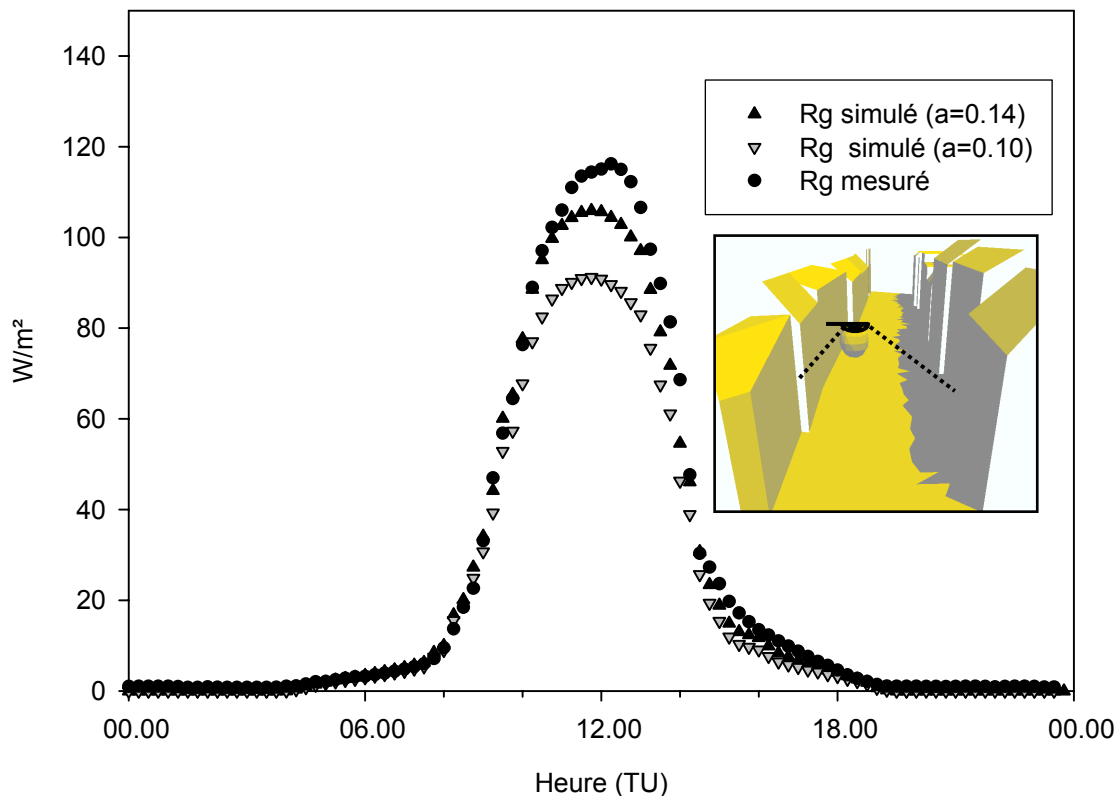


Figure 6.3 Comparaison entre le rayonnement global réfléchi mesuré et simulé (28/07/2002, niveau 2)

Les courbes (figure 6.3) se superposent bien le matin, mais peu avant le milieu de journée, un décalage est observé, et il se maintient jusqu'en début d'après midi. Le déficit est au maximum de l'ordre d'une dizaine de W/m^2 avec un albédo de 0,14 contre 40 W/m^2 pour un albédo de 0,10. Un albédo de 0,14 est donc plus approprié pour la couche représentant le fond du canyon. La simulation du rayonnement réfléchi prend ici encore remarquablement en compte la géométrie du canyon, mais sous estime légèrement l'énergie mesurée par le capteur. Il est clair que le déficit en milieu de journée et dans l'après-midi pourrait être encore réduit en prenant une valeur d'albédo supérieure à 0,14. Néanmoins, ce serait au détriment de la qualité de la simulation pour les heures matinales ; par ailleurs, comme on le verra plus loin, la simulation de la température de surface n'est pas en faveur d'une valeur d'albédo augmentée.

6.1.2.2 Albédo des façades claires

Ces façades WNW, assez hétérogènes, présentent le point commun d'avoir une peinture claire, ce qui est également le cas d'une bonne partie des façades de l'autre côté de la rue. Nous avons choisi d'attribuer le même albédo pour chaque façade à l'exception du bâtiment de la Faculté de Géographie. En effet, ce dernier se distingue des autres bâtiments de la rue par son alternance de carreaux colorés et vitres avec des renforts bétonnés. Nous examinerons ce cas par la suite.

Pour déterminer l'albédo des façades avec peinture claire, nous disposons de deux types de données :

- l'albédo déduit directement des mesures, à partir des capteurs disposés verticalement. Cet albédo est calculé au moment où le soleil simultanément éclaire la façade, et aussi une face du capteur, tandis que l'autre face mesure la composante réfléchie par la façade. L'albédo obtenu est de 0,25.

- l'albédo obtenu par combinaison d'une part des simulations, d'autre part des mesures. Nous le calculons dans ce cas comme le rapport entre le rayonnement réfléchi, tel qu'il est mesuré, et le rayonnement incident sur la façade obtenu à partir d'une simulation SOLENE. On obtient ici un albédo de l'ordre de 0,20.

Il est difficile à ce stade de décider quelle est la valeur la plus représentative à utiliser par la suite. Il faut noter aussi que ces valeurs n'ont pas de raison de coïncider exactement, aucune ne correspondant à la définition théorique d'un albédo solaire. Néanmoins, un examen attentif des mesures et simulations permet d'avancer.

La figure 6.4 en effet représente le rayonnement global incident mesuré par un capteur disposé verticalement et orienté vers l'ESE ainsi que les simulations de ce même rayonnement grâce à un capteur fictif incorporé à son emplacement réel dans la géométrie. L'information intéressante est fournie par le maximum secondaire observé autour de 16h, lorsque le capteur ne reçoit que le rayonnement réfléchi par la façade WNW éclairée directement par le soleil.

On voit qu'avec l'albédo de 0,25 la simulation s'approche mieux du rayonnement mesuré au cours de l'après midi qu'avec la valeur 0,20. Comme précédemment, la simulation du maximum secondaire pourrait être améliorée en augmentant encore la valeur de l'albédo. Cependant, ce serait au détriment de la qualité de la simulation en général et éloignerait encore de la valeur 0,20 déduite des mesures « directes ». On attribuera donc la valeur 0,25 à l'albédo des façades claires WNW, valeur qui représente un bon compromis.

Globalement, nous constatons que SOLENE simule très bien le rayonnement global reçu par la face orientée ENE du capteur, mis à part le léger déficit discuté ci-dessus concernant le maximum de l'après-midi, et un petit décalage temporel observé à partir du moment où l'apport d'énergie est maximum sur ce capteur. Il est possible et plausible que ce décalage soit dû à la géométrie détaillée du canyon, telle qu'elle est vue par le capteur, sachant que la simulation utilise une géométrie simplifiée.

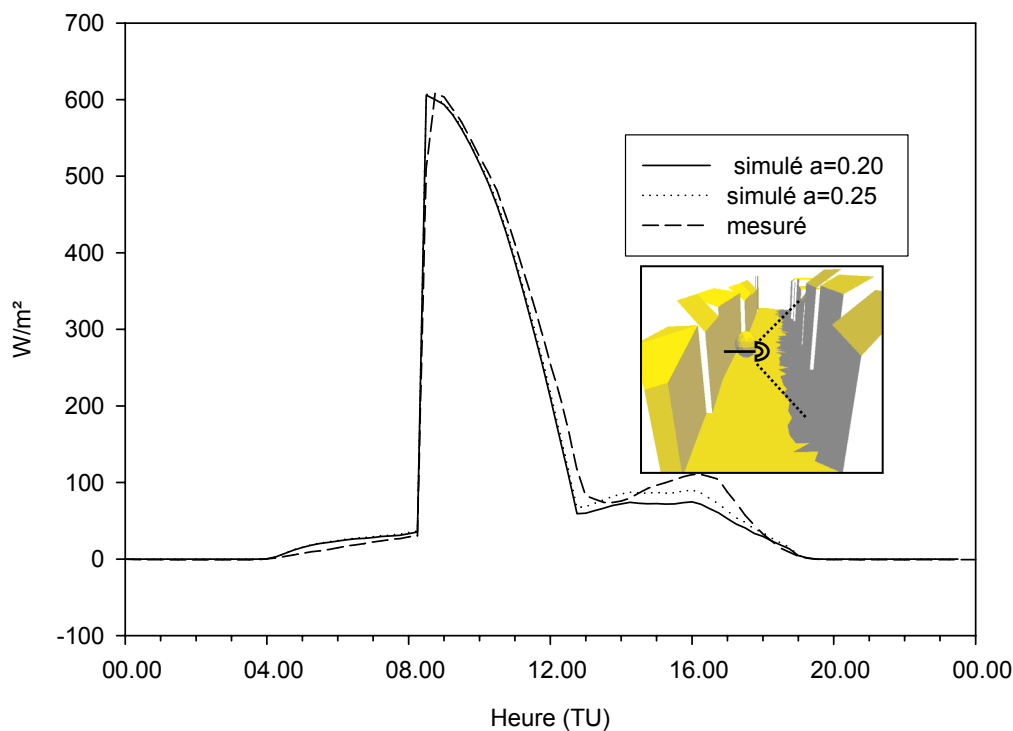


Figure 6.4 Comparaison entre le rayonnement global incident mesuré et simulé avec des albédos de façades de 0,20 et 0,25 par un capteur disposé verticalement et orienté vers l'ESE (28/07/2002, niveau 3)

6.1.2.3 Façade ESE du bâtiment de la faculté de géographie

Pour le cas de la façade de la Faculté de Géographie, en raison, comme évoqué précédemment, de la complexité de ce mur, la manière la plus adéquate pour lui attribuer un albédo nous semble être une mesure intégrée de l'albédo de la façade, à partir d'un capteur placé côté façade au 2^{ème} niveau, niveau qui est le plus approprié puisque les erreurs liées à une prise en compte du fond du canyon ou du ciel dans la mesure y seront minimales. En considérant le moment de la matinée où la façade est éclairée directement, nous obtenons un albédo de 0,13. Il convient de préciser que la structure de l'échafaudage, qui intervient dans le champ de vision du capteur, peut vraisemblablement altérer, mais d'une façon qu'il est quantitativement impossible à évaluer, la valeur d'albédo attribuée à la façade. Par ailleurs, l'échafaudage n'est pas représenté dans le modèle géométrique, et les effets de sa structure sur les grandeurs incluses dans les mesures ne sont donc pas pris en compte lors de la simulation.

Au cours de la matinée, on constate (figure 6.5) que le rayonnement réfléchi par la façade parvenant sur le capteur est surestimé par la simulation, avec un écart approchant les 20 W/m². Ce résultat paraît surprenant dans la mesure où la simulation sous-estimait l'apport de rayonnement issu des réflexions sur les parois dans les autres cas. Le même phénomène est observé aux 2 autres niveaux. Il est probable que cet écart provient de la non-prise en compte de l'échafaudage dans la simulation, et conduit à s'interroger sur la question de son impact sur le rayonnement mesuré en provenance de la façade de la Faculté de Géographie. Il convient également de ne pas négliger les effets locaux de répartition des ombres et du soleil sur des surfaces aux albédos différents.

En début d'après midi, le capteur est éclairé directement par le soleil, et l'énergie augmente considérablement aussi bien pour les mesures que pour la simulation, avec toutefois une augmentation simulée plus précoce associée à un maximum plus élevé. Des anomalies du signal observées entre 16 et 17h pourraient venir de l'ombre portée des montants et structure de l'échafaudage sur le capteur.

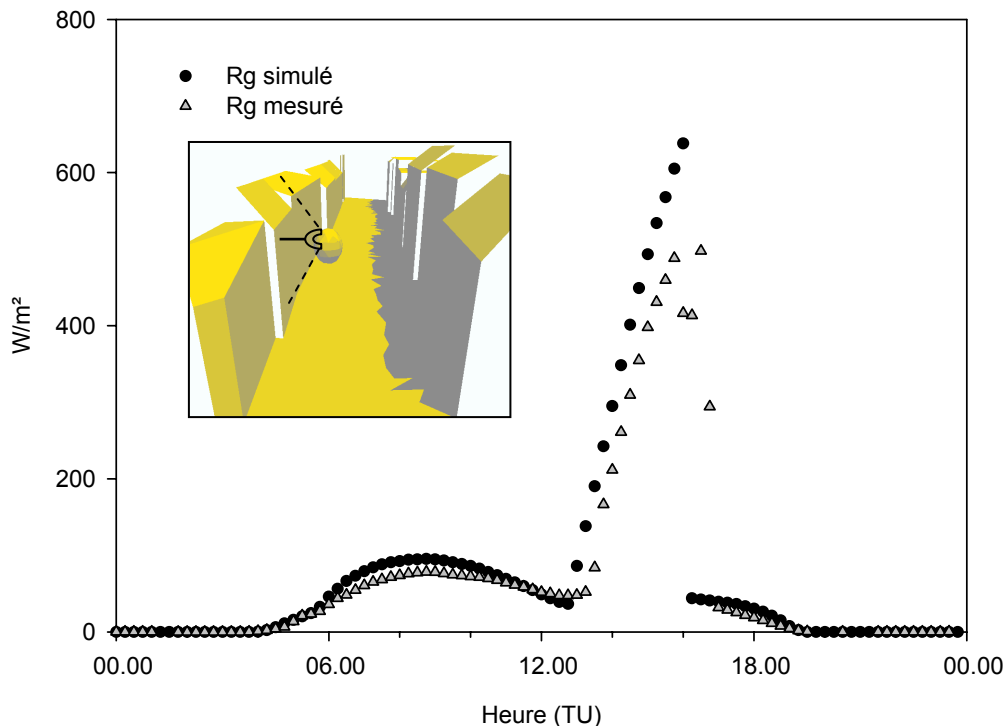


Figure 6.5 Comparaison entre le rayonnement global incident mesuré et simulé sur un capteur disposé verticalement et orienté vers l' WNW (28/07/2002, niveau 3)

6.1.3 Conclusions sur le domaine du rayonnement global

Ces simulations réalisées à l'échelle du canyon nous conduisent à tirer des enseignements sur la fiabilité du modèle :

- le rayonnement incident est remarquablement simulé par le modèle, tant sur un plan horizontal que vertical. Ceci prouve que le modèle prend très bien en compte les aspects géométriques du canyon, et les phénomènes d'ombre et d'atténuation du rayonnement qu'ils occasionnent. La répartition de l'énergie en fonction de l'angle d'incidence est également bien prise en compte comme le montrent les simulations réalisées à l'emplacement de capteurs disposés verticalement.
- en ce qui concerne le rayonnement réfléchi, les résultats des simulations sont proches de la réalité terrain, même si la concordance est moindre que précédemment. En effet, la part de rayonnement qui parvient au capteur après des réflexions multiples sur les différentes parois a tendance à être quelque peu sous-estimée. Néanmoins, il convient de rester prudent, car les différences entre simulations et mesures restent minimes et il faut savoir que les capteurs fictifs incorporés dans la géométrie SOLENE ont un champ de vue de 180°, ce qui n'est pas le cas dans la réalité.

Cette étape nous montre donc que le modèle prend bien en compte les facteurs de formes, ainsi que les phénomènes d'intervisibilité et d'interréflexion entre les facettes, et reproduit très bien les variations temporelles du rayonnement.

Les valeurs d'albédo suivantes sont définitivement adoptées pour les éléments constitutifs du canyon, et servent donc d'entrées pour la simulation de la température de surface :

surface	albédo
Fond du canyon	0.14
Façades « claires »	0.25
Façade Géographie	0.13

Tableau 6.1: valeurs d'albédo adoptées lors des simulations à l'intérieur du canyon

6.2 Domaine du rayonnement infrarouge (LW)

6.2.1 Test de sensibilité des données d'entrée

En plus de l'albédo (dont la sensibilité a été testée section 6.1.2), l'émissivité, le coefficient externe de convection et les caractéristiques thermiques de matériaux sont autant de paramètres d'entrée à renseigner en vue de la simulation des températures de surface. Nous proposons à présent de montrer la sensibilité de la température de surface simulée aux valeurs de ces paramètres, et ensuite d'affecter ces paramètres pour renseigner les différents matériaux

6.2.1.1 Le paramètre convectif h_c

Le paramètre le plus difficile à obtenir est h_c , le coefficient externe de convection qui dimensionne le flux de chaleur sensible, et qui garde la même valeur pour toute la période de simulation.

Différentes formules empiriques ont été mises au point par des auteurs pour approcher ce terme à partir de la vitesse de vent, sans qu'il y ait concordance d'une méthode à l'autre. Ainsi, Vinet (2000) montre que pour une vitesse du vent de 1m/s, soit une valeur proche de celles mesurées par exemple le 28 juillet 2002, le coefficient d'échange convectif peut aller de 6 à 17 W/m², avec cependant une plus forte probabilité de valeurs entre 8 et 10. Ce terme est donc difficile à estimer, alors que, comme le montre la figure 6.6 qui simule la température de surface du fond du canyon ce paramètre d'entrée influence fortement les températures de surfaces simulées. Ainsi, en fonction de la formule choisie pour obtenir le coefficient d'échange, des écarts de 10°C peuvent apparaître au moment où la température de surface est la plus élevée. La température de surface est d'autant plus élevée que la valeur affectée au coefficient h_c diminue. Notons (figure 6.6) que jusqu'à ce que la portion de rue soit ensoleillée, h_c n'affecte pas la température de surface, et qu'une fois la rue repassée à l'ombre, les différentes simulations tendent vers une même température de surface. Le coefficient externe de convection affecte donc essentiellement la température maximale, au moins pour la configuration en question.

Alors que les caractéristiques thermiques des matériaux qui composent la scène peuvent être prises dans la littérature même si c'est avec une marge d'incertitude importante, et que l'albédo des surfaces a été mesuré et testé, cette entrée h_c se présente comme très délicate à renseigner. La comparaison des valeurs simulées de température avec les mesures radiométriques de température de surface réalisées sur l'asphalte du milieu de la rue, examinée plus loin, nous incite à fixer la valeur de ce coefficient externe de convection à 10. En raison de la difficulté d'évaluer précisément ce terme, nous affectons la même valeur à l'ensemble de la scène.

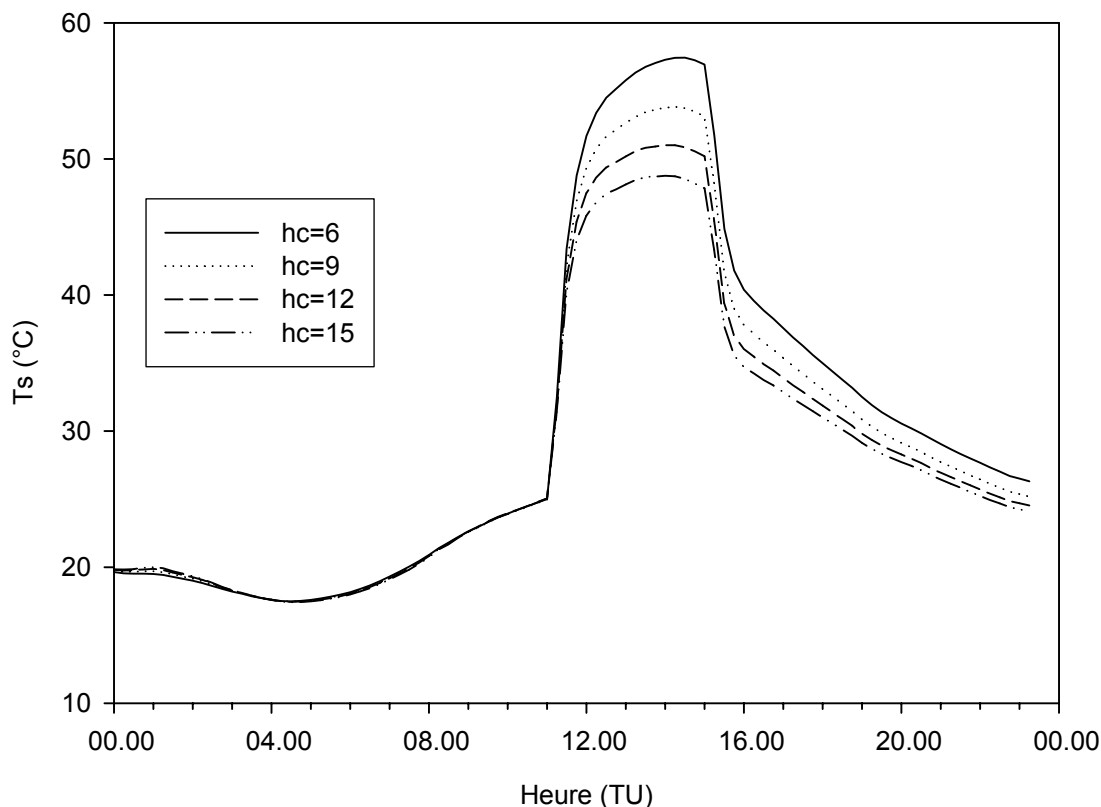


Figure 6.6 Test de sensibilité du coefficient externe de convection

6.2.1.2 Les propriétés thermiques des matériaux

Parmi les caractéristiques thermiques des matériaux, c'est la conductance qui s'avère affecter le plus la valeur de température de surface. En effet, tandis que les modifications apportées à la capacité calorifique ou à la masse volumique se répercutent sur la température à l'intérieur de la couche de matériaux concerné, celles apportées à la conductance se répercutent sur la température de surface. Si les températures nocturnes ou des portions à l'ombre ne sont pas ou guère affectées par des changements de valeur de ce paramètre, on constate (figure 6.7) que la portion de rue au centre du canyon atteint plus rapidement une température maximale plus élevée à mesure que la conductance diminue. SOLENE prend donc en compte l'échauffement plus rapide des matériaux peu conducteurs. Entre une conductance de 0,7 et de 1,6, intervalle dans lequel se concentrent bon nombre de valeurs attribuées aux matériaux urbains, la température de surface présente ici des variations qui peuvent dépasser les 5°C.

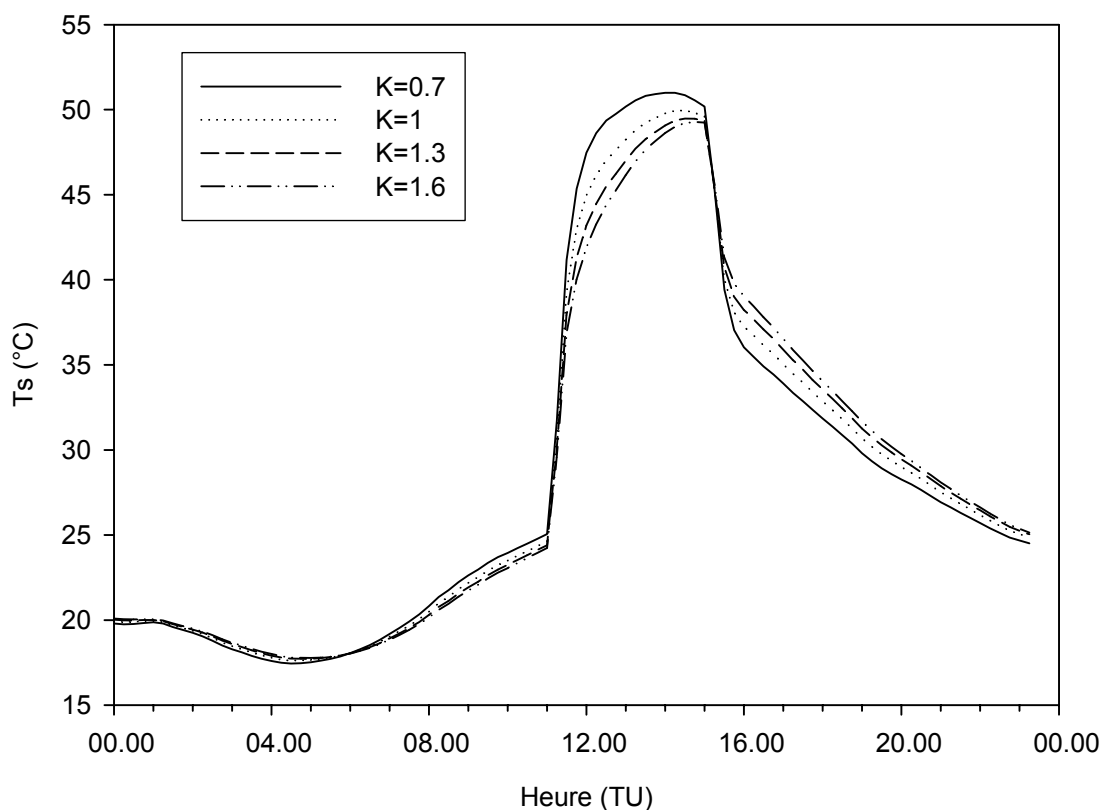


Figure 6.7 Test de sensibilité de la conductance ($J s^{-1} m^{-1} K^{-1}$)

Dans le modèle utilisé, ces valeurs de conductance sont à diviser par l'épaisseur pour obtenir la conductivité thermique des matériaux. Ce paramètre épaisseur demande donc également une estimation précise autant que faire se peut. Nous avons choisi de faire varier l'épaisseur de la couche d'asphalte qui recouvre le sol de 5 à 20 cm (figure 6.8). Il apparaît, ce qui est assez intuitif, qu'au cours de la phase d'augmentation brutale de la température sous l'effet du dépôt de chaleur solaire directe, plus la couche est fine, plus elle s'échauffe vite, mais les différences restent inférieures à 2°C. Elles sont un peu plus marquées lorsque la température atteint son maximum, mais curieusement, entre 10 et 20 cm, la température de surface diminue avec l'épaisseur, tandis que pour une épaisseur de 5cm, la température est plus élevée que dans les cas précédents. Nous n'avons pas d'explications à ce phénomène. Il faut noter cependant que la simulation de la variation temporelle de la température

de surface est un problème complexe, en particulier lorsqu'on est en présence de variations brutales de l'énergie apportée au système, et que les différents paramètres du modèle ne sont pas en règle générale indépendants les uns des autres.

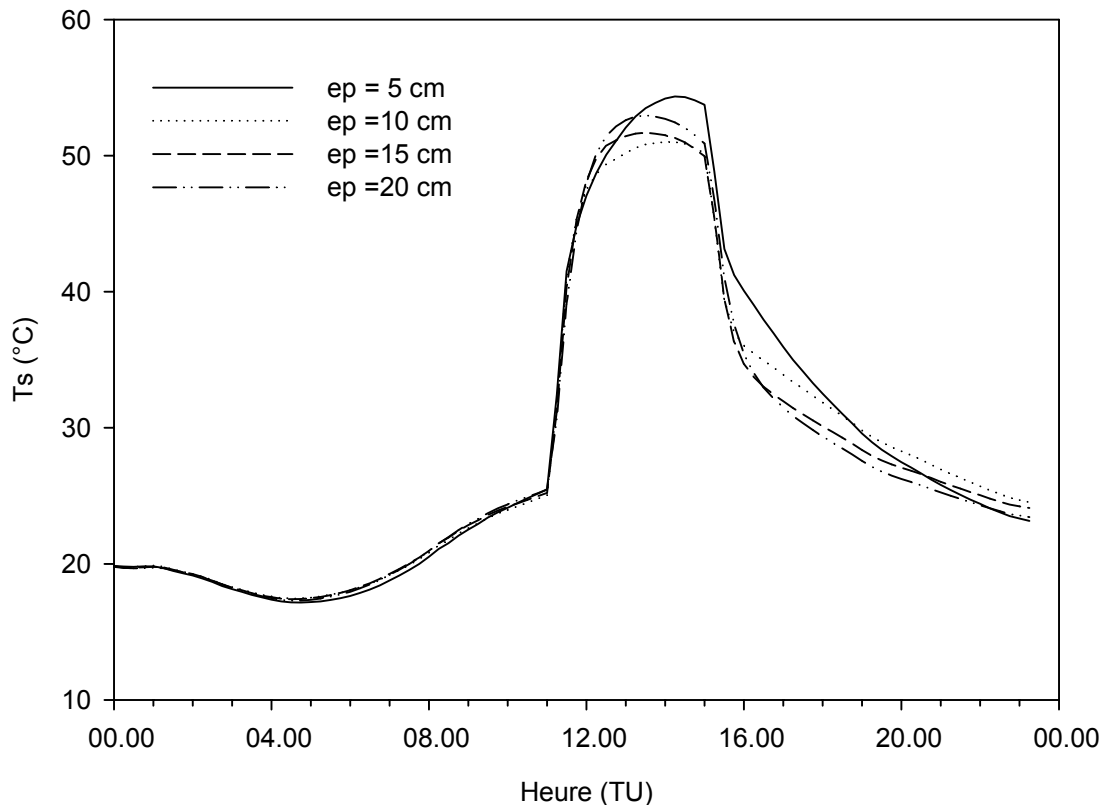


Figure 6.8 Test de sensibilité de l'épaisseur

6.2.2 Choix des propriétés thermiques des matériaux : cas particulier du fond du canyon.

Dans la journée, les températures de surface des parois du canyon sont déterminées principalement par le dépôt d'énergie dû au rayonnement solaire direct. Contrairement à une surface plane dans un environnement ouvert, l'éclairement solaire n'est pas sinusoïdal à cause de la géométrie; ceci est particulièrement vrai pour la surface du fond du canyon. Les modèles analytiques développés pour décrire la variation diurne de la température de surface, qui reposent toujours sur l'hypothèse d'un éclairement sinusoïdal, ne sont donc pas applicables.

Cependant, les mesures radiométriques de la température de surface de la rue dénotent une variation très rapide de la température dès que le rayonnement solaire direct atteint ou cesse d'atteindre le fond du canyon.

On peut donc essayer d'exploiter le comportement temporel des mesures effectuées avec le radiomètre EVEREST dans les phases de début et de fin d'ensoleillement afin de corroborer les valeurs disponibles de certains paramètres thermiques de la rue dont le matériau de surface est assimilé à de l'asphalte. Tandis que la structure des façades est complexe (vitres, volets, matériaux de construction pas forcément identiques), la portion de rue visée par le radiomètre présente l'avantage d'être homogène et bien délimitée.

Le tableau 6.2 liste les valeurs des paramètres thermo-optiques de l'asphalte issues de la littérature et des mesures de ce travail (albédo, émissivité).

Masse spécifique	ρ	2000	Kg m^{-3}
Chaleur spécifique	C_p	1044	$\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
Conductivité thermique	K	0,7	$\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Diffusivité	α	$3,35 \cdot 10^{-7}$	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Inertie thermique	I	1209	$\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$
Albédo	a	0,14	(cf. mesures campagne)
Emissivité	ϵ_s	0,94 [8-14 μm]	0,98 (totale)

Tableau 6.2 Paramètres thermiques de l'asphalte (Roulet, 1987)

Cette analyse doit être faite sur une journée de beau temps : on s'intéresse par exemple aux journées des 28 juillet ou 29 juillet 2002.

Le radiomètre utilisé, fixé à 8 m au-dessus de la rue, sur l'échafaudage, a un champ de vue de 15° , ce qui avec une inclinaison de l'ordre de 40° , conduit à une tache d'analyse de l'ordre de 3,6 m.

La figure 6.9 montre la variation mesurée de la température de brillance de la rue (milieu) : la température commence à croître fortement vers 10h45 et commence à décroître fortement vers 14h45. Sur la même figure sont représentés le rayonnement global descendant mesuré au niveau 1 du canyon ainsi que le rayonnement solaire direct descendant simulé en différents points au niveau du fond du canyon. La largeur du canyon (27 m) a été divisée en 7 segments, de sorte que le segment 4 représente le centre et couvre sensiblement le champ de vue du radiomètre. On note que pour le segment 4, le rayonnement direct atteint la rue vers 10h30 et cesse vers 14h45, sensiblement en phase avec les fortes variations de la température de surface.

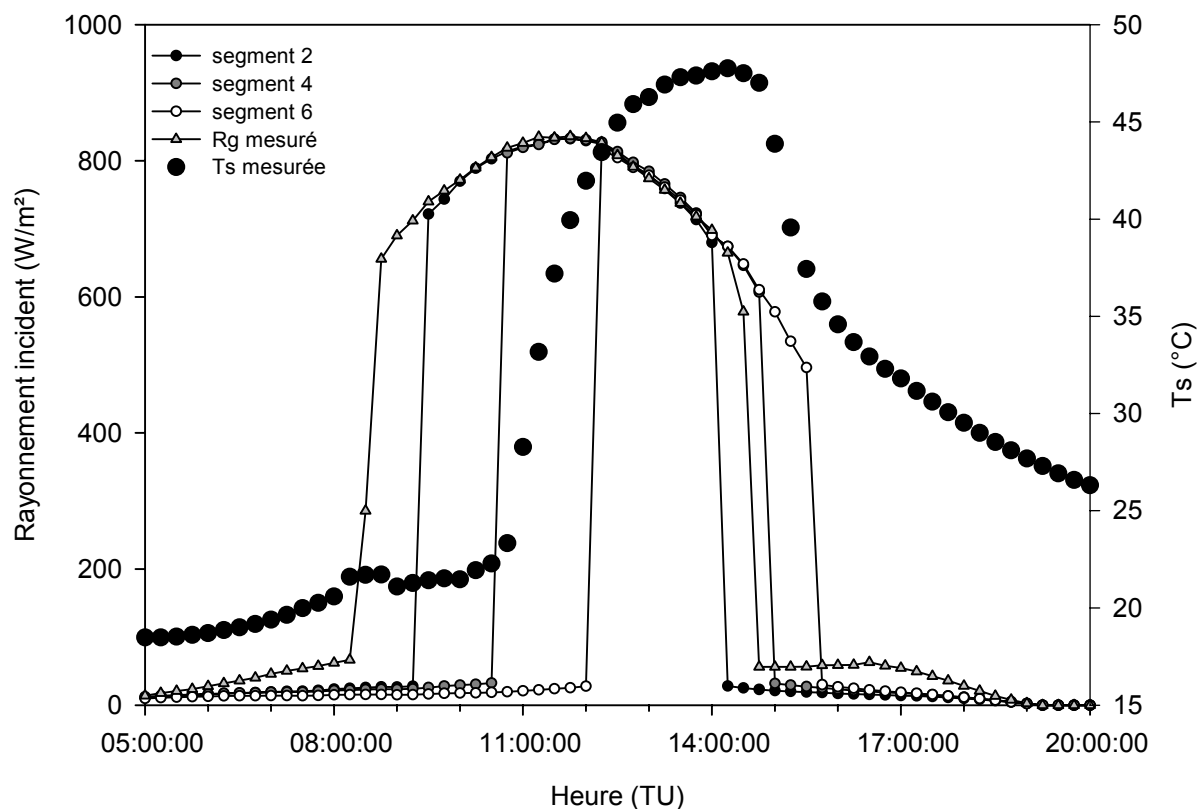


Figure 6.9 Variation du rayonnement incident selon un transect réalisé sur la largeur de la rue de l'Argonne

En phase de début, l'établissement du flux solaire étant « brutal », on peut essayer d'interpréter la variation en fonction du temps comme un régime transitoire sous l'effet d'un forçage de type « échelon », associé à une constante de temps τ , à partir d'un instant t_0 : on aurait alors une expression de la forme :

$$T(t) = \Lambda + \Pi(\exp[-(t - t_0) / \tau])$$

Pour évaluer les paramètres, on s'appuie sur les travaux de Ben-Yosef & Wilner (1985) et Ben-Yosef et al (1987). A partir de l'équation de conservation de l'énergie (conduction et évaporation négligées) associée à l'équation de conduction de la chaleur, nous pouvons tenter une estimation de l'épaisseur active de la couche d'asphalte. Les équations en question se basent sur les caractéristiques thermiques de l'asphalte (masse volumique, chaleur spécifique et conductivité thermique) et de l'augmentation de la température au moment où la couche concernée passe au soleil (pente de la courbe qui représente la température sur la figure 6.9).

On s'intéresse à la variation de température par rapport à un état d'équilibre à l'instant $t=t_0$, pour lequel $T=T_0$.

L'équation de conservation de l'énergie s'écrit, par unité de surface :

$$(\rho C) h \frac{\partial T}{\partial t} \cong (1-a)E_s(t) - \varepsilon \sigma T_s^4 - K \frac{\Delta T}{h}$$

où h est l'épaisseur Δz du milieu, et l'équation de la chaleur

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = - \left[\frac{K}{\rho C} \right] \frac{\partial T}{\partial z} = -\alpha \frac{\partial T}{\partial z}$$

On linéarise le terme radiatif en utilisant l'approximation $\sigma T^4 \approx A+BT$, $A=-945$, $B=4,62$; on ne conserve que la partie variable BT , le terme constant étant inclus dans l'équilibre à $t=t_0$. Pour la variation de température de surface $T-T_0$, on a donc l'équation

$$(\rho C) h \frac{\partial (T - T_0)}{\partial t} \cong (1-a)E_s(t) - \varepsilon B(T - T_0) - K \frac{(T - T_0)}{h}$$

soit

$$(\rho C) h \frac{\partial (T - T_0)}{\partial t} \cong (1-a)E_s(t) - [\varepsilon B + K / h](T - T_0)$$

ou encore

$$\frac{\partial (T - T_0)}{\partial t} + \frac{[\varepsilon B + K / h]}{(\rho C) h} (T - T_0) \cong \frac{(1-a)}{(\rho C) h} E_s(t)$$

$$\frac{\partial (T - T_0)}{\partial t} + \frac{X}{Z} (T - T_0) \cong \frac{Y}{Z} F(t)$$

$$X = [\varepsilon B + K / h] \quad Y = (1-a) \quad Z = (\rho C) h$$

Dans le cas « transitoire » envisagé ici, avec E_s l'éclairement solaire :

pour $t < t_0$ $F(t) = E_s(0) = F_0$
 pour $t \geq t_0$ $F(t) = E_s(1) = F_1$

La solution de l'équation s'écrit

$$T(t - t_0) - T_0 = \frac{Y}{X} \left[F_1 + F_2 \exp\left[-\frac{X}{Z}(t - t_0)\right] \right]$$

$$F_2 = F_0 - F_1 \equiv -\Delta E_s$$

où ΔE_s est la variation (brusque) du forçage solaire.

La pente à l'origine vaut :

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t=t_0} = \frac{Y}{Z} \Delta E_s = \frac{(1-a)}{(\rho C)h} \Delta E_s$$

La valeur de la pente expérimentale permet donc d'estimer grossièrement l'épaisseur h du matériau, les autres paramètres étant connus.

Les pentes initiales mesurées $\Delta T/\Delta t$ (entre 10h45 et 11h30) sont :

$$\begin{aligned} 28.07 : 13,86^\circ/2700s &= 5,13 \cdot 10^{-3} & (R^2=0,996) \\ 29.07 : 12,74^\circ/2700s &= 4,72 \cdot 10^{-3} & (R^2=0,999) \\ \text{soit moyenne} &= 4,92 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Avec $\Delta E_s \approx 740 \text{ Wm}^{-2}$ (moyenne 28 et 29.07), il vient

$$\mathbf{h \approx 6 \text{ cm}}$$

Cette valeur, même si elle n'est que grossièrement indicative correspond sensiblement à l'épaisseur réelle de la couche de surface, et paraît acceptable,

La **constante de temps** vaut $\tau = Z/X = (\rho C)h/(\epsilon B + K/h)$, soit expérimentalement

$$\tau \approx 7,74 \cdot 10^3 \text{ s} \approx 2\mathbf{h10'}$$

Cette valeur paraît raisonnable vis à vis de la variation temporelle observée.

Il est important de noter que les valeurs de l'épaisseur et de la constante de temps déterminées à partir des mesures de température de surface reposent sur les valeurs des paramètres thermo-optiques affectées au matériau (cf tableau 6.2). On peut donc conclure que l'étude du comportement temporel transitoire de la température radiométrique du fond du canyon montre que les paramètres thermo-optiques assignés au matériau sont non seulement plausibles mais même probablement tout à fait acceptables.

L'épaisseur à affecter au matériau de surface « rue » est donc voisine de 6 cm. Les caractéristiques thermiques que nous attribuons pour l'asphalte sont donc celles listées dans le tableau précédent (tableau 6.2)

Pour les parois et les toits, une telle étude n'est pas envisageable, étant donné l'hétérogénéité de ces surfaces. Contrairement aux albédos, faute de données permettant de renseigner plus finement, nous attribuons les mêmes valeurs pour les paramètres thermiques de la façade de la Faculté de Géographie que pour les autres façades. Pour les façades, nous avons choisi des valeurs proches de celles d'un certain nombre de matériaux de construction (briques, béton, et crépi). Concernant les toits, la plupart étant recouverts de tuiles, nous avons pris pour les paramètres thermiques des valeurs en rapport, tandis que pour la 2^{ème} couche, nous avons considéré des matériaux très peu conducteurs type laine de verre. Nous appliquerons donc simplement les paramètres tirés de la littérature (Roulet, 1987), ce qui donne :

surface		Epaisseur (m)	K ($J s^{-1} m^{-1} K^{-1}$)	Cp ($J Kg^{-1} K^{-1}$)	ρ ($Kg m^{-3}$)
façades	Couche1	0,1	0,8	950	2000
	Couche2	0,2	0,7	1000	1800
sol	Couche1	0,06	0,7	1044	2000
	Couche2	0,5	0,7	640	1800
toits	Couche1	0,05	0,8	860	1900
	Couche2	0,15	0,04	960	40

Tableau 6.3 Caractéristiques thermiques attribuées aux éléments du canyon

6.2.3 Analyse des mesures radiométriques EVEREST (rue et mur)

Afin de vérifier les sorties de SOLENE en terme de température de surface, nous procédons en deux étapes : dans un premier temps, nous nous proposons de comparer les mesures radiométriques aux sorties SOLENE sur les parties concernées, puis dans un deuxième temps, nous allons confronter les mesures obtenues pour les façades à l'aide de la caméra thermique avec les sorties du modèle. Nous avons effectué la simulation sur trois journées consécutives, afin que le logiciel puisse tenir compte des conditions météorologiques qui ont prévalu lors des deux journées précédant celle où nous avons effectué les comparaisons avec les mesures. Le fait de tenir compte des journées précédentes influence les températures simulées, notamment en début de période, comme le montre le graphe (figure 6.10) qui traduit la différence entre la température simulée en tenant compte des deux journées précédentes et la température simulée sans considérer ce qui se passe avant le début de la période. La différence, qui atteint presque $2,5^{\circ}C$ en début de période se réduit à moins de $0,5^{\circ}C$ après 12 h. Le fait qu'elle soit plus marquée en début de simulation s'explique par la restitution de la chaleur emmagasinée la journée précédente, qui n'est pas prise en compte dans le cas d'une simulation démarrée pendant la nuit.

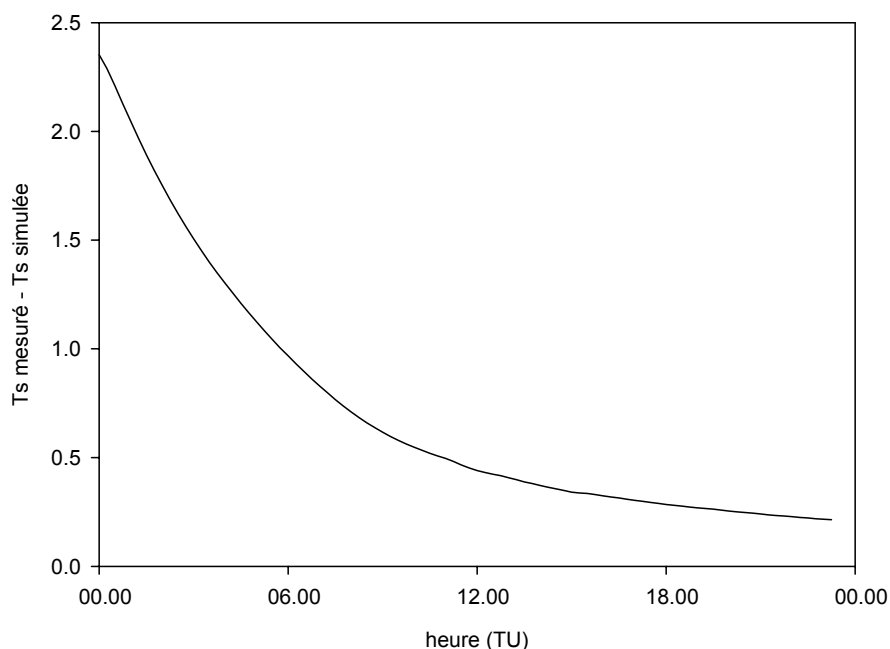


Figure 6.10 Différence entre la température simulée en considérant les 2 journées précédentes par rapport à la température mesurée sur la journée seule (28/07/2002)

6.2.3.1 Température de surface de la rue

Après avoir recherché sur la géométrie SOLENE les mailles correspondant à la portion de rue visée par le radiomètre, une comparaison est effectuée entre la mesure radiométrique et la température de surface moyenne obtenue sur les mailles concernées à l'issue de la simulation. Deux constats s'imposent :

- lorsque la portion de rue commence à être éclairée directement, la phase de croissance de la température est bien prise en compte par la simulation, tout comme le palier pendant lequel elle se maintient à un niveau élevé, ainsi que la phase de décroissance (figure 6.11). Le modèle traduit donc bien le comportement de l'asphalte lorsque la rue est au soleil, avec un échauffement rapide jusqu'à un certain moment, à partir duquel l'apport énergétique diminue et où la couche de surface s'échauffe beaucoup moins rapidement.
- lorsque la portion de rue est à l'ombre, les résultats sont en revanche moins satisfaisants, bien que l'écart ne dépasse jamais 3°C, écart observé en fin de nuit. A partir du moment où la rue repasse à l'ombre, puis par la suite lorsque la nuit tombe, la température de surface modélisée diminue plus fortement que la température de surface mesurée. On peut avancer l'hypothèse que la restitution la nuit de l'énergie stockée en journée dans les matériaux est insuffisamment prise en compte dans le modèle, ce qui revient à dire que le stock de chaleur dans le sol et les matériaux est mal géré.

Malgré le démarrage de la simulation 48 heures auparavant, le gain de précision obtenu dans l'estimation des températures de surface n'est pas suffisant pour que les températures de surface simulées la nuit correspondent à celles mesurées. Rappelons que la modification des caractéristiques thermiques attribuées aux matériaux engendre des modifications sur la dynamique de la température de surface en journée, lorsque le soleil éclaire la scène, mais n'a pratiquement aucune influence sur les températures nocturnes. Cette différence entre température mesurée et simulée ne peut donc être attribuée à un mauvais choix de certaines caractéristiques thermiques. Il faut aussi préciser que le modèle n'incorpore pas le flux de chaleur latente.

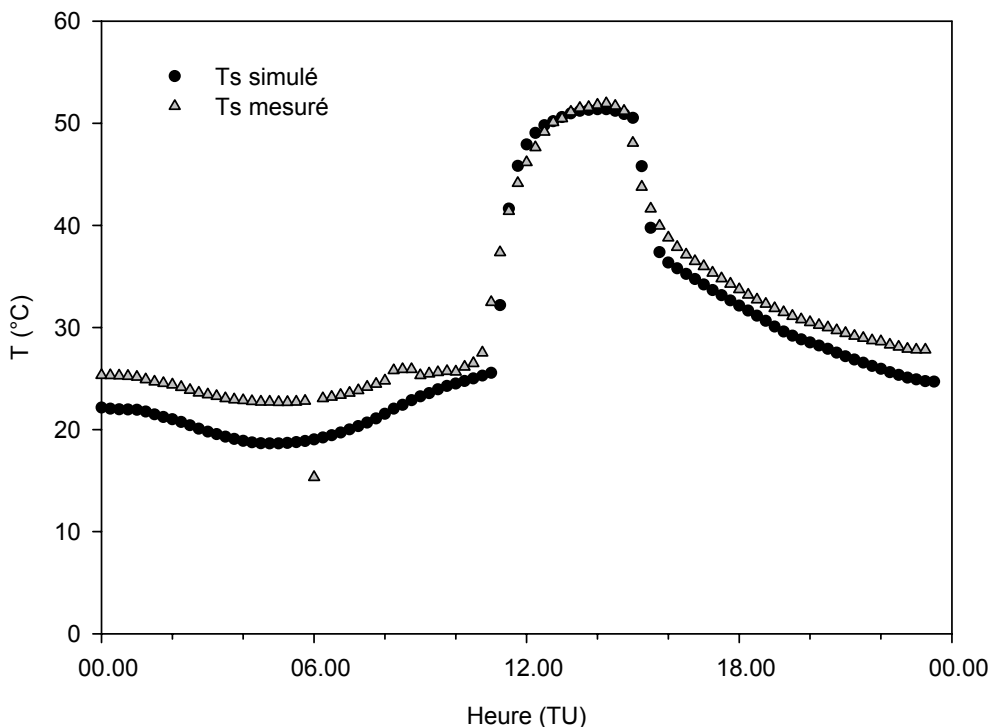


Figure 6.11 Comparaison entre la température de surface simulée et mesurée (corrégée de l'émissivité) sur une portion de la rue de l'Argonne (28/07/2002)

6.2.3.2 Température de surface de la façade

Afin de déterminer exactement quelle est la portion de façade qui se trouve dans le champ de vue des radiomètres installés sur l'échafaudage, nous procédons différemment. Nous avons placé un capteur fictif dans la géométrie de la scène qui correspond à l'emplacement du radiomètre visant la façade orientée vers l'WNW. Connaissant le champ de vue du capteur, SOLENE identifie toutes les mailles vues par le capteur grâce à une fonction externe. Ces mailles qui interviennent dans la mesure de la température de surface sont au nombre d'une quinzaine avec le maillage utilisé. La moyenne des températures de surface en question est alors effectuée, et comparée à la mesure radiométrique (corrigée de l'émissivité).

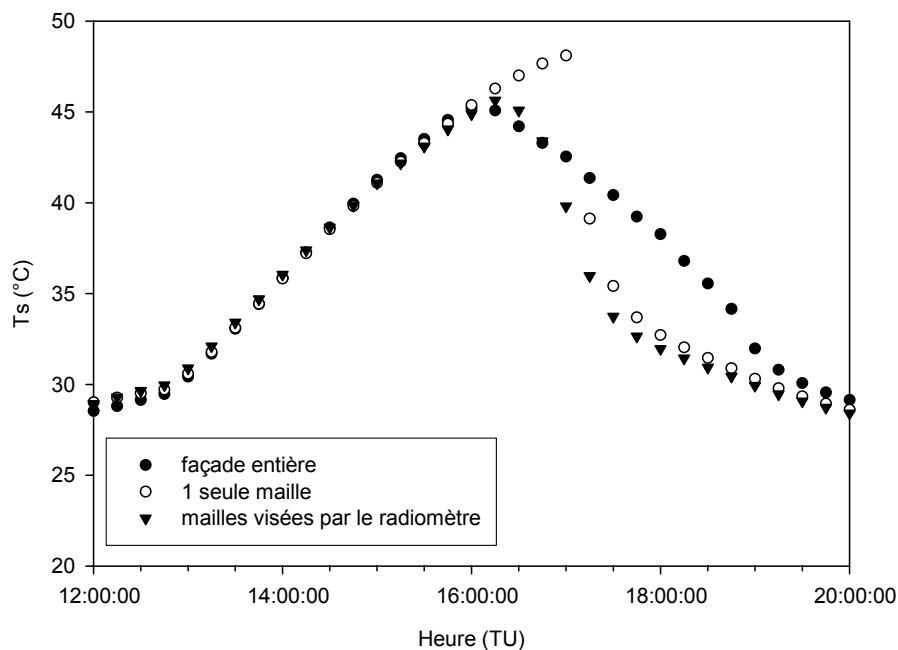


Figure 6.12 Comparaison entre la température de surface simulée sur toute la façade orientée WNW et sur une seule maille avec celle simulée sur la surface visée par le radiomètre (28/07/2002)

La figure 6.12 montre la nécessité de prendre en compte très précisément la surface réellement observée par le capteur pour comparer les variations temporelles mesurées et simulées. Il apparaît en effet que ces variations temporelles sont très différentes suivant que l'on considère une seule maille, la moyenne sur toute la façade, ou la moyenne sur le champ de vue. Les écarts peuvent aller jusqu'à 7 ou 8°C vers le milieu de l'après midi lorsque le soleil n'éclaire plus l'intégralité de la façade. Cette comparaison nous confirme donc l'intérêt de considérer l'ensemble des mailles vues par le radiomètre lors de la comparaison mesures -simulations.

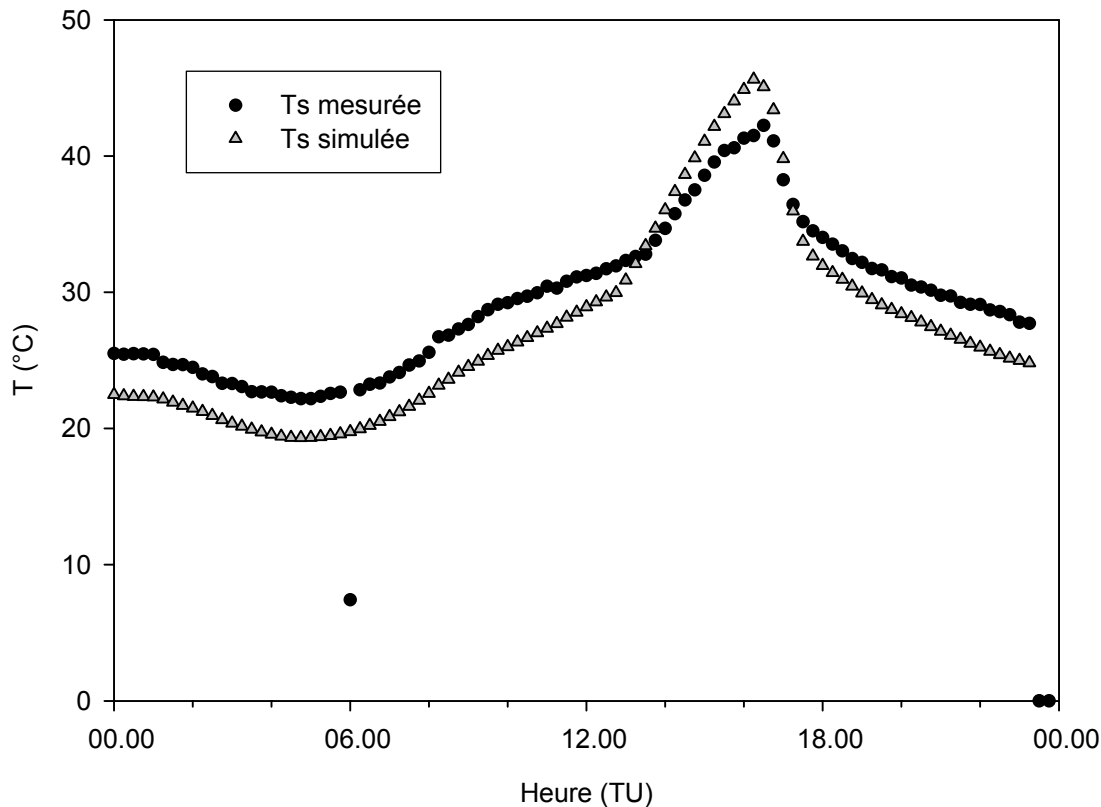


Figure 6.13 Comparaison entre la température de surface mesurée et simulée sur une partie de façade orientée WNW (28/07/2002)

Comme pour la rue, il apparaît (figure 6.13) que les températures de surface nocturnes sont sous-estimées par le modèle, ce qui ramène à l'hypothèse d'une mauvaise gestion de la restitution de l'énergie par les matériaux. Le matin, alors que la façade concernée est à l'ombre, le décalage entre mesure et simulation se maintient. Puis les phases d'augmentation et de diminution de température dans l'après midi sont respectées, bien que la valeur simulée soit un peu plus élevée (jusqu'à 3°C) au moment où la façade reçoit le plus d'énergie. Néanmoins, il convient de préciser que, contrairement à la rue où la surface visée était homogène, ce mur comporte un certain nombre de surfaces vitrées, dont le comportement n'est pas pris en compte dans la modélisation.

Enfin, on peut remarquer qu'en affectant un albédo plus élevé que 0,25 à cette façade, comme le suggérerait la simulation du rayonnement réfléchi par cette façade, l'écart entre températures simulée et mesurée pourrait vraisemblablement être fortement réduit, en particulier pendant la journée. Néanmoins, comme il a déjà été dit, prendre une valeur trop élevée de l'albédo apparent n'est pas raisonnable, d'autant plus que d'autres éléments peuvent intervenir, à savoir : d'une part le fait que la température à l'intérieur des bâtiments est prise constante, d'autre part le comportement spéculaire des surfaces vitrées que le modèle ne peut pas gérer et dont les propriétés thermiques ne sont pas prises en compte.

6.2.4 Analyse des thermographies des murs

Comparons à présent les résultats de la simulation avec les mesures obtenues avec la caméra thermique déplacée au sol à l'aide d'un chariot. Nous effectuons cette fois la comparaison sur le bâtiment de la Faculté de Géographie. Ces mesures étant effectuées simultanément aux vols, nous disposons de trois séquences réparties dans la journée.

Les thermographies réalisées le matin montrent clairement un gradient de température de surface sur la paroi, puisqu'une moitié supérieure est éclairée au moment de la mesure, tandis que l'autre moitié est à l'ombre. Il est donc particulièrement intéressant de comparer cette mesure à la simulation, afin de voir si ce gradient est respecté. Pour y parvenir, nous avons délimité 6 zones de tailles équivalentes sur la thermographie (figure 6.14), du haut vers le bas de la façade, et effectué la moyenne des températures pour les pixels de chaque zone. Ceci nous permet de les confronter aux températures simulées pour les 6 mailles qui se répartissent verticalement au même endroit de la façade.

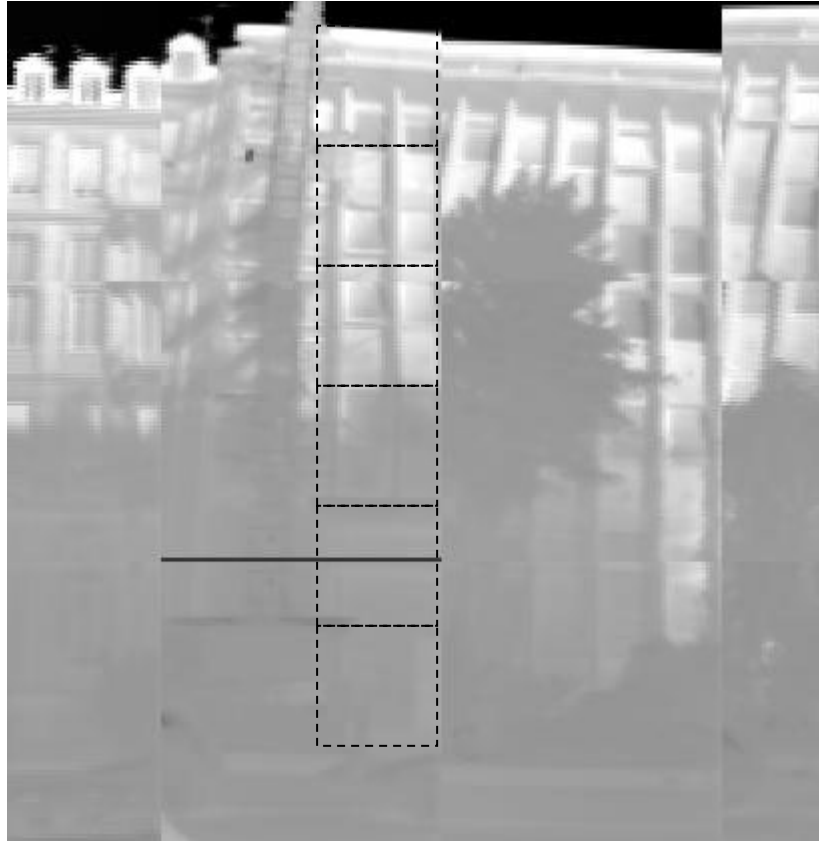


Figure 6.14 Découpage sur un transect vertical de la façade de la Faculté de Géographie de 6 zones pour comparer la température de surface obtenue avec la caméra thermique et celle simulée (28/07/2002, 7h TU)

Comme le montre le graphe (figure 6.15), la température simulée est quasiment identique à celle obtenue par la caméra pour les trois parties de façades déjà éclairées par le soleil. Le modèle simule bien la légère décroissance de la température à mesure que l'on descend vers le fond du canyon et que les portions de façades sont éclairées depuis moins longtemps. En revanche, pour les parties encore à l'ombre, la différence entre mesures et modélisation est importante, puisqu'elle excède les 5°C. Comme lors des exemples précédents, la simulation sous-estime la température de surface des portions non éclairées, et dans ce cas, l'écart est même plus marqué. Il est possible que, là encore, la prédominance de surfaces vitrées spéculaires, qui renverraient vers la caméra une partie du flux émis par la façade opposée, soit une explication à envisager.

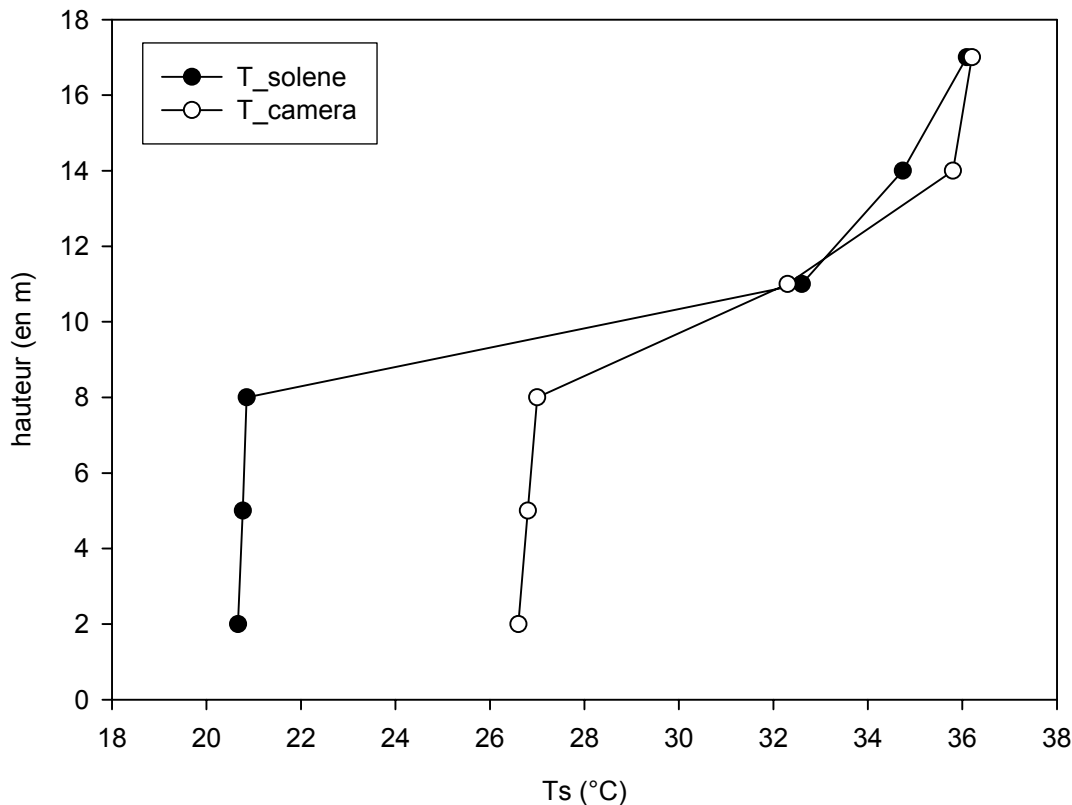


Figure 6.15 Comparaison entre la température de surface simulée et celle extraite de la thermographie à 6 niveaux sur la façade de la Faculté de Géographie (28/07/2002, 7h)

Pour les autres façades et les situations temporelles autres que celle illustrée sur les figures 6.14 et 6.15, les thermographies mettent en évidence une très forte hétérogénéité radiométrique pixel-à-pixel. Il en résulte qu'aucun gradient éventuel ne peut être décelé et que la comparaison simulations-thermographies n'apporte pas d'information significative.

6.2.5 Analyse du flux infrarouge (LW)

Nous simulons à présent le flux infrarouge provenant du fond du canyon en plaçant un capteur fictif à l'emplacement du premier niveau de l'échafaudage. Le flux mesuré provient donc du fond du canyon, mais aussi de la base des façades. Les flux infrarouges émis simulés par le logiciel le sont par application de la loi de Stefan-Boltzmann à partir des calculs de températures de surface. C'est donc logiquement que l'on retrouve un flux infrarouge sous-estimé pendant la nuit (environ 30 W/m²), et, comme pour la température de surface de la façade (figure 6.13), surestimé en milieu de journée (figure 6.16). On retrouve ici probablement le rôle joué par les vitres qui ne sont pas représentées dans la modélisation. Tout ceci est responsable d'une amplitude journalière plus marquée pour le flux infrarouge simulé.

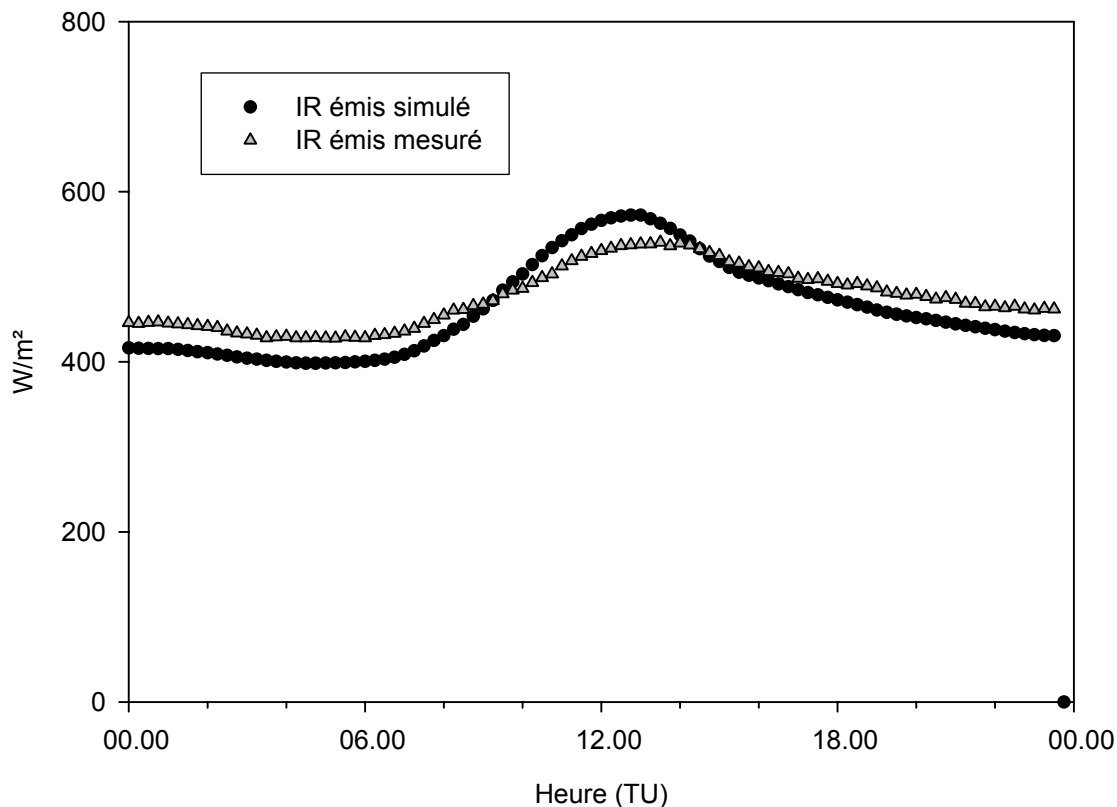


Figure 6.16 Comparaison entre le flux infrarouge émis par le fond du canyon mesuré et simulé (28/07/2002, niveau 1)

6.3 Conclusion sur le domaine du rayonnement infrarouge

En conclusion de cette étude portant sur les mesures effectuées dans le canyon, et la comparaison avec les sorties du modèle, nous pouvons dire que la simulation des températures de surface donne en règle générale de très bons résultats le jour, tant en ce qui concerne les valeurs restituées que le comportement temporel, ce qui est tout à fait encourageant. Cependant, la simulation fait apparaître un biais systématique la nuit, biais qui pourrait être attribué à une sous-estimation de l'énergie stockée dans les matériaux et mal restituée la nuit. Le choix des paramètres d'entrée (caractéristiques thermiques, albédo, émissivité, coefficient externe de convection...) ne semble pas devoir être mis en cause au premier chef puisque toutes les tentatives de modifications de ces paramètres conduisent quasiment au même résultat la nuit, et ne parviennent donc pas à réduire ce décalage nocturne.

Un autre élément tient au fait que le flux de chaleur latente est pris égal à zéro systématiquement. Par ailleurs, bien que satisfaisante, on note que la précision est moindre dans la restitution de température de surfaces complexes comme les façades.

Conclusion du chapitre :

Cette analyse à l'échelle du canyon donne donc des résultats très satisfaisants, puisqu'elle met en évidence une très bonne cohérence entre les sorties du modèle et les mesures dans le domaine du rayonnement solaire. Les résultats démontrent que SOLENE gère parfaitement la géométrie, les effets de masques et les inter-réflexions dans un système 3D ; il est ainsi parfaitement capable de remplacer des mesures. Dans le domaine du rayonnement infrarouge, qui se traduit en terme de sortie par la température de surface, les résultats sont satisfaisants également, notamment lorsque les propriétés thermiques du milieu sont bien cernées, et que celui-ci est homogène. La variation diurne est bien représentée, ainsi que les température maximales. Cependant, il semblerait que le modèle déstocke trop vite ou ne stocke pas suffisamment, ce qui se traduit par une sous-estimation des températures nocturnes.

7- Télédétection, modèle et mesures intégrées

Après avoir obtenu d'excellents résultats à l'échelle du canyon urbain, il s'agit à présent d'étudier le comportement du modèle à une échelle plus étendue, à savoir celle du fragment urbain. La télédétection joue un rôle important dans cette phase, puisqu'elle permet à la fois de fournir des paramètres d'entrée au modèle, notamment les albédos des toits, mais elle sert également d'élément de validation grâce aux cartes de température de surface ou du rayonnement net. C'est dans cette double optique qu'interviennent ici les images obtenues lors des survols avion et hélicoptère.

A cette échelle du fragment urbain, il est également intéressant de confronter les grandeurs intégrées spatialement obtenues par les capteurs placés au sommet des mâts, avec d'une part les observations aéroportées, d'autre part les résultats obtenus par SOLENE.

7.1 Renseigner SOLENE par télédétection

Sur les images de télédétection, les toits des bâtiments, avec les surfaces de sols, constituent l'essentiel de ce qui est observé.

Afin d'attribuer un albédo aux toits des deux sites modélisés, nous nous basons sur les cartes d'albédo obtenues avec les images DAIS. En dépit de la résolution spatiale, les toits des bâtiments sont la plupart du temps identifiables, mais ne sont parfois représentés que par un ou deux pixels dans le sens de la largeur (c'est-à-dire perpendiculaire à l'axe de la rue). Pour cette raison, nous proposons de tracer un transect de chaque côté de la rue de l'Argonne, et de relever les valeurs d'albédo. Nous procédons de la même façon pour les bâtiments qui bordent les canyons adjacents au site du PEGE. En revanche, les surfaces des toits du PEGE et de la Faculté de Géographie possèdent une surface plus grande, et nous avons pu effectuer la moyenne des pixels correspondant pour obtenir l'albédo de ces toits.

[NB : par toit PEGE on entend les toitures des bâtiments bordant la cour intérieure ; les transects N et S concernent les toitures des bâtiments qui bordent les rues adjacentes, constituant avec les bâtiments précédents autant de canyons]

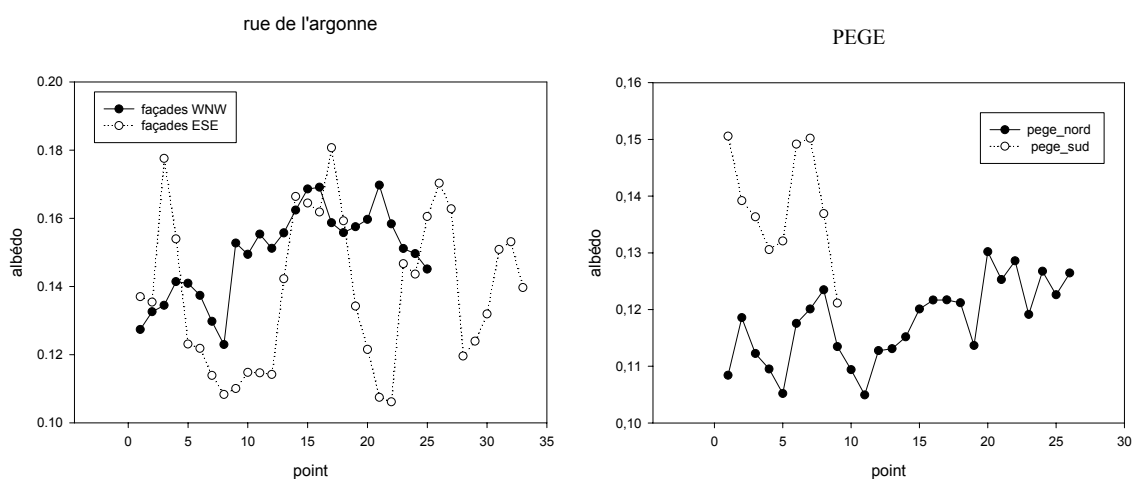


Figure 7.1 Albédos des toits obtenus sur les images DAIS (vol de 11h30) sur les sites de la rue de l'Argonne et du PEGE (28/07/2002)

La figure 7.1 présente les albédos obtenus pour chaque pixel pour les transects sélectionnés. La variabilité est forte puisque les valeurs se situent dans une fourchette comprise entre 0,10 et 0,18.

Les moyennes de chaque transect sont présentées dans le tableau ci-dessous, où figurent également les moyennes obtenues pour les toits du PEGE et de la Faculté de Géographie :

site	surface	moyenne	Ecart type
PEGE	Toit PEGE	0,077	0,006
	Transect toits N	0,117	0,007
	Transect toits S	0,140	0,008
Rue de l'Argonne	Toit faculté	0,104	0,016
	Transect toits E	0,149	0,013
	Transect toits W	0,138	0,022

Tableau 7.1 Albédos calculés sur les toits

En dépit de la variabilité, les valeurs moyennes des différents transects apparaissent finalement assez similaires. En ce qui concerne le site PEGE, transect N, les valeurs plus basses pourraient s'expliquer par l'inclusion possible de pixels à l'ombre ou partiellement à l'ombre. D'autre part, étant donné la difficulté d'attribuer certains pixels à un toit plutôt qu'à un autre, il nous a semblé raisonnable de fixer la même valeur d'albédo à l'ensemble des toitures des deux sites, à savoir 0,14 sachant que cet albédo est assorti d'une marge d'incertitude de l'ordre de $\pm 0,02$. Pour les toits du PEGE et de la Faculté de Géographie nous attribuons respectivement les valeurs de 0,08 et 0,10.

7.2 Comparaison des sorties température de surface et rayonnement net avec les valeurs obtenues par télédétection

Dans la suite l'objectif est de comparer les températures de surface et le rayonnement net simulés avec SOLENE avec les mêmes grandeurs obtenues par télédétection, à savoir, d'une part celles issues des images DAIS, d'autre part celles issues des images de la caméra hélicoptère (uniquement pour les températures de surface), et ce, pour les 3 vols de la journée. Il nous faut pour cela des surfaces bien identifiables sur les images, et relativement homogènes. Notre choix c'est naturellement porté sur la surface de la rue pour le site du canyon, et la cour du PEGE pour le site du « quartier », il s'agit dans les deux cas de surfaces recouvertes d'asphalte.

Dans cette optique, nous sélectionnons les parties correspondantes sur les images, et nous calculons les valeurs moyennes pour les pixels sélectionnés, avec les écarts types associés. Nous procédons de la même façon avec les mailles correspondantes sur la géométrie SOLENE.

Rappelons que les grandeurs mesurées lors des vols hélicoptère et celles issues des vols DAIS ne peuvent être comparées entre elles, puisqu'elles ont été obtenues lors de journées différentes.

7.2.1 Les températures de surface

Pour la comparaison des températures de surface simulées par SOLENE avec les mesures par télédétection, l'ensemble des résultats pour les deux sites et les trois survols sont rassemblés sur la figure 7.2 où on a représenté les températures de surface simulées par SOLENE en fonction des températures de surfaces obtenues par télédétection, à gauche pour les images DAIS, à droite pour les images de la caméra hélicoptère. Dans les deux cas, si l'on prend en considération le fait que les barres d'erreurs représentées correspondent à une dispersion de 1σ , les résultats sont très bons, les écarts ayant tendance à être un peu plus faibles avec les données de la caméra. La plupart du temps les différences observées ne dépassent guère 1°C .

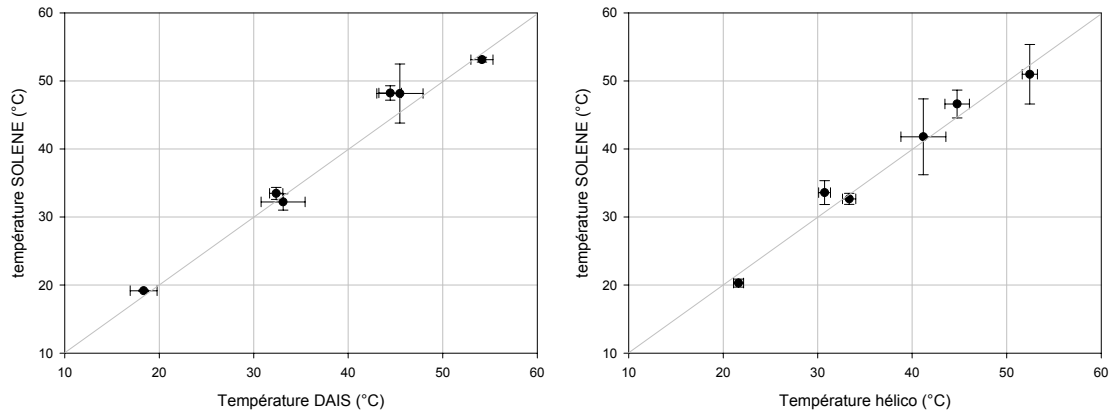


Figure 7.2 Comparaison entre les températures de surfaces modélisées par SOLENE et celles obtenues par télédétection sur l'asphalte des sites du PEGE et de la rue de l'Argonne à 3 moments de la journée

En dehors de la précision relative aux mesures et aux traitements effectués, il ne faut pas oublier ici que le pas de temps choisi pour la simulation avec SOLENE est d'1/4 d'heure, et comme nous l'avons vu préalablement (chapitre 3), la température peut évoluer de manière non négligeable durant ce laps de temps, notamment au moment où la surface commence à recevoir le rayonnement solaire direct, ainsi qu'au moment où elle repasse à l'ombre.

Si l'on se réfère à la conclusion de la section 3.1.2 du chapitre 4, relative à l'incertitude sur la détermination des températures de surface par télédétection, les résultats obtenus ici peuvent être considérés comme très bons.

7.2.2 Le rayonnement net

Le calcul du rayonnement net sur les images DAIS utilise certaines grandeurs extraites des images, et d'autres obtenues grâce aux sites de mesures fixes :

- le rayonnement infrarouge émis par la surface, calculé à partir des températures de surface, ainsi que les albédos sont obtenus suite aux traitements effectués sur les images.
- le rayonnement global incident, et le rayonnement infrarouge descendant sont renseignés grâce aux mesures réalisées sur le site de l'IPCB, puisqu'ils sont considérés comme homogènes au dessus de la ville.

En raison du second point, on est confronté à une difficulté pour l'estimation du rayonnement net sur les pixels de l'image qui correspondent à des surfaces à l'ombre, une situation très spécifique au milieu urbain 3D et fréquente. En effet, le rayonnement global réfléchi calculé directement avec l'albédo affecté au pixel va se trouver très fortement surestimé par rapport à la situation réelle où le rayonnement global incident est très faible et ne comporte que du diffus. En conséquence le rayonnement net sera non significatif parce que très fortement surestimé. C'est le cas par exemple de la rue de l'Argonne, à l'ombre le matin et le soir : les rayonnements nets calculés pour ces heures là n'ont aucune signification. Autrement dit, seuls peuvent être comparés aux sorties SOLENE les rayonnements nets calculés sur les pixels de l'image qui ne sont pas à l'ombre. La solution serait d'appliquer à l'image un masque identifiant tous les pixels à l'ombre : la réalisation d'un tel masque est un problème de classification qui s'avère difficile. Aussi, dans une première phase, nous avons contourné le problème en ne considérant que l'image DAIS acquise en milieu de journée, pour laquelle les effets d'ombres sont minimisés. De cette façon on peut obtenir une première cartographie sommaire étendue à l'agglomération du rayonnement net. En ce qui concerne le PEGE, les dimensions de la cour permettent d'avoir pour chaque vol une portion ensoleillée suffisamment représentative, sur laquelle seront effectuées les comparaisons.

Afin de confronter ces valeurs aux sorties SOLENE, deux calculs de rayonnement net sont effectués : l'un en prenant l'émissivité d'un corps noir, c'est à dire égale à 1, l'autre en effectuant la moyenne des émissivités sur les 4 bandes thermiques. Cette opération, comme il apparaît plus bas, nous confirme l'importance de l'émissivité et l'intérêt de bien l'évaluer, puisqu'elle entraîne des variations du rayonnement net pour un même site et un même instant de 40 à 60 W/m² selon les cas (tableau 7.2).

Surface/heure	DAIS 1 ($\pm\sigma$) : $\varepsilon=1$	DAIS 2 ($\pm\sigma$) : $\varepsilon = \frac{1}{4} \sum_{74}^{77} \varepsilon_i$	SOLENE ($\pm\sigma$)
PEGE 7h	279 (± 8)	237 (± 10)	253 (± 4)
PEGE 11h30	556 (± 9)	496 (± 12)	512 (± 3)
PEGE 16h	265 (± 17)	214 (± 19)	220 (± 3)
Argonne 11h30	587 (± 27)	538 (± 22)	542 (± 2)

Tableau 7.2 Rayonnement net simulé par SOLENE comparé au rayonnement calculé sur les images DAIS (W/m²) avec : 1) émissivité considérée égale à 1, 2) émissivité considérée comme l'émissivité moyenne sur les 4 bandes infrarouge

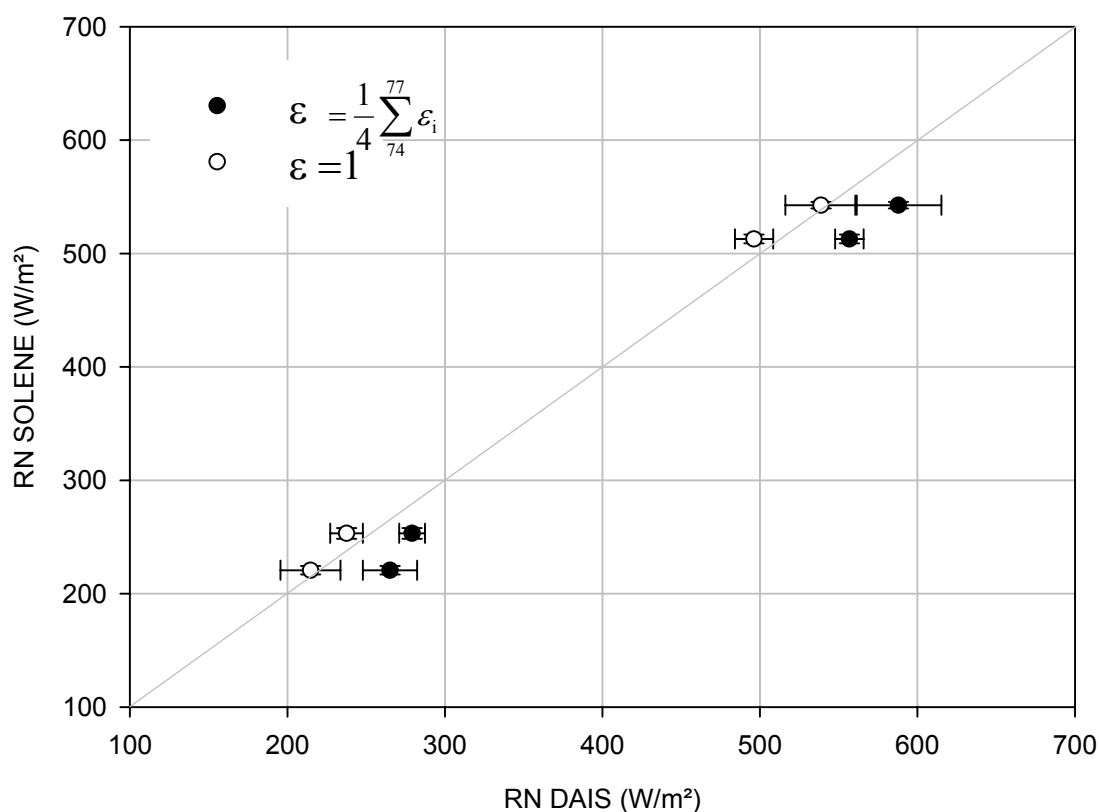


Figure 7.3 Comparaison du rayonnement net calculé sur les images DAIS avec le rayonnement net simulé par SOLENE.

Les valeurs de rayonnement net obtenues avec SOLENE se situent dans l'intervalle entre les rayonnements nets calculés avec les deux valeurs d'émissivité, mais toujours plus proches de celle calculée avec une émissivité égale à un, ce qui est plausible et tend à indiquer qu'en effet l'émissivité totale est plus élevée que l'émissivité moyenne dans la bande [8-12 μ m]. Les simulations SOLENE de rayonnement net donnent donc des résultats satisfaisants en comparaison avec les données DAIS.

Les écarts types moins élevés pour les valeurs issues des simulations SOLENE traduisent l'homogénéité de la surface de la cour du PEGE et de la rue de l'Argonne représentés par le modèle par rapport à la réalité.

7.3 Grandeurs intégrées spatialement

7.3.1 Comparaison mesures mâât/sorties SOLENE

Comme nous l'avons vu dans la partie 6.1.1, le logiciel SOLENE permet de placer un capteur fictif dans la scène. Nous avons mis à profit cette fonctionnalité du modèle pour simuler les rayonnements, à savoir le rayonnement solaire réfléchi ainsi que le flux infrarouge émis par la surface, afin de les comparer aux mêmes grandeurs mesurées par les capteurs placés sur le mâât du PEGE. Contrairement aux comparaisons effectuées dans la partie 6.1, le capteur est ici placé suffisamment haut pour intégrer une surface dont l'échelle correspond à celle du fragment urbain.

7.3.1.1 Rayonnement global réfléchi

La simulation du rayonnement global réfléchi au dessus du PEGE donne de très bons résultats comme en atteste la figure 7.4. La variation diurne est très bien reproduite par le modèle, en particulier dans la phase d'augmentation au cours de la matinée. Globalement, les écarts entre valeurs simulées et mesurées n'excèdent pas 10 Wm⁻². Néanmoins, il est intéressant de remarquer que d'une part le maximum simulé est légèrement supérieur au maximum mesuré, et que d'autre part le rayonnement réfléchi mesuré présente une légère asymétrie qui n'est pas reproduite par la simulation, celle-ci étant symétrique par rapport à l'heure du midi solaire. Même si le capteur fictif a été placé autant que possible à l'emplacement exact du capteur réel, des tests ont montré que le rayonnement simulé était très sensible au positionnement dans la scène, vraisemblablement du fait des ombres portés des bâtiments et des réflexions par les façades du côté de la cour intérieure. Ceci est probablement, et notamment le fait que les façades comportent une forte proportion d'étendues vitrées, l'explication de la légère asymétrie du rayonnement réfléchi mesuré. Cette asymétrie n'est pas reproduite car il est quasiment impossible de modéliser correctement de telles surfaces en terme d'albédo.

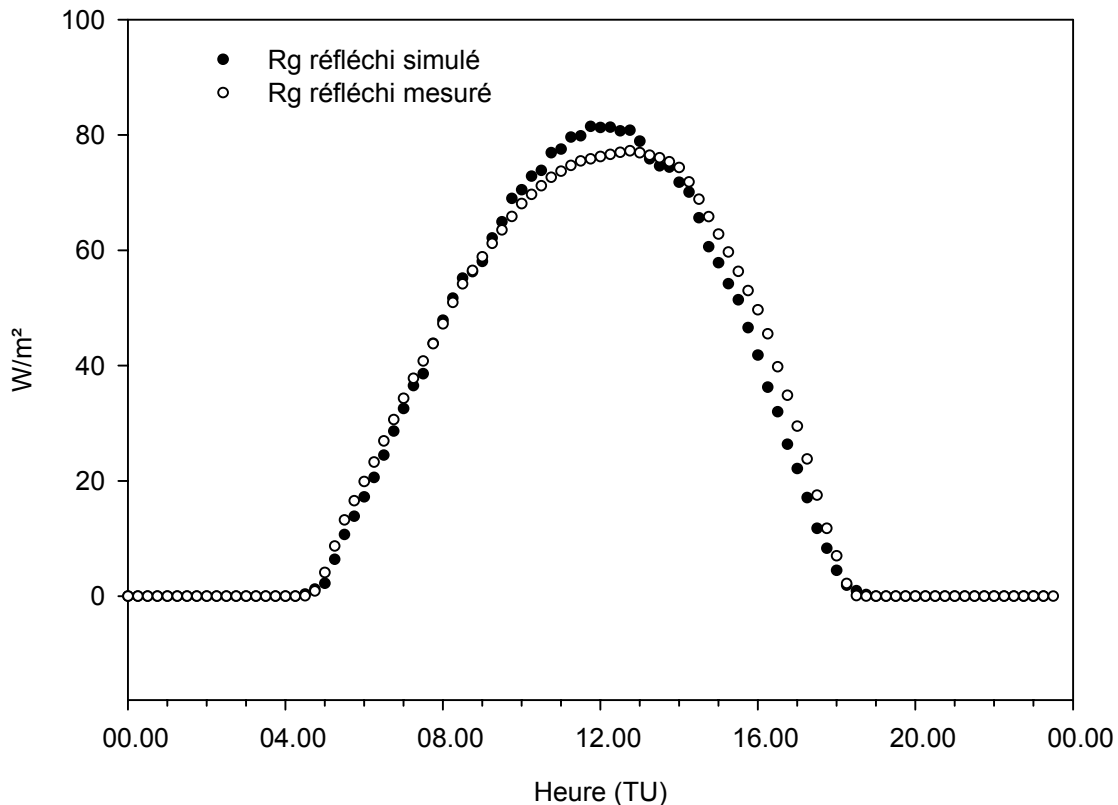


Figure 7.4 Comparaison entre le rayonnement réfléchi mesuré sur le mât du PEGE et le rayonnement réfléchi simulé par SOLENE sur un capteur fictif placé à l'emplacement du sommet du mât

7.3.1.2 Rayonnement infrarouge émis par la surface

Le modèle permet de simuler le flux infrarouge émis par la scène vue de l'emplacement du capteur fictif au sommet d'un mât. Pour plus de commodité dans la discussion, ce flux ainsi que le flux infrarouge déduit des mesures (cf. 3.2.2.2), sont convertis en température de surface en inversant une loi de Stefan-Boltzmann.

Les résultats sont plutôt décevants (figure 7.5) et appellent deux observations:

- l'amplitude journalière, de l'ordre de 22°C pour la valeur déduite des mesures, passe à 31°C lors de la simulation. Si, comme lors des simulations au niveau de la surface, SOLENE sous-estime la température de surface nocturne, les maxima sont ici surestimés, avec une différence de 5°C à 6°C par rapport aux températures mesurées.
- il existe un décalage temporel flagrant entre les variations de la température mesurée et simulée. Ceci se voit particulièrement sur le maximum dont le décalage atteint 1 h à 1h30.

Remarque : les fluctuations qui affectent les valeurs mesurées ne sont pas significatives ; elles résultent des corrections appliquées aux données brutes pour corriger de l'influence du rayonnement global sur le capteur utilisé.

En ce qui concerne l'amplitude diurne simulée, des essais ont montré qu'elle ne pouvait pas être réduite de façon conséquente sauf à donner aux paramètres thermiques des éléments de la scène des valeurs irréalistes. Si la sous-estimation récurrente des températures nocturnes pouvait être réglée, le désaccord total d'environ 9°C serait ramené à environ 5-6 °C.

En ce qui concerne le décalage temporel, ce sont les mesures qui soulèvent question car il est de règle, en tous cas pour les milieux naturels, que le maximum de température de surface soit en retard de phase d'environ 1h30 sur le maximum du rayonnement global, ce déphasage étant directement dépendant de l'inertie thermique.

Il est donc difficile à ce stade d'avancer des explications. Cependant, comme nous l'avons vu au paragraphe 6.2.2, les températures de surface de la cour du PEGE sont très bien simulées. Le problème pourrait provenir des toits du PEGE, qui, du fait de leur hétérogénéité et de leur constitution matérielle, sont mal paramétrés et mal pris en compte par SOLENE. Pour la simulation, nous avons en effet, été contraints d'assigner les mêmes caractéristiques thermiques à l'ensemble de la toiture. Ainsi, la température de surface simulée pour les toits est homogène, alors que les images DAIS et hélicoptère prouvent que ce n'est pas le cas. Par ailleurs, et surtout, ces toits sont des milieux composites constitués de plusieurs couches de matériaux différents dont le comportement thermique dynamique ne peut être reproduit avec les éléments dont nous disposons.

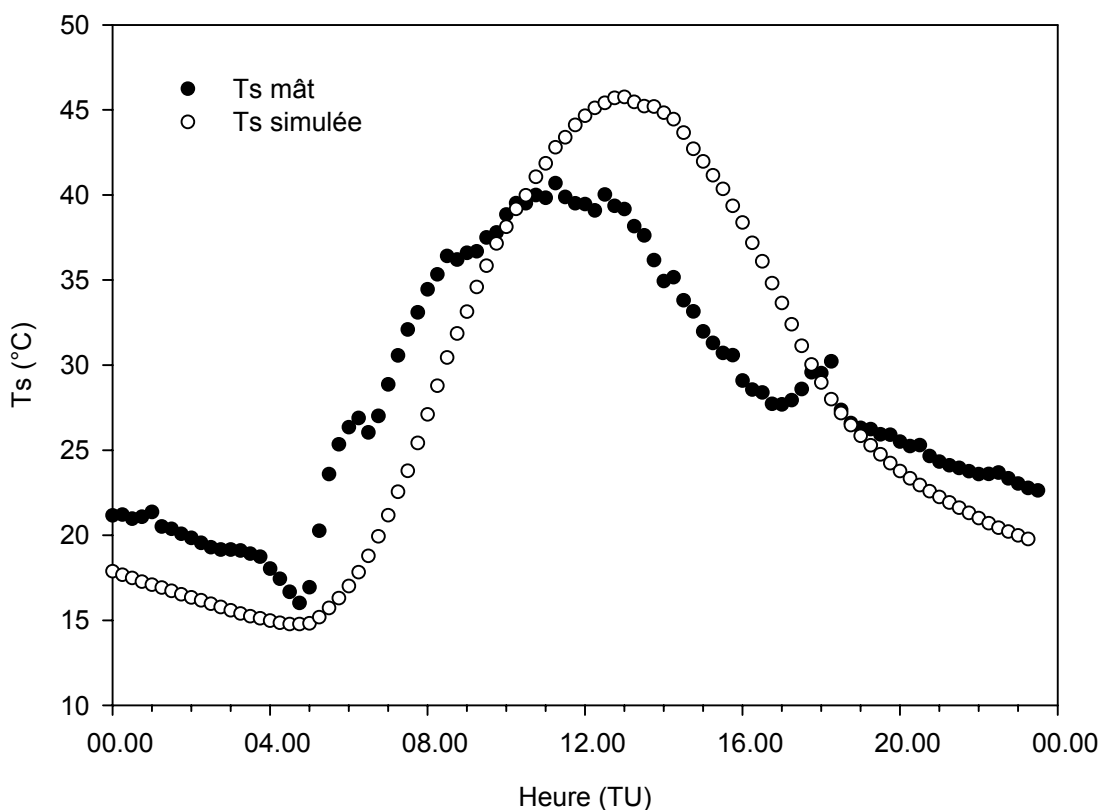


Figure 7.5 Comparaison entre la température de surface calculée au sommet du mât du PEGE et celle simulée par SOLENE sur un capteur fictif au même emplacement (15/08).

7.3.2 Comparaison mesures mâts/images DAIS

Les mesures obtenues avec les capteurs placés aux sommets des mâts correspondent à des mesures intégrées spatialement de différents paramètres entrant dans le bilan radiatif, et il est particulièrement intéressant de les comparer à ces mêmes paramètres obtenus par télédétection. Cette démarche constitue alors la première étape d'une validation d'intégration de données de télédétection, de l'échelle locale à une échelle pertinente pour la climatologie urbaine. Cette démarche est différente de celle de la section précédente où il s'agissait de comparer ces mêmes mesures aux sorties du modèle

de façon à identifier les problèmes tant en ce qui concerne le fonctionnement du modèle qu'en ce qui concerne l'interprétation des observations. Dans la présente section, il s'agit de confronter aux mesures réalisées sur les mâts, les sorties d'albédo, de température de surface et de rayonnement net extraites des images DAIS. Les mâts concernés sont ceux du PEGE et de l'INSA.

Il convient de préciser que ces deux types de mesures sont différentes dans le sens où pour les mesures réalisées par les capteurs au sommet des mâts, les angles solides des différents éléments de la scène vus par le capteur interviennent, alors que dans le cas des mesures aériennes, chaque pixel porte le même poids. En d'autres termes, dans l'évaluation des paramètres issus des images, on effectue une simple somme (ou moyenne), alors qu'un calcul rigoureux exigerait de subdiviser le champ de vue total du capteur en angles solides élémentaires sous-tendus par les éléments de la scène et de sommer les luminances émanant de chaque élément calculées à partir de ses caractéristiques optiques. Un tel calcul devrait s'appuyer sur un modèle numérique d'élévation (MNE) détaillé pour tenir compte des effets de masque et permettre d'incorporer toute la donnée géométrique. En effet, des bâtiments peuvent obstruer le champ de vue du capteur, ce qui fait que certains éléments de surface masqués n'entrent pas en compte dans la mesure « mât », alors que les pixels correspondants interviennent dans le calcul des moyennes réalisées sur les images. Il faudrait aussi incorporer les effets de l'atmosphère et en particulier celui de la couche d'air entre la scène et le capteur. Un tel calcul est très difficile et susceptible d'introduire de nombreuses incertitudes. Aussi il a paru préférable dans un premier temps d'adopter une procédure simplifiée. Il faut noter que, dans le domaine infrarouge, et compte tenu de la procédure adoptée, nous travaillons comme dans la section précédente directement sur les températures de surface données par la télédétection.

Le but de ce paragraphe n'est donc aucunement une validation de résultats, mais de voir si à partir d'une procédure simple, les données de télédétection peuvent fournir des paramètres spatialisés convenables.

Une difficulté rencontrée dans l'intégration spatiale de données images est celle du champ de vue réel (effectif) du capteur : cette valeur, qui n'est jamais 180° à cause d'effets de masque propres à l'instrument et d'une réponse angulaire non idéale, n'est jamais donnée avec précision. Compte tenu des informations disponibles le champ de vue effectif, pour les capteurs tant de rayonnement global que de flux infrarouge, a été pris égal à 150°-160°. Pour une hauteur de mât de 30 m, ceci veut dire que le capteur voit approximativement à 150 m à la ronde au niveau du sol, avec cependant une marge d'incertitude importante.

L'effet de la géométrie 3-D sur les mesures mât est plus marqué a priori pour le site du PEGE, le site de l'INSA étant plus dégagé. Afin de tenir compte de l'incertitude sur le champ de vue effectif et pour évaluer l'effet de l'intégration spatiale, nous avons considéré sur les images des cercles de rayons différents, centrés sur les emplacements correspondant aux mâts. Les rayons R des cercles en question sont de 50, 100, 150 et 200 m, et pour chacun de ces cercles, des valeurs moyennes i) d'albédo, ii) de température de surface et iii) de rayonnement net (uniquement sur l'image de midi) sont calculées.

7.3.2.1 Albédo

Date/heure	R=50	R=100	R=150	R=200	Mesure
27/7 16h	0,069 (±0,013)	0,077 (±0,022)	0,088 (±0,030)	0,098 (±0,039)	0,088
28/7 7h	0,077 (±0,011)	0,083 (±0,024)	0,094 (±0,034)	0,104 (±0,038)	0,102
28/7 11h30	0,082 (±0,008)	0,085 (±0,018)	0,095 (±0,025)	0,112 (±0,034)	0,086

Tableau 7.3 Albédos PEGE

Date/heure	R=50	R=100	R=150	R=200	Mesure
27/7 16h	0,102 (±0,039)	0,110 (±0,043)	0,114 (±0,047)	0,114 (±0,045)	0,133
28/7 7h	0,109 (±0,047)	0,120 (±0,048)	0,120 (±0,051)	0,122 (±0,049)	0,144
28/7 11h30	0,111 (±0,041)	0,124 (±0,042)	0,124 (±0,044)	0,125 (±0,042)	0,125

Tableau 7.4 Albédos INSA

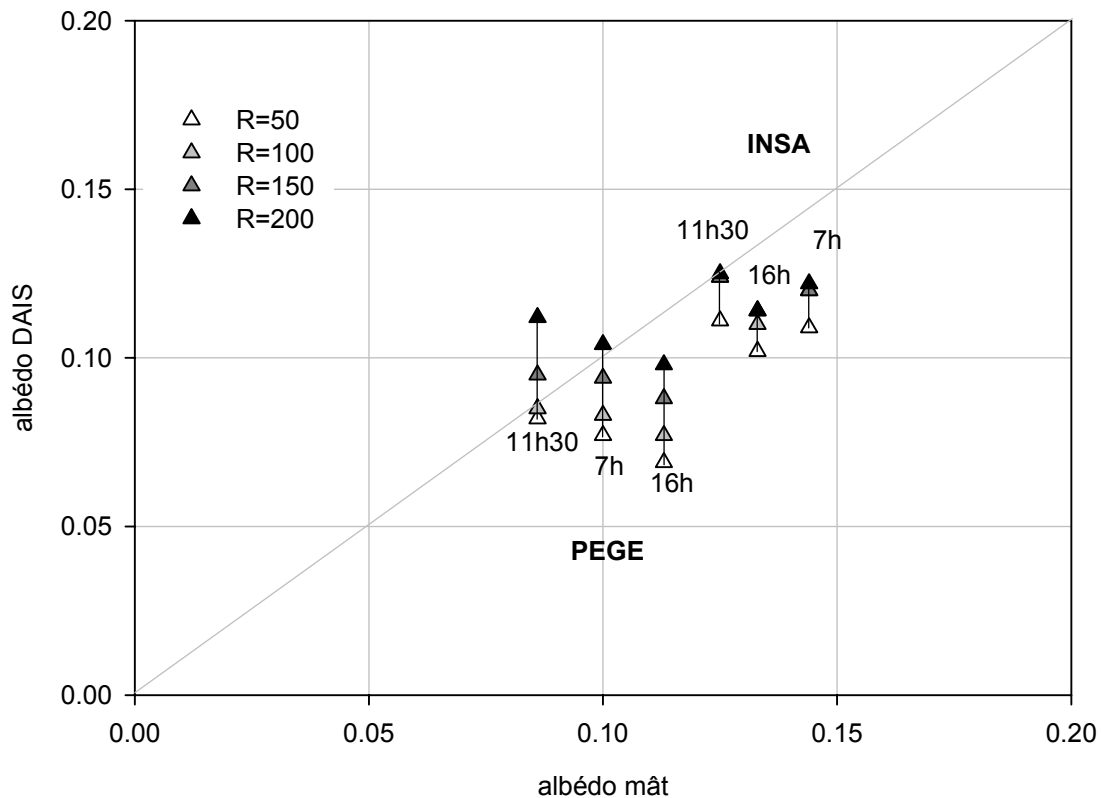


Figure 7.6 Comparaison entre les albédos mesurés sur les mâts du PEGE et de l'INSA avec ceux obtenus sur les images DAIS.

L'examen de la figure 7.6 montre que les deux sites se différencient bien, notamment lorsque l'albédo est calculé sur un cercle de rayon de 50m autour des mâts. Sur les deux sites, l'albédo augmente à mesure que l'on augmente la taille du cercle, cette augmentation étant plus marquée pour le site du PEGE, alors que pour le site INSA les valeurs d'albédo saturent plus rapidement. Cette différence de comportement tient vraisemblablement à la différence d'environnement : le site PEGE très minéral localement englobe progressivement la végétation bordant les canyons alentours. La tendance observée montre aussi et confirme qu'au delà d'une certaine échelle d'observation, l'albédo d'une ville ne présente guère de fluctuations et tend vers une valeur de l'ordre de 0,11 (± 0.01)

Le meilleur accord entre les albédos calculés sur les images DAIS et les mesures mâts s'observe fort logiquement à midi, puisque le problème des surfaces à l'ombre se pose sur les images DAIS de 7h et 16h, ce qui tend à sous-estimer l'albédo.

En tenant compte de la marge d'incertitude évaluée précédemment à 0,02 sur l'albédo estimé à partir d'une image DAIS, on note que le rayon d'intégration optimum se situe bien autour de 150 m.

7.3.2.2 Température de surface

Les températures de surface relatives aux mesures au sommet des mâts sont déterminées à partir du flux infrarouge émis par la surface (avec une émissivité totale considérée égale à 0,98), et comparées dans le tableau suivant à la valeur moyenne ($\pm 1\sigma$) des températures des pixels contenus dans des cercles de différents rayons :

Date/heure	R=50	R=100	R=150	R=200	Mesure
27/7 16h	35,6 ($\pm 5,7$)	33,5 ($\pm 6,5$)	33,1 ($\pm 6,9$)	32,2 ($\pm 6,7$)	34,4
28/7 7h	27,4 ($\pm 5,6$)	25,2 ($\pm 5,8$)	24,5 ($\pm 6,2$)	24,1 ($\pm 6,0$)	29,4
28/7 11h30	52,9 ($\pm 10,1$)	47,2 ($\pm 12,1$)	46,3 ($\pm 11,8$)	43,11 ($\pm 11,1$)	42,0

Tableau 7.5 Température de surface PEGE

Date/heure	R=50	R=100	R=150	R=200	Mesure
27/7 16h	34,7 ($\pm 6,7$)	33,7 ($\pm 7,0$)	32,1 ($\pm 6,6$)	32,2 ($\pm 6,3$)	39,7
28/7 7h	25,5 ($\pm 4,4$)	25,1 ($\pm 5,8$)	24,9 ($\pm 6,1$)	24,8 ($\pm 6,2$)	21,9
28/7 11h30	41,9 ($\pm 9,7$)	43,6 (11,7)	42,9 ($\pm 11,9$)	42,3 ($\pm 11,6$)	43,0

Tableau 7.6 Température de surface INSA

Les résultats (figure 7.7) appellent plusieurs observations :

- les deux sites se distinguent nettement par l'impact de l'aire d'intégration, cet impact étant faible pour le site INSA, plus hétérogène à toute échelle. Sur le site du PEGE, l'impact est très net, et la température moyenne diminue à mesure que le rayon du cercle augmente. Cette tendance s'observe pour les trois vols. Elle s'explique, comme pour l'albédo, par l'intégration progressive de la végétation alentour, ce qui a pour effet de diminuer la température de surface moyenne. D'autre part, deux bâtiments du secteur PEGE ont des toitures dont les températures de brillance sont anormalement basses, ce qui est très visible sur les images infrarouge. L'explication tient selon toute vraisemblance à une émissivité particulièrement basse dans la bande [8-14 μ m] de ces toitures. Une vérification directe n'a cependant pas pu être effectuée. Ces surfaces tendent à réduire fortement la température moyenne lorsqu'elles entrent dans le champ d'intégration.
- sur le site PEGE l'impact du rayon d'intégration est exacerbé pour le vol de mi-journée, la température moyenne calculée sur le cercle de rayon le plus faible étant de près de 10°C, l'écart-type étant lui aussi très élevé. Ce dernier point tient à l'hétérogénéité des toitures des bâtiments proches de la cour intérieure. En revanche, la température moyenne très excessive serait une indication forte que l'imageur DAIS ne mesure pas correctement les radiances élevées, une tendance déjà signalée auparavant.
- Comme pour l'albédo, un rayon d'intégration de 150 m semble adapté. Cependant, si l'on tient compte de la marge d'erreur évaluée précédemment à $\pm 2^\circ\text{C}$ sur la détermination des températures de surface à partir des images, on note que l'accord entre mesures mât et mesures image est *à la marge*, autrement dit n'est pas vraiment très bon systématiquement.

Il est difficile à ce stade de tirer des conclusions générales, tant les causes d'incertitudes sont multiples : i) problèmes techniques liés au capteur ; ii) méthode de détermination des températures de surface à partir des luminances capteur ; iii) méthode simplifiée pour l'estimation de la température de surface moyenne ; iv) impact de l'atmosphère ; v) sans oublier les incertitudes sur les mesures mât elles-mêmes.

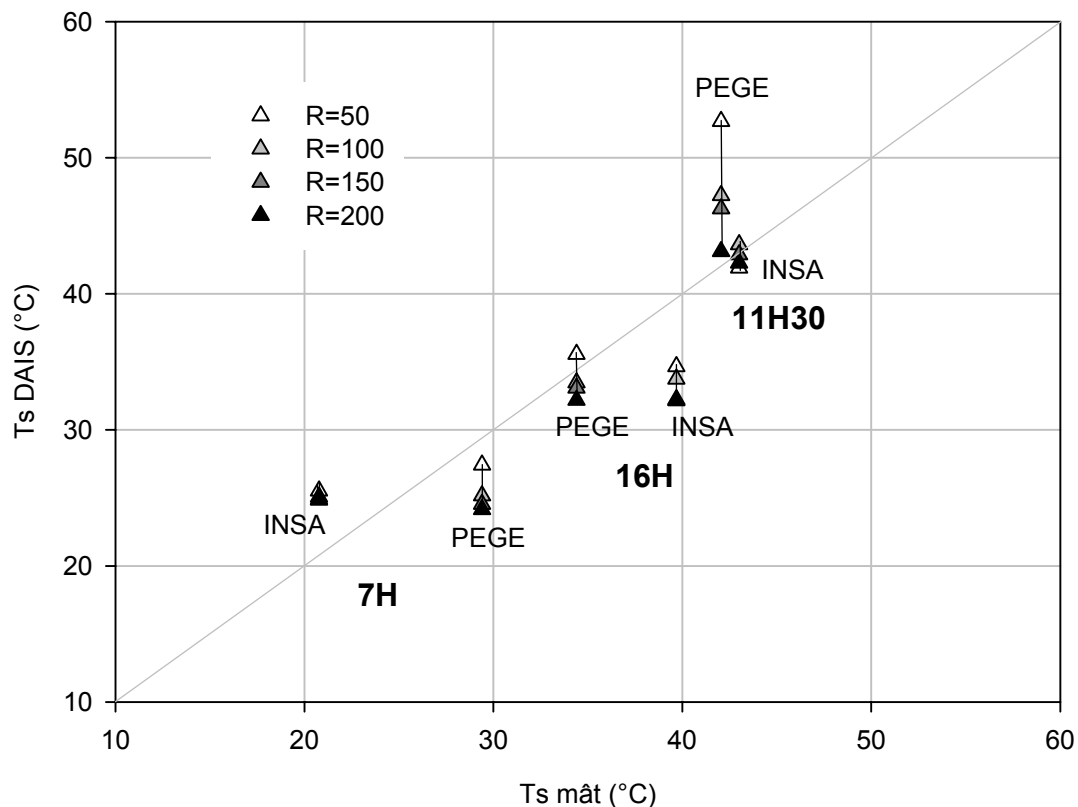


Figure 7.7 Comparaison entre les températures de surfaces obtenues sur les images DAIS avec celles déduites des mesures réalisées au sommet des mâts.

7.3.2.3 Le rayonnement net

La détermination du rayonnement net à partir des images de télédétection pose un certain nombre de problèmes. Par ailleurs, nous rappelons que seul le vol de midi peut être pris en compte. Une difficulté majeure tient à la valeur à assigner à l'émissivité totale pour le calcul du flux infrarouge émis par la surface. Comme nous l'avons vu auparavant (6.2.2.2), nous avons envisagé deux valeurs d'émissivité différentes, afin de pouvoir apprécier la marge d'erreur : une émissivité égale à l'unité, et une émissivité égale à la moyenne des émissivités sur les 4 premiers canaux DAIS.

	émissivité	R=50	R=100	R=150	R=200	Mesure
PEGE	moyenne	567 (± 68)	593 (± 79)	595 (± 77)	598 (± 74)	600 Wm ⁻²
	=1	514 (± 78)	545 (± 91)	552 (± 88)	557 (± 85)	
INSA	moyenne	604 (± 58)	585 (± 72)	587 (± 71)	589 (± 71)	576 Wm ⁻²
	=1	558 (± 67)	540 (± 84)	545 (± 83)	548 (± 83)	

Tableau 7.7 Rayonnement net (W/m²) obtenu sur les images DAIS : sites du PEGE et de l'INSA

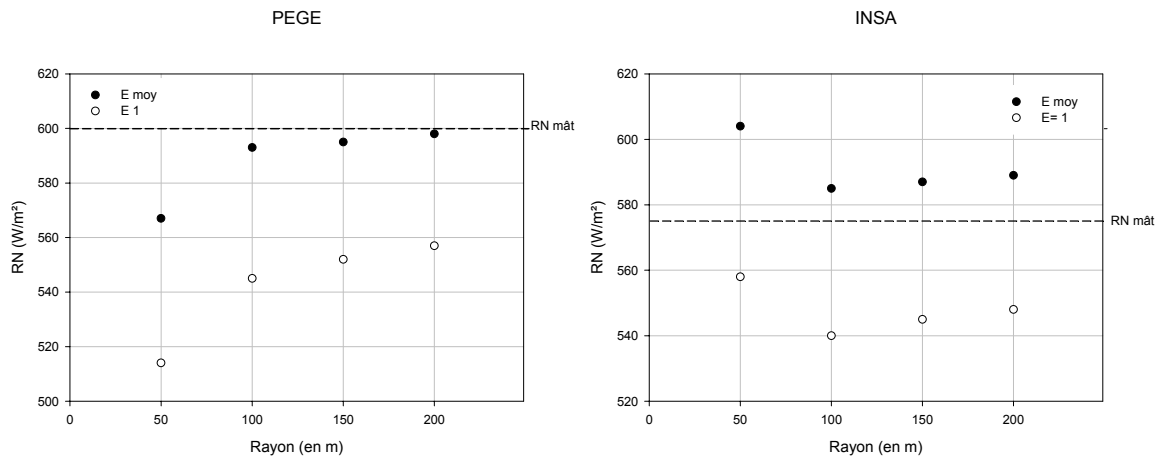


Figure 7.8 Comparaison entre le rayonnement net obtenu sur les images DAIS et celui mesuré au sommet des mâts

La comparaison avec les mesures mâts réalisée pour les deux sites appelle quelques commentaires (figure 7.8) :

- l'impact de l'aire d'intégration est finalement peu important, sauf pour le rayon le plus faible pour lequel on observe sur le site PEGE l'effet de la très forte surestimation des températures DAIS des toitures.
- les deux valeurs d'émissivité se traduisent par un écart de l'ordre de 40 Wm^{-2} ce qui est important. Pour le site INSA ces deux valeurs encadrent le rayonnement net mât. Pour le site PEGE, la tendance serait à favoriser la valeur d'émissivité la plus faible alors que dans la section 6.2, on observait la tendance inverse. Il est possible que les toitures au comportement « anormal » induisent une émissivité totale moyenne plus faible.
- si les valeurs de rayonnement net mesurées à partir des deux mâts diffèrent de 25 Wm^{-2} environ, on a du mal à retrouver ce résultat sur les valeurs déduites des images, l'écart étant de moins de 10 Wm^{-2} . Il reste que la différence entre les valeurs mâts est elle-même inférieure à la marge d'incertitude sur des mesures de rayonnement net.
- globalement, sans être vraiment satisfaisant, le résultat n'est pas désastreux et tend à indiquer que le rayonnement net, même par une méthode simplifiée, peut être estimé sur une image de télédétection avec une marge de l'ordre de 20 Wm^{-2} , pour autant que l'aire d'intégration ne soit pas trop faible. En revanche, il apparaît doré et déjà difficile de mettre clairement en évidence des variations spatiales du rayonnement net, intrinsèquement faibles sur un espace urbain.

7.4 Retour sur le flux de chaleur sensible

Comme on l'a vu au chapitre 3, section 3.3, le flux de chaleur sensible H a été mesuré pendant toute la durée de la campagne, à trois niveaux à l'intérieur du canyon « rue de l'Argonne », et au sommet des mâts sur les sites PEGE (mât de 30m) et IPG (mât de 12m sur le toit d'un bâtiment de 25 m de hauteur environ). Les deux instruments sur mât se trouvent donc approximativement à la même hauteur de 30 m environ par rapport au sol. Les environnements sont cependant différents : très minéral au PEGE qui s'apparente quelque peu à un canyon plus « ouvert » que le canyon « rue de l'Argonne » ; moins dense et plus hétérogène pour le site IPG. Par ailleurs, le flux de chaleur sensible, conjointement au flux de chaleur latente, a été mesuré du 14 au 19 août au quatrième niveau de l'échafaudage, c'est à dire au sommet du canyon ; il est donc intéressant d'examiner plus en détail le flux H mesuré sur les trois sites en même temps.

Sans entrer dans les problèmes de modélisation du flux de chaleur sensible en zone urbaine, il n'est pas interdit de faire l'hypothèse simple que H est proportionnel à un gradient de température, que l'on pourra prendre, par similitude avec les surfaces naturelles, égal à $(T_s - T_a)$, T_s étant la température de surface et T_a la température de l'air. La température de l'air est mesurée en même temps que les paramètres de fluctuations. Pour la température de surface, la solution adoptée consiste à inverser le flux infrarouge émis par la surface, quantité qui est mesurée systématiquement avec le bilan radiatif. Cette température a l'avantage d'être intégrée spatialement à l'échelle du champ de vue de l'instrument. Toutefois, au 4^e niveau de l'échafaudage, le flux IR émis est mesuré directement, alors que sur les mâts PEGE et IPG, cette quantité doit être déduite du bilan radiatif, seule grandeur directement mesurée simultanément au rayonnement global incident et réfléchi. Cette grandeur a part ailleurs, comme nous le signalons dans le paragraphe 3.2.3 fait l'objet de corrections. Les répercussions de cette correction sur $T_s - T_a$ seront étudiées pour les deux sites en question.

7.4.1 Site de la rue de l'Argonne

La quantité $(T_s - T_a)$ en fonction de H pour le site « 4^e niveau » est représentée sur la figure (7.9) pour la période 14-19 août, entre 07h00 et 19h00. On note quelques valeurs négatives de $(T_s - T_a)$ qui s'observent le matin avant 8h et ne sont certainement pas significatives, mais liées à du bruit et des erreurs de mesure. Il faut noter aussi que le flux infrarouge émis a été inversé ici avec une émissivité totale égale à l'unité ; le fait de prendre une émissivité totale inférieure rehausserait les températures de surface, d'autant plus que le flux radiatif est faible. Ceci pourrait corriger les valeurs négatives de $(T_s - T_a)$. Sur la figure (7.10) les valeurs mesurées s'organisent sensiblement linéairement avec cependant une dispersion transversale forte.

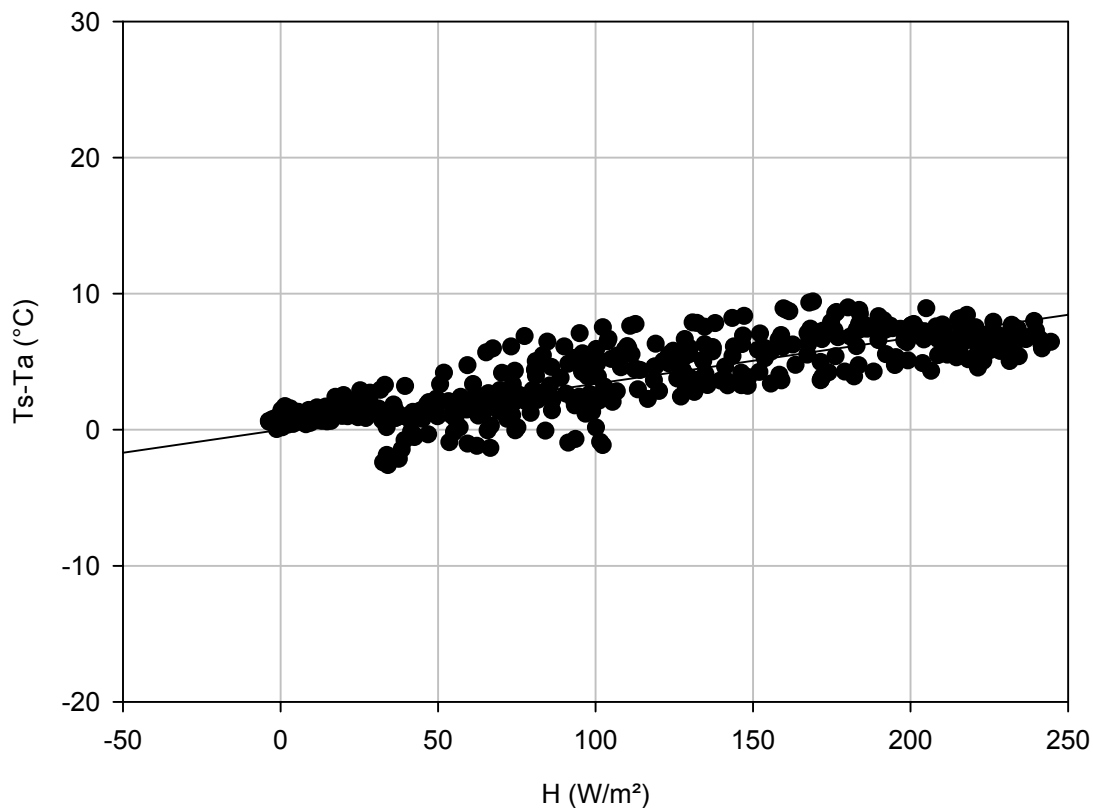


Figure 7.9 $T_s - T_a$ en fonction de H au 4^eme niveau de l'échafaudage (période du 14 au 19/08)

7.4.2 Le site du PEGE

Sur la figure (7.10) sont représentées $(T_s - T_a)$ vs H jour par jour : comme on l'a déjà vu, la journée du 14/08 est quelque peu perturbée dans la matinée, alors que les journées du 15 au 18/08 sont des journées de beau temps, une perturbation commençant à s'installer à partir du 19/08. Alors que les 14 et 15 août on observe un comportement très sensiblement linéaire, il n'en est plus de même en fin de période, en particulier si l'on se réfère à la journée du 18 et surtout du 19 août : la relation $(T_s - T_a)$ se sépare en deux branches, non linéaires, une branche correspondant approximativement à la première partie de la journée, une branche à la deuxième partie.

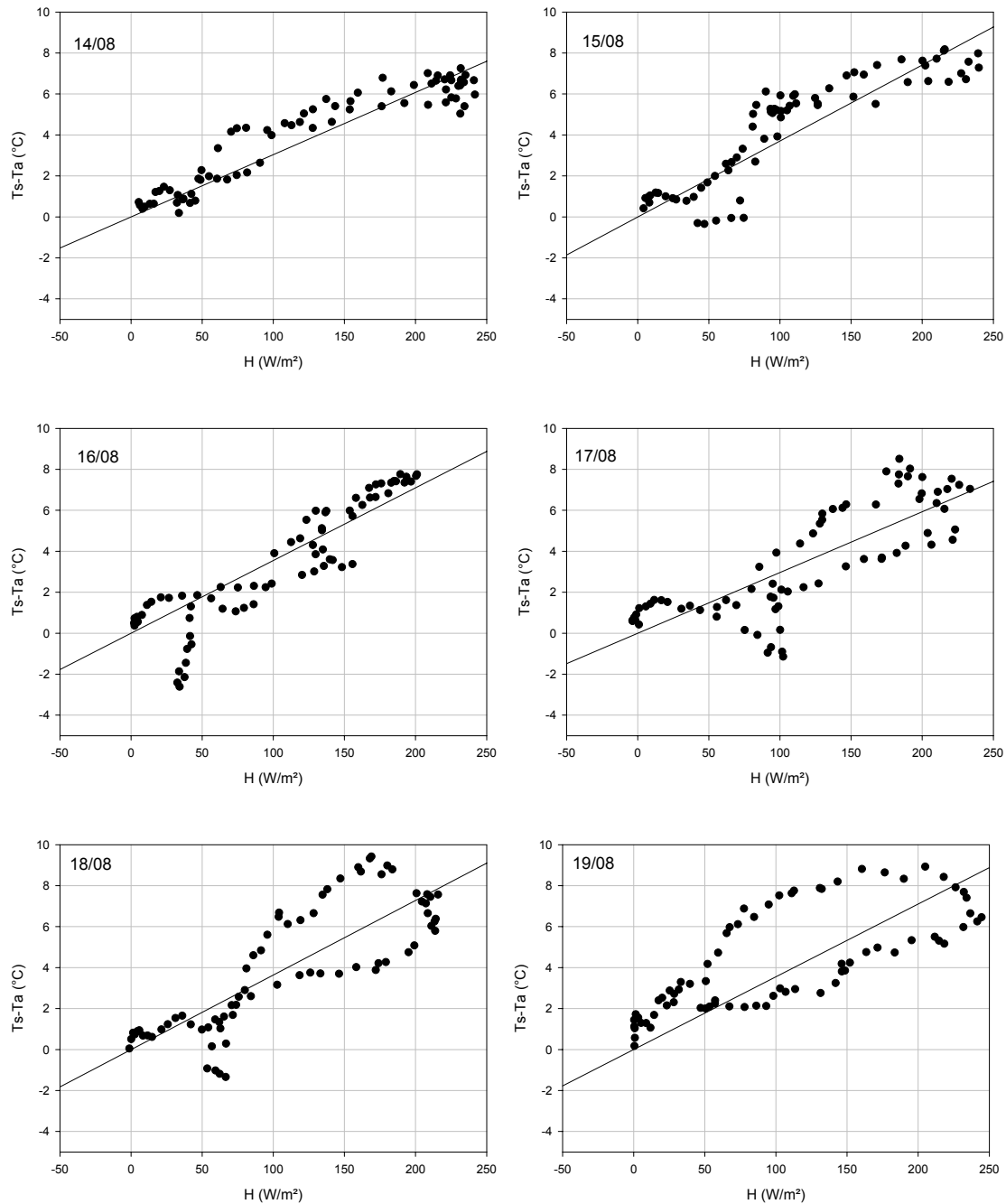


Figure 7.10 : $T_s - T_a$ en fonction de H au 4^{ème} niveau de l'échafaudage représenté pour chaque journée entre le 14 et le 19/08

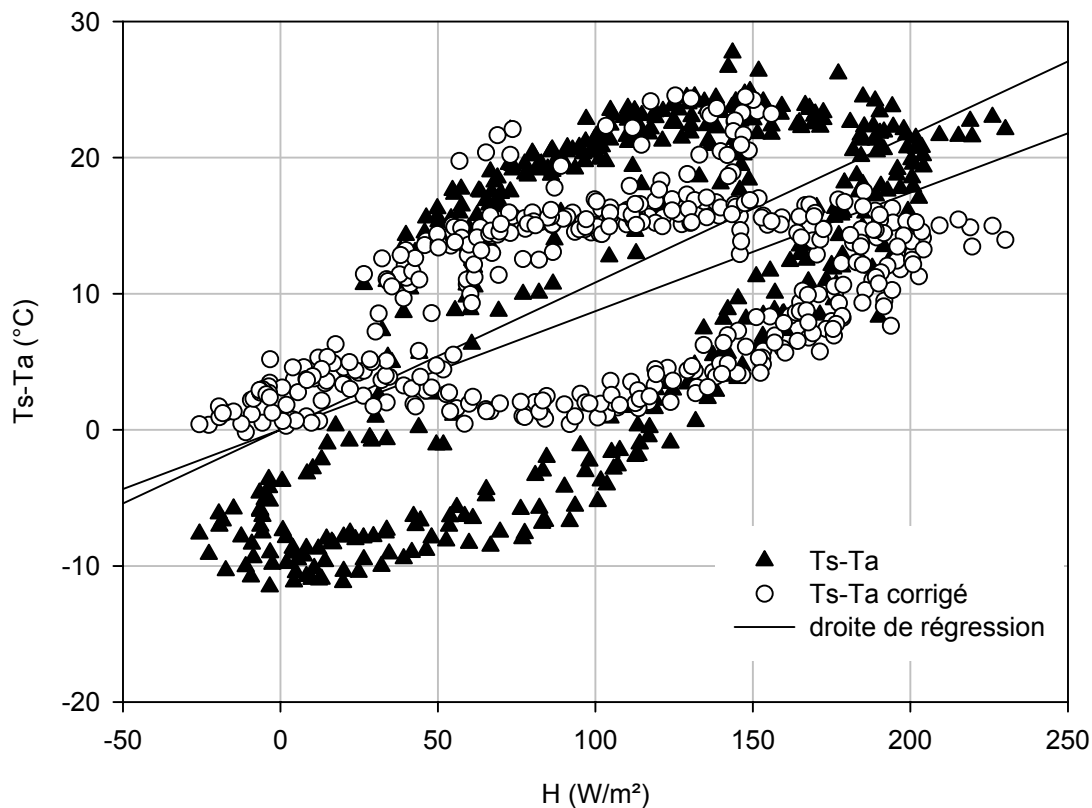


Figure 7.11 Ts-Ta en fonction de H sur le site du PEGE (période du 14 au 19/08)

Sur la figure 7.11 sont représentées les différences ($T_s - T_a$) vs H pour la période 14-19/08 sur le site PEGE. Deux séries sont représentées : non corrigées et corrigées. Avec les données non corrigées on observe de nombreuses valeurs de ($T_s - T_a$) fortement négatives que l'introduction d'une émissivité ne suffirait pas à ramener à des valeurs physiquement acceptables. L'origine de cette erreur systématique est à mettre au compte du capteur mesurant le bilan radiatif dont le signal est influencé par le rayonnement global incident. Ce problème a déjà été mentionné (chapitre 3.2.3) : sans correction apportée au rayonnement net, le flux émis déduit du bilan radiatif, et donc la température de surface, présente un biais important variable au cours de la journée. La figure 7.11 appelle deux commentaires : i) la série corrigée ne montre pas de valeurs ($T_s - T_a$) non physiques, ce qui démontre la nécessité de cette correction ; ii) les résultats jour par jour sont donnés sur la figure (7.12) : sur toute la période, on observe systématiquement, sauf pour le 19/08, le comportement anormal signalé pour le site « canyon » en fin de période.

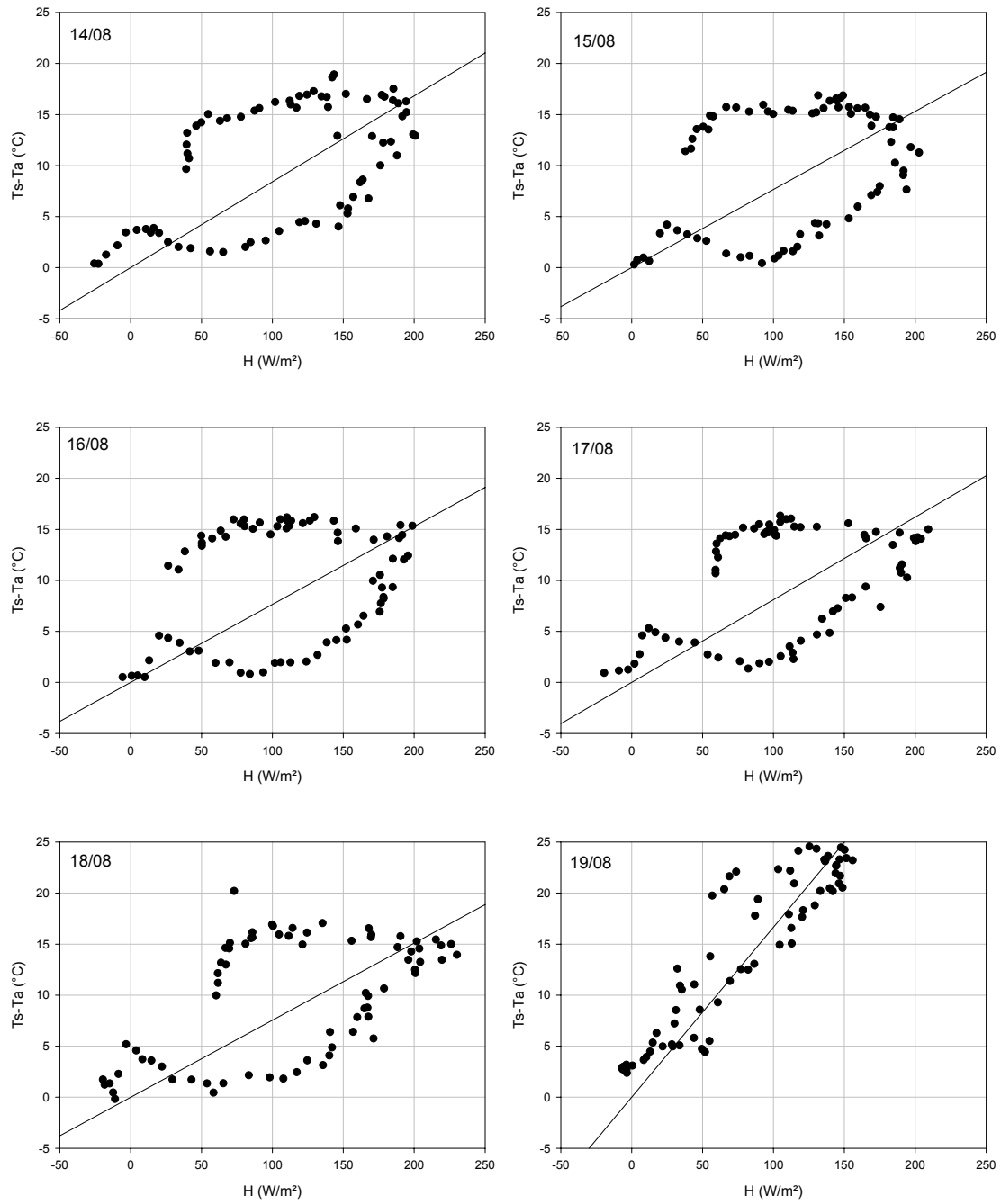


Figure 7.12 : $T_s - T_a$ en fonction de H sur le site du PEGE représenté pour chaque journée entre le 14 et le 19/08 (avec $T_s - T_a$ corrigé)

7.4.3 Le site de l'IPG

Enfin, la figure 7.13 présente, comme sur la figure précédente, les données non corrigées et corrigées relatives au site IPG. On note : i) la nécessité de ne considérer que les données corrigées ; ii) une dispersion des mesures avec cependant une tendance perceptible au comportement anormal observé sur les deux autres sites, si l'on examine les résultats jour par jour présentés sur la figure 7.14.

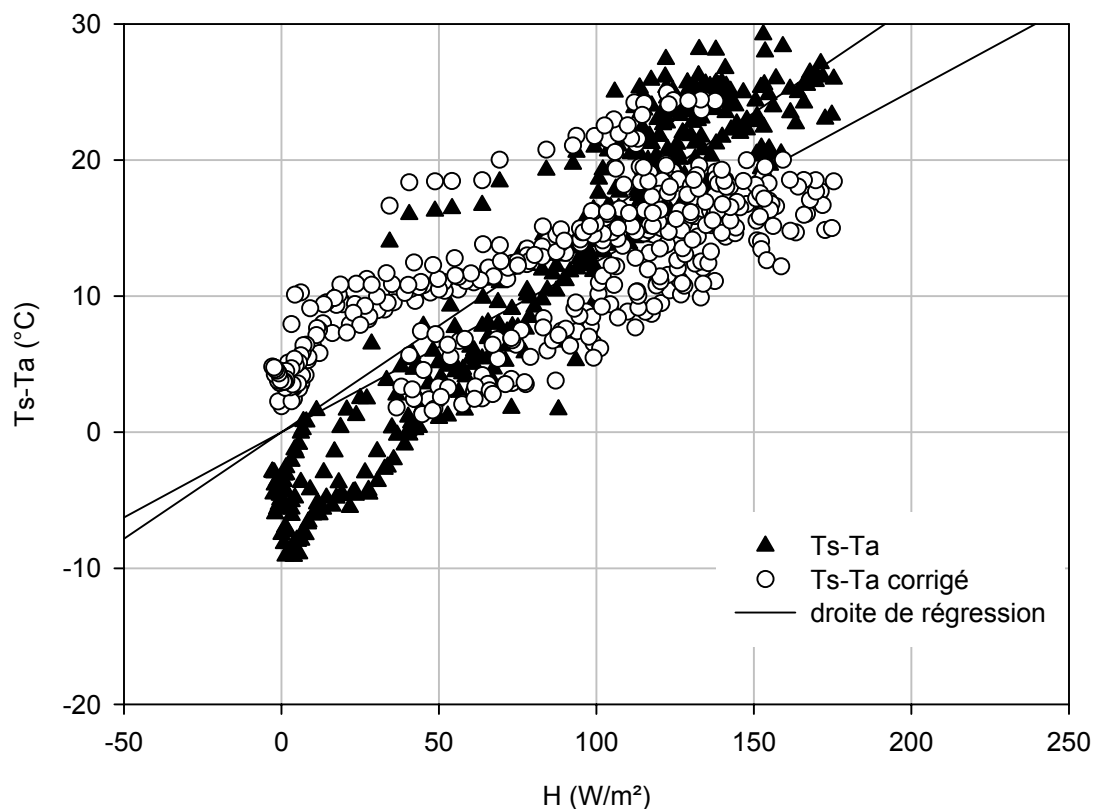


Figure 7.13 Ts-Ta en fonction de H sur le site de l'IPG (période du 14 au 19/08)

La question se pose de savoir si ce comportement anormal résulte d'artefacts expérimentaux. Deux hypothèses ont été envisagées. Premièrement, une correction insuffisante appliquée au capteur bilan-mètre sur les mâts PEGE et IPG : cette hypothèse doit être exclue car le comportement anormal s'observe aussi sur les mesures canyon où le flux émis est mesuré directement par un capteur de haute qualité. Deuxièmement, une influence sur les mesures des caractéristiques radiatives (transmission et rayonnement propre) de la couche d'air entre la surface et le capteur, influence qui nécessiterait d'apporter des corrections atmosphériques aux mesures. Une telle influence ne peut être exclue mais s'avère très difficile à évaluer et probablement trop faible pour modifier les résultats de façon appréciable. Par ailleurs, le phénomène anormal est observé sur les mesures au sommet de l'échafaudage où cette notion de correction de couche d'air est inappropriée.

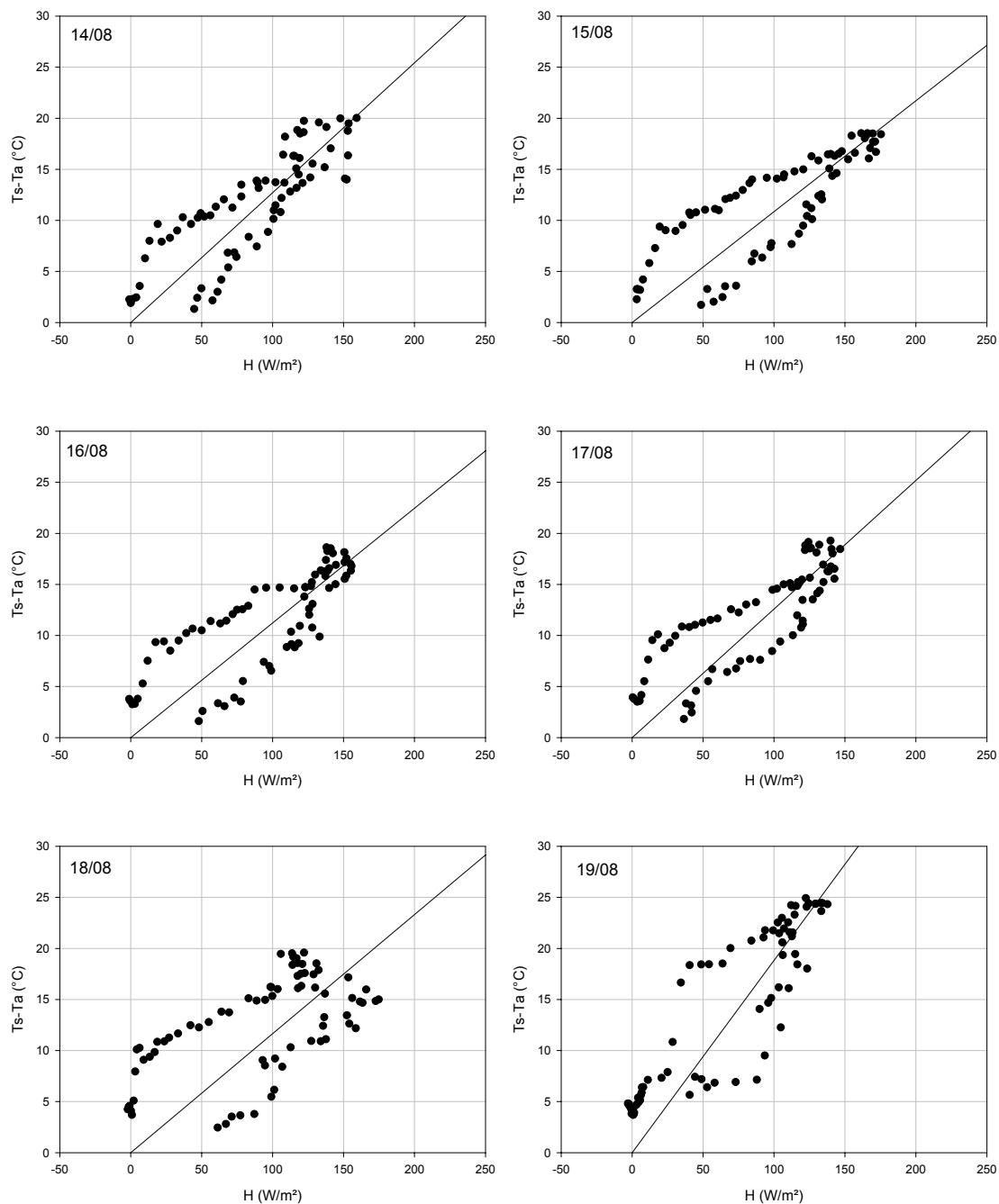


Figure 7.14 : Ts-Ta en fonction de H sur le site de l'IPG représenté pour chaque journée entre le 14 et le 19/08 (avec Ts-Ta corrigé)

L'examen des données présentées sur les figures 7.9, 7.11 et 7.13, appelle d'autres remarques :

- les valeurs maximales du flux de chaleur sensible atteignent 250 Wm^{-2} sur le site canyon, 200 Wm^{-2} sur le site PEGE et 175 Wm^{-2} environ pour le site IPG, mettant en évidence une dépendance significative par rapport au site. Ceci pourrait indiquer que les mesures n'ont pas été effectuées dans la couche de mélange dont la base se situerait au-delà des 30 m de hauteur des mâts.

- en ignorant le comportement normal et en se plaçant dans le cadre d'un modèle simple traditionnel,

$$H = (\rho_a C_{pa}) \frac{(T_s - T_a)}{r_a}$$

on a déterminé la pente de la droite (passant par l'origine) (Ts-Ta) vs H pour chaque site, pour la période 14-19/08. Les résultats ont rassemblés dans le tableau 7.8, donnant aussi à titre documentaire les pentes pour les deux premières journées séparément.

En prenant une valeur approximative et constante pour la capacité calorifique de l'air, on obtient une estimation de la résistance aérodynamique moyenne (r_a), indiquée dans la dernière colonne du tableau 7.8 : en dépit d'une forte dispersion d'un jour à l'autre, il apparaît là aussi une nette différenciation des sites en terme de résistance au transfert convectif.

L'examen des données jour par jour suggère que le comportement anormal pourrait être fortement influencé par la géométrie 3-D et la quantité de chaleur stockée, favorisant la convection, si l'on considère que le site IPG plus ouvert et comportant d'avantage de surfaces non bâties est celui où le comportement est le moins anormal et où la résistance moyenne est la plus forte.

	14.08	15.08	14-19.08	
site	(Ts-Ta)/H	(Ts-Ta)/H	(Ts-Ta)/H	r_a
Argonne	0,030	0,037	0,034	44
PEGE	0,084	0,077	0,087	112
IPG	0,127	0,107	0,125	161

Tableau 7.8 Pente de la droite Ts-Ta vs H pour les sites de la rue de l'Argonne, du PEGE et de l'IPG

7.5 Variabilité spatiale du rayonnement net à l'échelle de l'agglomération

Une cartographie du rayonnement net a été établie à titre exploratoire à l'échelle de l'agglomération (figure 7.15). Elle fait d'emblée apparaître une forte variabilité, puisque les valeurs observées varient quasiment du simple au double. Il est intéressant de comparer cette carte avec une classification réalisée par Tania Neusch (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique, INSA-Strasbourg) à partir des images DAIS de midi : 4 canaux ont été choisis (2 dans le visible, et 1 dans l'infrarouge moyen et l'infrarouge thermique) sur lesquels a été effectuée une Analyse en Composantes Principales (ACP). La première composante fournit 4 néo-canaux qui sont donc utilisés pour cette classification. Ainsi, une vingtaine de classes sont obtenues pour représenter l'occupation du sol, mettant par exemple en évidence les différents types de bâti (couleur proches du rouge et du rose), le type de végétation (teintes verdâtres) ou l'eau (bleu). Dans un souci de simplification, seules les principales classes sont indiquées dans la légende de la figure 7.16.

L'analyse des variations du rayonnement net parallèlement à l'occupation du sol apporte quelques enseignements :

- l'eau présente des valeurs très élevées (supérieures à 700W/m²) : cela s'explique par le faible albédo de cette surface, mais surtout par sa température de surface nettement inférieure à celle des autres surfaces, ce qui se répercute donc sur de faibles pertes dans l'infrarouge.
- entre 600 et 700 W/m², on retrouve une grande partie de l'hypercentre prolongée au Sud, ce qui correspond à des quartiers avec une forte densité de bâti.
- autour de 500 W/m², on retrouve les quartiers résidentiels (Orangerie, quartier des XV) situés dans la partie Nord-Est de l'image. Les valeurs sont encore plus faibles dans les parcs, comme celui de l'Orangerie, qui apparaît fort bien dans la classification (coin Nord-Est de l'image). En raison de l'albédo élevé de la végétation, celle-ci réfléchit une part importante de rayonnement dans le visible, ce qui se traduit par des faibles valeurs de rayonnement net.



Figure 7.15 Cartographie du rayonnement net sur une partie de l'agglomération strasbourgeoise (28/07/2002, 11h30)

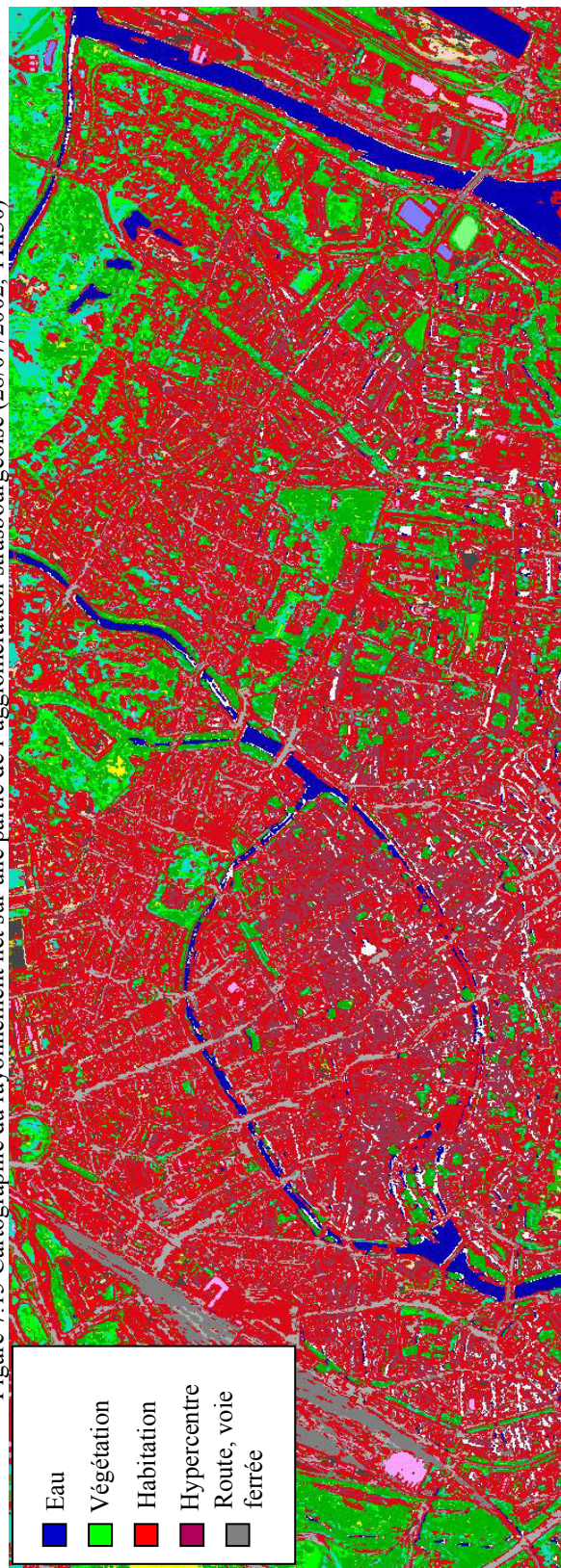


Figure 7.16 Classification d'occupation du sol sur l'agglomération strasbourgeoise

Conclusion du chapitre :

Lorsqu'on sort d'un système simple comme celui du canyon urbain pour passer à l'échelle du fragment, un certain nombre de difficultés apparaissent, qui peuvent aussi bien être des problèmes d'instrumentation, d'exploitation des mesures brutes avec la difficulté de les traduire en la grandeur souhaitée, ainsi que des problèmes liés à la modélisation.

La modélisation à l'échelle du fragment urbain offre des résultats acceptables dans le domaine du solaire, mais ceux-ci apparaissent moins satisfaisants dans le domaine de l'infrarouge thermique. L'utilisation du modèle est rendue moins aisée à une échelle plus étendue, ce qui est notamment lié à la difficulté de modéliser les toitures des bâtiments en raison de leur hétérogénéité et de leur complexité thermique. Cette étude nous apporte la confirmation d'une tendance déjà observée à l'échelle de canyon, à savoir la sous-estimation des températures nocturnes. La gestion de la chaleur stockée dans le système semble donc être à revoir, notamment le modèle thermique des parois dont la configuration simplifiée ne traite pas la situation rencontrée expérimentalement.

L'analyse conjointe des données de télédétection avec les mesures intégrées spatialement met en avant le problème lié aux zones ombragées dans la détermination de l'albédo, et par conséquent du bilan radiatif, notamment sur les images du matin et du soir. La modélisation offerte par SOLENE, déterminant précisément les zones ombragées, s'avère être un excellent complément à la télédétection. Notons toutefois que les albédos obtenus par mesures intégrées au sommet des mâts ne diffèrent pas fortement de ceux obtenus par télédétection, notamment à midi.

Dans le domaine de l'infrarouge thermique, des écarts plus importants apparaissent, mais il est difficile d'en donner une explication. Elle pourrait résider dans la difficulté à estimer l'émissivité totale ou l'impact de l'atmosphère sur les mesures mâts, mais on ne peut pas exclure un problème technique lié au capteur.

CONCLUSION GENERALE

Au cours de ce travail, dont le but était de contribuer à comprendre du point de vue de la climatologie le fonctionnement de ce qu'on appelle la « canopée » urbaine vis à vis des phénomènes radiatifs et des échanges d'énergie intra-canopée ainsi qu'entre la canopée et la couche limite urbaine, démarche expérimentale et modèles ont été étroitement associés. Si des mesures classiques de paramètres météorologiques, mesures en station ou mesures mobiles sous forme de transects, ont été réalisées, mesures nécessaires pour caractériser le climat urbain, la plus grosse partie expérimentale du présent travail concerne une campagne intensive qui s'est déroulée sur environ un mois (fin juillet-fin août 2002) focalisée sur quelques secteurs de la ville de Strasbourg. Cette campagne a été organisée suivant le principe d'emboîtement d'échelles, de l'échelle du canyon urbain, à l'échelle du fragment ou « quartier » urbain, puis de l'agglomération, la jonction entre les échelles étant *in fine* assurée par le recours à la télédétection. Autant qu'il a été possible, cette campagne est donc complète et originale par le caractère quasi exhaustif de l'effort de mesures à l'échelle du canyon. Une rue, choisie dans un secteur homogène de la ville, a été investie et instrumentée pour mesurer à différents niveaux, séparément, l'ensemble des termes du bilan d'énergie à l'exception du flux dans le sol. Des mesures intégrées à l'échelle du fragment urbain du bilan radiatif et du flux de chaleur sensible ont été réalisées sur deux sites représentatifs à partir de mâts de hauteur suffisante pour placer les capteurs à environ 30 m au dessus du sol. Enfin, des mesures par télédétection ont été réalisées par imageur aéroporté les 27 et 28 juillet, par caméra infrarouge hélicoptère le 14 août, acquisitions destinées à faire le lien entre les mesures terrain spatialement intégrées et l'hétérogénéité du milieu, puis esquisser une cartographie du bilan radiatif à l'échelle de l'agglomération.

De cette campagne est issue une base de données conséquente qui vient compléter les bases de données progressivement constituées au cours de campagnes antérieures sur la ville de Strasbourg et sa région, notamment la campagne préparatoire d'août 1999 qui avait été limitée à l'acquisition de données micro-météorologiques. La base de données constituée en 2002 comporte : tous les termes du bilan radiatif, les termes du bilan d'énergie aux échelles canyon et fragment ; les données et paramètres météorologiques, les profils atmosphériques par radiosondage pour les journées concernées par la télédétection ; le rayonnement global incident, direct et diffus, ainsi que le rayonnement atmosphérique descendant mesurés sur un site constitué en site de référence, maintenu en fonctionnement permanent. Pour ce qui est de la télédétection : les images acquises, les paramètres géophysiques extraits des données, ainsi que les mesures terrain de contrôle (réflectivités, albedos, émissivités infrarouge, températures de surface). Enfin est adjoint le modèle numérique d'élévation à haute résolution établi sur la quasi totalité de l'agglomération.

Les mesures, à l'échelle du canyon principalement mais aussi à l'échelle du fragment (quartier) ont été confrontées au modèle SOLENE, développé par le CERMA –NANTES, utilisé ici non pas dans sa configuration utile en architecture, mais dans sa configuration en tant que modèle physique pour la climatologie. En effet, dans ce travail, toutes les entrées physiques du modèle, à l'exception de certains paramètres thermiques de matériaux qui doivent être estimés d'après la littérature, sont des grandeurs effectivement mesurées. Si les mesures avaient pour fonction première de valider le modèle et sa capacité à gérer la complexité d'un système urbain du point de vue des échanges d'énergie, l'analyse conjointe des sorties du modèle et des mesures a été fructueuse pour la compréhension de ces dernières, pour lever certaines ambiguïtés et pour valider ou affiner les valeurs de paramètres thermo-optiques, assortis ainsi d'une marge d'incertitude. Dans le domaine du rayonnement solaire, les résultats montrent que SOLENE gère parfaitement la géométrie, les effets de masque et les inter-réflexions dans un système 3-D, tant à l'échelle locale qu'à l'échelle du canyon ou celle du quartier : ainsi on observe un excellent accord entre la variation diurne du rayonnement global réfléchi mesurée et cette même grandeur modélisée. Ces résultats valident donc le modèle et son utilisation généralisable en tant que référence.

Dans le domaine du bilan d'énergie qui en terme de sortie de modèle se traduit par la température de surface, les résultats montrent que SOLENE restitue la variation diurne avec une erreur qui ne dépasse pas 2°C en journée, pour autant qu'il s'agisse d'un milieu homogène dont les propriétés thermiques peuvent être convenablement cernées. Les résultats sont moins bons sur un système hétérogène, ce qui est inévitablement le cas lorsqu'on passe de l'échelle locale à une échelle plus étendue : si la variation diurne est globalement restituée, les écarts peuvent dépasser 5°C. Dans cet ordre d'idées, les toitures des bâtiments constituent des objets difficiles à modéliser en raison de leur complexité thermique ce qui est un problème potentiel pour la modélisation associée à la télédétection. Par ailleurs, il a été observé que SOLENE sous-estime quasi systématiquement les températures nocturnes de 3 à 5°C, écart qui n'a pas pu être réduit ni en intervenant sur les paramètres thermiques, ni par une initialisation précoce du modèle. Il est probable que ce défaut traduit une mauvaise gestion de la chaleur stockée dans le système, particulièrement importante en milieu urbain, couplée à un traitement simplifié de l'équation du bilan, une paramétrisation rudimentaire du flux de chaleur sensible et la non prise en compte du flux de chaleur latente, faible mais non négligeable comme le montrent les mesures effectuées.

Pour être utilisables, les données de télédétection ont nécessité plusieurs étapes de pré-traitements radiométriques, vérifications, validation et ré-étalonnage des canaux infrarouge. L'exploitation a été rendue difficile par une qualité spectro-radiométrique modeste de l'imageur avionné dans le domaine du rayonnement solaire réfléchi et par des distorsions géométriques très importantes des images. Pour les objectifs du travail, ces défauts n'obèrent cependant pas leur utilisation. Les données ont été systématiquement corrigées des effets atmosphériques grâce aux radiosondages en coïncidence temporelle avec les survols.

La finalité de la télédétection étant d'accéder aux paramètres géophysiques nécessaires à l'obtention du bilan radiatif, les efforts se sont concentrés sur l'albédo, la température et l'émissivité.

Un algorithme simple utilisant une combinaison linéaire de 4 canaux a été établi pour la restitution de l'albédo : sur des surfaces homogènes « ouvertes » les résultats sont en règle générale en bon accord avec les mesures terrain de contrôle et la marge d'incertitude peut être évaluée à $\pm 0,01$. A échelle non locale, sur un système urbain à géométrie 3-D, la restitution de l'albédo s'avère un problème difficile en raison des effets d'ombres portées par les bâtiments. La notion d'albédo considéré comme le rapport entre le rayonnement global réfléchi et le rayonnement global incident devient elle-même ambiguë : la grandeur recherchée est en effet le rayonnement global réfléchi compte tenu du rayonnement global incident en chaque point du système. L'utilisation d'un masque représentant les pixels ombrés permettant donc de ne considérer que les pixels éclairés, si elle peut être une première approche, ne résout pas le problème de la détermination de l'albédo d'une portion d'image. Pour cette raison, seule des images acquises en milieu de journée, de façon à minimiser les ombres, ont été utilisées pour la détermination des albédos à l'échelle du pixel et pour la détermination de l'albédo intégré. Il s'avère cependant, confirmant en cela les observations d'autres auteurs, que l'intégration spatiale tend à uniformiser rapidement les valeurs d'albédo qui se stabilise autour de $0,11 \pm 0,01$, en bon accord avec des mesures intégrées obtenues à partir de capteurs sur un mât.

Dans le domaine infrarouge thermique, l'analyse des données a montré que l'hétérogénéité radiométrique élevée d'un milieu urbain ne permet pas d'utiliser un algorithme simple de type « Split-Window » pour la restitution de la température de surface. La solution adoptée dans ce travail repose sur la méthode « TES-MMD » qui a l'avantage de restituer simultanément à la fois les émissivités dans les différents canaux et la température de surface, en dépit d'hypothèses de travail qui ne sont pas nécessairement vérifiées pour un milieu urbain. Les émissivités spectrales ainsi obtenues sont en accord satisfaisant avec les mesures terrain utilisant la même méthode.

Pour les objectifs du travail, bilan radiatif et bilan d'énergie, un problème très difficile et non résolu est celui de la détermination précise du flux radiatif émis par la surface du fait de sa température : outre la température de surface, cette quantité suppose une intégration angulaire sur tout l'hémisphère et une intégration sur l'ensemble du spectre infrarouge notamment. Sans même tenir compte des effets angulaires, c'est à dire en supposant le milieu Lambertien, se pose le problème de l'émissivité totale qui ne peut pas être déduite directement des données de télédétection qui ne concernent que les fenêtres atmosphériques. L'émissivité totale ne peut qu'être estimée, avec une marge d'erreur

importante de quelques %. Il n'a malheureusement pas été possible de l'estimer par comparaison avec des mesures directes, ou par le biais du flux total émis dont la précision de mesure s'avère insuffisante. Pour ce qui est du bilan radiatif d'un milieu urbain, sa détermination par télédétection n'a de sens qu'à l'échelle du quartier ou fragment urbain, c'est à dire d'un ensemble ayant des caractéristiques spécifiques relativement homogènes. Dans une première étape, ont donc été comparées les mesures de bilan radiatif effectuées à partir de mâts et les estimations obtenues à partir de données images sur la même aire d'intégration. Compte tenu de la difficulté d'estimer l'albédo aux différents moments de la journée, la comparaison a tendance à être meilleure en milieu de journée que matin ou soir. La précision reste modeste et les marges d'erreurs difficiles à évaluer : en supposant que les rayonnements incidents sont connus sans erreur, la marge d'erreur tenant compte de l'erreur possible sur la température et de l'incertitude sur l'émissivité totale, ne devrait néanmoins pas dépasser environ 30 Wm^{-2} . L'association mesures terrain intégrées et télédétection est cependant considérée comme indispensable et un passage obligé pour comprendre comment exploiter les données de télédétection et quelles sont les données requises en terme de résolution spatiale, spectrale et éventuellement angulaire. A titre exploratoire, une carte du bilan radiatif a été établie à l'échelle de l'agglomération : cette carte révèle incontestablement, en dehors des secteurs à forte végétation, une certaine variabilité du bilan liée au type de bâti et à sa densité.

Le flux de chaleur sensible a été mesuré par la méthode des fluctuations à trois niveaux à l'intérieur du canyon, ainsi que sur les deux sites équipés de mâts. Dans le cadre de ce travail l'ensemble des données relatives au canyon, et plus généralement l'ensemble des données relatives aux flux de chaleur, n'a pas pu être totalement analysé et exploité. Dans le canyon, il apparaît des relations claires entre forçage solaire, température de l'air, humidité régime d'échanges convectifs. Le flux de chaleur sensible ainsi que le flux de chaleur latente ont été mesurés, simultanément, du 14 au 19 août au quatrième niveau (sommet) du canyon permettant d'avoir une première approche du flux de chaleur dans le sol et de la chaleur stockée par la fermeture du bilan d'énergie. Les flux de chaleur sensible mesurés au sommet du canyon et mesurés à partir des mâts instrumentant les sites « quartiers », montrent une certaine dépendance par rapport au site, ce qui laisse entrevoir la hauteur à laquelle ont été effectuées les mesures n'atteint pas la couche de mélange.

Sans aborder la paramétrisation du flux de chaleur sensible, le travail s'est intéressé à titre documentaire à la relation expérimentale au cours de la journée entre le flux H et la différence $(T_s - T_a)$ où T_a est la température de l'aire et T_s la température de surface obtenue ici par inversion du flux infrarouge émis par la surface, flux mesuré au sommet du mât. Alors qu'on s'attendrait *a priori* à une corrélation sensiblement linéaire, on observe un comportement anormal faisant apparaître une forme d'hystérésis avec une branche pour la première partie de la journée et une branche pour la deuxième partie. L'origine de cette anomalie n'a pas pu être établie de façon certaine, mais une cause purement instrumentale semble devoir être exclue.

Les premiers éléments suggèrent que ce comportement est fortement lié au caractère 3-D et à la chaleur stockée : il pourrait s'agir, sous réserve d'investigations approfondies, d'un mécanisme d'échanges convectifs spécifique du milieu urbain.

Les résultats obtenus dans le présent travail montrent que la détermination du bilan radiatif d'une zone urbaine reste un problème difficile tant sur le plan de la mesure directe elle-même que sur le plan de sa détermination à partir de données de télédétection. La démarche associant mesures terrain intégrées et télédétection devra être poursuivie : il faudra notamment examiner attentivement d'une part l'impact que pourrait avoir sur la mesure terrain les propriétés radiatives de la couche d'air entre le sol et le capteur, d'autre part la question de l'aire d'intégration pour la représentativité des grandeurs du bilan sur un secteur de la canopée urbaine. La démarche expérimentale pourra ensuite être relayée, au moins pour ce qui est du rayonnement global, par l'utilisation d'un modèle validé tel SOLENE.

En ce qui concerne la télédétection, son rôle et son utilisation pour les recherches en climatologie urbaine, les résultats suggèrent que, si l'échelle de la télédétection est bien celle du fragment urbain et la collecte de données à cette échelle, l'interprétation et l'utilisation optimale requièrent des données à haute résolution spatiale pour piloter les modèles utilisés conjointement. La situation en cela n'est pas fondamentalement différente de celle rencontrée avec les milieux naturels.

Du fait des problèmes techniques posés par l'utilisation d'imageurs avionnés, le recours à la télédétection satellitaire est à privilégier : des données de type ASTER ou ETM+ ont des caractéristiques spectrales et spatiales adaptées à l'échelle du quartier, avec cependant l'inconvénient d'un passage trop matinal. Des thermographies hélicoptées telles que celles qui ont été réalisées sont alors très utiles en phase de recherche, en raison de la flexibilité qu'elles offrent. L'information à très haute résolution spatiale peut être fournie par différents systèmes spatiaux, tel QUICKBIRD, IKONOS, etc.

Sur le plan thermique, les résultats de ce travail montrent qu'une méthode de type TES-MMD est efficace pour la détermination de la température de surface et des émissivités dans la fenêtre atmosphérique. Néanmoins, la difficulté majeure réside dans l'estimation de l'émissivité totale pour le calcul du flux infrarouge émis : une démarche couplée mesures terrain intégrées – télédétection devrait permettre d'avancer sur ce point.

Compte tenu des observations et résultats préliminaires obtenus dans ce travail, des recherches futures devront être focalisées sur les flux de chaleur sensible, autant que possible couplé à la mesure du flux de chaleur latente et à des mesures par scintillométrie, et ceci à l'échelle du fragment urbain pour comprendre l'influence de la structure géométrique et des caractéristiques thermiques sur le mécanisme d'échanges convectifs et sa formulation théorique.

En terme de modélisation le présent travail n'a pas pu aller au-delà de l'échelle du quartier : une prochaine étape serait de passer à un modèle méso-échelle appliqué à l'ensemble de l'agglomération et son environnement ; les très bons résultats obtenus ici suggèrent d'incorporer SOLENE comme modèle physique de la canopée urbaine dans une approche méso-échelle, les caractéristiques géométriques et physiques de la canopée pouvant être extraites, comme il vient d'être suggéré, de données de télédétection à très haute résolution spatiale.

BIBLIOGRAPHIE

Arnfield A.J. (1976). « Numerical modelling of urban surface radiative parameters ». *Papers in climatology: the Cam Allen Memorial Volume*, Davies JA (ed.). Discussion Paper n°7. Departement of Geography, Mc Master University.

Arnfield A.J. (1982). « An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities ». *Physical Geography* 3: 97-122.

Arnfield AJ (1988). « Validation of an estimation model for urban surface albedo ». *Physical Geography* 9: 361-372.

Arnfield A.J. (1990). « Canyon geometry, the urban fabric and nocturnal cooling: a simulation approach ». *Physical Geography* 11: 220-239.

Arnfield A.J. (2000). « A simple model of urban canyon energy budget and its validation ». *Physical Geography* 21: 305-326.

Arnfield A.J. (2003). « Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island ». *International Journal of Climatology* 23: 1-26.

Ben-Yosef N. , Wilner K. (1985). « Temporal behaviour of thermal images » *Applied Optics*, 24-2: 284-286.

Ben-Yosef N. , Wilner K. , and Abitbol M. (1987). « Natural terrain in the infrared: measurements and modelling ». *Infrared Technology XIII*, SPIE vol 819 : 66-71.

Bernard J. (2001). « Création d'un MNE et de la Base de Données associée ». Mémoire de maitrise, Faculté de Géographie et d'aménagement, Université Louis Pasteur (Strasbourg 1).

Bernard J. (2002). « Elaboration d'un modèle numérique d'élévation de l'agglomération de Strasbourg : préparation de trois formats de stockage en vue d'utilisation dans les modèles micrométéorologiques ». Mémoire de DEA, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur (Strasbourg 1).

Colin J. (2002). « Application et premières validations du schéma de surface Town Energy Budget (TEB) sur l'agglomération de Strasbourg ». Mémoire de DEA, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur (Strasbourg 1)

Dabbert W.F. , Davis P.A. (1978). « Determination of energetic characteristics of urban-rural surfaces in the greater St Louis area ». *Boundary-Layer-Meteorology* 12: 149-171.

De Bruin H.A.R. , Holtslag A.A.M. (1982). « A simple parametrization of surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the Penman-Monteith concept ». *Journal of Applied Meteorology* 21: 1610-1621.

De Hatten A.(2002). « Mise en évidence des caractéristiques générales de l'îlot de chaleur urbain strasbourgeois - Elaboration d'une base de données climatique ». Mémoire de maîtrise de géographie physique, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur (Strasbourg).

- De Hatten A. (2003). « Utilisation d'une approche géostatistique pour la cartographie et l'interprétation de l'Ilot de Chaleur Urbain de Strasbourg ». Mémoire de DEA, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur, STRASBOURG.
- Desvignes F. (1987). « Détection et détecteurs de rayonnements optiques », *Masson*, Mesures physiques, Paris.
- Estournel C. (1982). « Etude de l'effet radiatif dans la couche limite : atmosphère urbaine et couche nocturne ». Thèse de troisième cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Fischer L. (2001). « Etude de paramètres climatiques pertinents en vue de l'amélioration de la prévision des pointes de pollution par l'ozone dans l'agglomération de Strasbourg ». Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur (Strasbourg I).
- Fuggle R.F. , Oke T.R. (1976). « Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere. I: above roof level ». *Boundary-Layer-Meteorology* 10: 113-120.
- Gaussorgues G. (1989). « La thermographie infrarouge, Principes – Technologies - Applications ». *Lavoisier*, Technique et documentation, Paris, 1989.
- Garratt J.R. (1980). « Surface influence upon vertical profiles in the atmospheric near surface layer ». *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106 : 803-819.
- Grimmond C.S.B. , Cleugh H.A., Oke T.R. (1991). « An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes ». *Atmospheric Environment* B 25: 311-326.
- Grimmond C.S.B. , Souch C. , Hubble M.D. (1996). « Influence of tree cover on summertime surface energy balance fluxes, San Gabriel Valley, Los Angeles ». *Climate research* 6: 45-57.
- Grimmond C.S.B. , Oke T.R. (2002). « Turbulent heat fluxes in urban areas: observation and a Local-Scale Urban Meteorological Parametrization Scheme (LUMPS) ». *Journal of Applied Meteorology*. 41: 792-810.
- Groleau D. (1998). « Solene, Guide d'utilisation. CERMA », 62p.
- Groleau D. (2000). « Solene: un outil de simulation des éclairagements solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains ». *Colloque Artepa*, Rouen.
- Gillespie A.R. , Rokuwaga S. , Hook S.J. , Matsunaga T., Kahle A.B. , Cothorn J.S. (1998). « A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborn thermal emission and reflection radiometer images ». *IEEE Transactions on geosciences and remote sensing* 36-4: 1113-1126.
- Hanna S.R. , Chang J.C. (1992). « Boundary-layer parametrizations for applied dispersion modelling over urban areas ». *Boundary-Layer-Meteorology* 58: 229-259.
- Holstlag A.A.M., Van Ulden A.P. (1983). « A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data ». *Journal of Applied Meteorology* 22: 517-259.
- Kneizys F.X. , Abreu L.W., Anderson G.P. , Chetwynd J.H. , Shettle E.P. , Berk A. , Bernstein L.S. , Robertson D.C., Acharya P. , Rothman L.S. , Selby J.E.A. , Gallery W.O. , Clough S.A. (1996). « The MODTRAN 2/3 Report and Lowtran 7 MODEL ». *Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, PL/GPOS, Hansom AFB, MA 01731-3010*.

- Lee D.O. (1984). « Urban Climates». *Progress in Physical Geography* 8: 1-31
- Lenoble J. (1993). « radiative atmospheric transfert ». *A. DEEPAK Publishing*, Hampton, Virginia, USA.
- Lemonsu A. (2003). « Modélisation des processus de surface et de la couche limite en milieu urbain ». Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III.
- Masson V. (2000). « A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models». *Boundary-Layer-Meteorology* 94: 357-397.
- Mestayer P.G. , Anquetin S. (1995). « Climatology of cities». *Third International Conférence on Air pollution-Air pollution 95- Actes du colloque*: 1-35.
- Miguet F. (2000). « Paramètres physiques des ambiances architecturales : un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain ». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes. 360 p.
- Mills G.M. (1993). « Simulation of the energy budget of an urban canyon-I. Model structure and sensitivity test». *Atmospheric Environment* B27 : 157-170.
- Mills G.M. Arnfield A.J. (1993). « Simulation of the energy budget of an urban canyon-II. Comparison of model results with measurements». *Atmospheric Environment* B 27: 171-181.
- Monteith J.L. , Unsworth M.H. (1991). « Principles of environmental physics». New York: Edward Arnold.
- Müller A. , Gege P. (2001). « The Airborne Imaging Spectrometers used in DAIS». *Proceedings of the DAISEX Final Results Workshop*, ESTEC, 3-6.
- Nicodemus F.E. (1970). « Reflectance Nomenclature and Directional Reflectance and Emissivity ». *Applied Optic* 9-6: 1474-1475.
- Nicholson S.E. (1975). « A pollution model for street-level air». *Atmospheric Environment* 9 : 19-31.
- Nunez M. , Oke TR (1976). « Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere». *Boundary-Layer-Meteorology* 10: 121-135.
- Nunez M, Oke T.R. (1977). « The energy balance of an urban canyon». *Journal of Applied Meteorology* 16: 11-19.
- Oke T.R. (1973). « City size and the urban heat island». *Atmospheric Environment* 7: 769-779.
- Oke T.R. (1978). « Boundary layer climates». Londres, Editions Methuen & Co Ltd, 372p.
- Oke T.R., Johnson G.T. , Steyn D.G. , Watson I.D. (1991). « Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night. Part 2: diagnosis of causation». *Boundary-Layer-Meteorology* 56: 339-358.
- Perez R. (1993). « An allweather model for sky luminance distribution». *Solar Energy* 50-3: 335-245.
- Price J.C. (1984) « Land Surface Temperature Measurements From the Split Window Channels of the NOAA 7 advanced Very High Resolution Radiometer ». *Journal of Geophysic Research* 89-D5:7231-7237.

REKLIP (1995). « Atlas climatique du fossé rhénan méridional ». Edition COPRUR.

Roulet C.A. (1987). « Energétique du bâtiment ». *Presse polytechniques Romandes*, Lausanne.

Schmid H.P. , Cleugh H.A. , Grimmond C.S.B. , Oke T.R. (1991). « Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain». *Boundary-Layer-Meteorology* 54: 249-276.

Stanhill G., Kalma J.D. (1995). « Solar dimming and urban heating at Hong Kong». *International Journal of Climatology* 15: 933-941.

Summers P.W. (1964). « An urban ventilation model applied to Montreal». Ph.D. Thesis, McGill Univ., Montréal.

Terjung W.H., O'Rourke P.A. (1980). « Simulating the causal elements of urban heat islands». *Boundary-Layer-Meteorology* 54: 347-361.

Vinet J. (2000). « Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs ». Thèse de doctorat de l'école polytechnique de l'Université de Nantes.

Voogt J.A. , Oke T.R. (1991). « Validation of an urban canyon radiation model for nocturnal long-wave fluxes». *Boundary-Layer Meteorology* 54: 347-361.

Annexe A Rappels : radiométrie et télédétection

A.1 Radiométrie

A.1.1 Luminance - Eclairage

La radiométrie concerne la mesure de l'énergie ou de la puissance moyenne associées à un rayonnement électromagnétique.

La grandeur qui caractérise complètement du point de vue physique le rayonnement émanant d'une source est la **luminance** (Gaussorgues, 1989).

La luminance spectrale directionnelle est définie comme la puissance d^3P rayonnée dans une direction (θ, φ) par unité d'angle solide, par unité de surface projetée et par intervalle spectral :

$$L_\lambda(\theta, \varphi) \equiv \frac{\partial L(\lambda; \theta, \varphi)}{\partial \lambda} = \frac{d^3P}{ds \cos \theta \, d\omega \, d\lambda} \quad [\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}]$$

La luminance émanant d'un objet réel et observée dans une direction donnée a deux origines :

- la réflexion d'un rayonnement illuminant l'objet.
- l'émission de rayonnement du fait de la température non nulle de l'objet (échelle absolue, en Kelvin)

Si la puissance élémentaire émanant d'une surface varie comme $\cos \theta$, la luminance est alors indépendante de la direction et la surface dite **Lambertienne**.

La puissance spectrale élémentaire d^2P par unité de surface (ou flux) est appelé éclairage, noté E_λ quand le rayonnement est incident à une surface et émittance, notée M_λ , quand il est émis par cette surface.

$$E_\lambda = \frac{d^2P_{\text{incident}}}{ds \, d\lambda} \quad M_\lambda = \frac{d^2P_{\text{émis}}}{ds \, d\lambda} \quad [\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}]$$

La figure (A.1) précise les notations géométriques et angulaires.

L'éclairage spectral directionnel produit par une source qui sous-tend un angle solide $d\omega_s$ vue de la surface ds s'écrit :

$$E_\lambda(\vec{u}_s) = L_\lambda^{\text{inc}}(\vec{u}_s) \cos \theta_s \, d\omega_s$$

Si la luminance incidente est distribuée, l'éclairage sera :

$$E_\lambda = \int_{\Omega_{\text{source}}} L_\lambda^{\text{inc}}(\theta', \varphi') \cos \theta' \, d\omega'$$

Le premier cas correspond à l'éclairage solaire direct de la surface; le deuxième cas, par exemple, à l'éclairage de la surface par le rayonnement atmosphérique descendant.

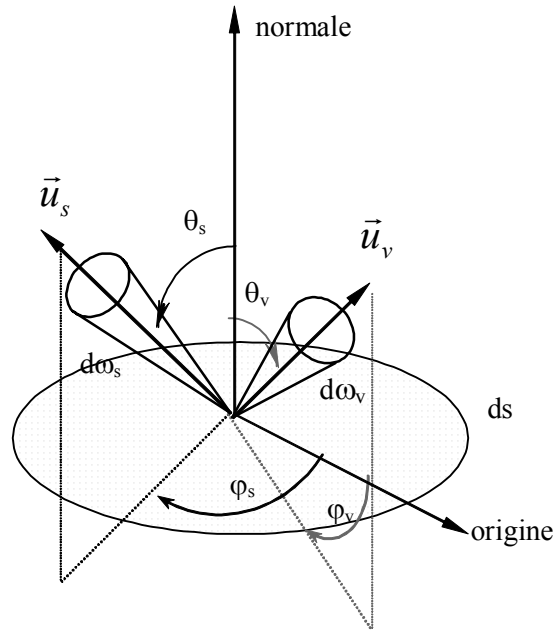


Figure A.1 Configuration géométrique et notations angulaires

A.1.2 Réflexion du rayonnement

La grandeur qui caractérise complètement les propriétés de réflexion d'une surface est la **réflectivité spectrale bidirectionnelle** (Nicodemus, 1970) définie comme le rapport entre la luminance spectrale directionnelle réfléchie et l'éclairement spectral incident :

$$\rho_{b,\lambda}(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) = BRDF = \frac{L_\lambda(\theta_v, \varphi_v)}{E_\lambda(\theta_s, \varphi_s)} \quad [\text{sr}^{-1}]$$

A partir de cette grandeur on peut définir d'autres grandeurs relatives au phénomène de réflexion, par exemple

- la réflectivité spectrale directionnelle hémisphérique donnée par :

$$\rho_{dh,\lambda}(\theta_s, \varphi_s) = \iint_{\frac{1}{2}\text{sphère}} \rho_{b,\lambda}(\theta_s, \varphi_s, \theta_v, \varphi_v) \sin \theta_v \, d\theta_v \, d\varphi_v$$

qui représente le rapport entre l'émittance (réfléchie) et l'éclairement sous l'effet d'une illumination directionnelle dans la direction (θ_s, φ_s) . Si la surface est Lambertienne

$$\rho_{dh} = \pi \rho_b$$

A.1.3 Emission de rayonnement

L'émission du rayonnement électromagnétique due à la température T est gouvernée par la **loi de Planck**. La luminance spectrale de Planck ou luminance spectrale du Corps Noir (CN) $L_\lambda^0(T)$ est donnée par la relation :

$$L_{\lambda}^0(T) = \frac{c_1}{\lambda^5 [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]} \quad [\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}]$$

où $c_1 = 1,904 \cdot 10^8 \text{ W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^4$ et $c_2 = 1,4388 \cdot 10^4 \mu\text{m K}$.

Si λ_m est la longueur d'onde à laquelle $L_{\lambda}^0(T)$ est maximale, la température correspondante est donnée par la *loi de Wien* :

$$\lambda_m T \approx 2898 \mu\text{m K}$$

Il s'en suit que pour une température de l'ordre de 300K, le maximum de luminance se situe vers 9,66 μm . Pour une température de 800K, le maximum se situe vers 3,6 μm , et pour 5700K (température équivalente pour le rayonnement solaire) vers 0,5 μm .

Un CN étant Lambertien par définition, l'émittance du CN

$$M_{\lambda}^0(T) = \pi L_{\lambda}^0(T)$$

L'émittance totale calculée sur la totalité du spectre électromagnétique s'écrit selon la *loi de Stefan-Boltzmann*

$$M_{\lambda}^0(T) = \sigma T^4 \quad [\text{Wm}^{-2}]$$

avec $\sigma = 5,6698 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{K}^{-4}$. A titre indicatif, la puissance rayonnée par unité de surface de CN à la température de 300K (environ 27°C) est de 459 Wm^{-2} .

Un CN est un objet idéal qui absorbe la totalité de la radiation qu'il reçoit, ne réfléchit et ne transmet aucune radiation.

La luminance spectrale directionnelle émise par un **corps réel** à température T uniforme s'écrit :

$$L_{\lambda}(T; \theta, \varphi) = \varepsilon(\lambda; \theta, \varphi) L_{\lambda}^0(T) \equiv L_{\lambda}^0(T_B)$$

ce qui définit l'*émissivité spectrale directionnelle* $\varepsilon(\lambda; \theta, \varphi)$ (Nicodemus, 1970) et introduit la notion de *température de brillance* (ou température équivalent CN) T_B . avec

$$0 < \varepsilon(\lambda; \theta, \varphi) < 1 \rightarrow T_B < T$$

Pour la très grande majorité des milieux denses, et en particulier les milieux naturels, le rayonnement infrarouge est très rapidement atténué au cours de sa propagation dans le milieu. Cette atténuation s'effectue sur une distance de l'ordre de quelques longueurs d'onde au plus. Il en résulte que le rayonnement infrarouge émis vers l'extérieur du corps provient d'une zone très proche de la surface du corps. On exprime cela en écrivant que la luminance émise est fonction de la *température de surface* T_s . En conséquence, seule une température purement superficielle est accessible à la mesure par rayonnement infrarouge.

Une surface est considérée comme Lambertienne en émission si son émissivité est indépendante des angles.

En général, l'émissivité, comme la réflectivité, est spectrale et dépend de la longueur d'onde. Si l'émissivité ne dépend pas de la longueur d'onde, on a un *corps gris*.

L'émittance totale d'une surface réelle s'écrit

$$M = \bar{\varepsilon} \sigma T^4$$

ce qui définit l'émissivité totale hémisphérique.

A.1.4 Relations liées à la conservation de l'énergie

Un milieu qui reçoit une puissance incidente $dP_{i,\lambda}$ dans la direction (θ_i, φ_i) peut la répartir en une fraction réfléchie $dP_{r,\lambda}$, dans le demi espace incident, une fraction absorbée $dP_{a,\lambda}$ et une fraction transmise $dP_{t,\lambda}$.

La conservation de l'énergie implique (Lenoble, 1993):

$$\rho_{dh,\lambda}(\theta_s, \varphi_s) + \tau_\lambda(\theta_s, \varphi_s) + \alpha_\lambda(\theta_s, \varphi_s) = 1$$

où $\rho_{dh,\lambda}(\theta_s, \varphi_s) = \frac{dP_{v,\lambda}}{dP_{s,\lambda}}$ est la réflectivité directionnelle hémisphérique, $\tau_\lambda(\theta_s, \varphi_s) = \frac{dP_{t,\lambda}}{dP_{s,\lambda}}$ la

transmissivité directionnelle, et $\alpha_\lambda(\theta_s, \varphi_s) = \frac{dP_{a,\lambda}}{dP_{s,\lambda}}$ l'absorptivité directionnelle.

A l'équilibre thermodynamique, on démontre que $\alpha_\lambda(\theta, \varphi) = \varepsilon_\lambda(\theta, \varphi)$

et il vient (relation de Kirchhoff)

$$\rho_{dh,\lambda}(\theta_s, \varphi_s) + \tau_\lambda(\theta_s, \varphi_s) + \varepsilon_\lambda(\theta_s, \varphi_s) = 1$$

- Si le milieu est un corps noir, absorbeur intégral,

$$\alpha_{CN} = \varepsilon_{CN} = 1 \text{ et } \rho_{dh,\lambda}(\theta_s, \varphi_s) = \tau_\lambda(\theta_s, \varphi_s) = 0$$

- Si le milieu est opaque

$$\tau_\lambda(\theta_s, \varphi_s) = 0 \text{ d'où } \rho_{dh,\lambda}(\theta_s, \varphi_s) + \varepsilon_\lambda(\theta_s, \varphi_s) = 1$$

Cette relation est très importante en pratique car elle relie l'émissivité à la réflectivité directionnelle hémisphérique et donc aussi à la réflectivité bidirectionnelle, grandeurs accessibles à la mesure. Si la surface est Lambertienne, il vient $\rho_{h,\lambda} = 1 - \varepsilon_\lambda$.

A.2 Radiomètres et instruments

A.2.1 Principe

Un radiomètre (Desvignes, 1987) est l'instrument requis pour les mesures. De façon générale, un radiomètre comporte trois parties indiquées sur la figure (A.2) :

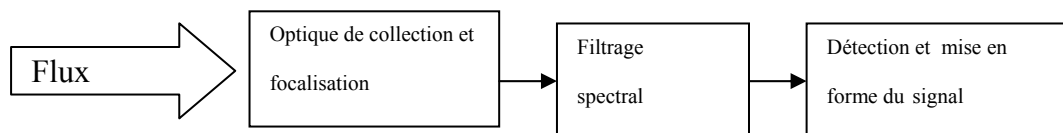


Figure A.2 Schéma de principe de fonctionnement d'un radiomètre

On distingue notamment deux types de radiomètres :

- à visée fixe, déterminée par le champ de vue angulaire (FOV).
- imageur, pour lequel le champ de vue instantané (IFOV) échantillonne (1D ou 2D) le champ de vue total (FOV).

On démontre que le signal monochromatique délivré par un radiomètre s'écrit

$$\text{Signal}(\lambda) = C f(\lambda) L^{\text{capteur}}(\lambda) [A_p \Omega_{\text{IFOV}}]$$

où A_p est l'aire de la pupille d'entrée de l'instrument, Ω_{IFOV} l'angle solide associé à l'IFOV, C un coefficient de conversion de la puissance électromagnétique à l'entrée du capteur en signal électrique, ces trois facteurs étant des facteurs instrumentaux. $f(\lambda)$ est la fonction filtre ou réponse spectrale globale de l'instrument. Le signal est donc proportionnel à la luminance de la cible définie comme la tache d'analyse délimitée par l'IFOV. La luminance est ici supposée uniforme sur la cible. Si ce n'est

pas le cas (FOV important), l'expression ci-dessus doit être intégrée par rapport aux coordonnées d'espace et angulaires.

Le filtrage spectral est un élément essentiel d'un radiomètre. Là encore, on distingue :

- radiomètre à bande spectrale unique,
- radiomètre disposant de plusieurs bandes spectrales distinctes,
- spectro-radiomètre ayant la capacité de mesurer de façon quasi continue sur un certain intervalle spectral grâce à un dispositif d'échantillonnage ou de sélection continûment variable.

Si $L_{\lambda}^{cible}(\theta, \varphi)$ est la luminance émanant de la cible délimitée par l'IFOV, la luminance perçue par le radiomètre est donnée par l'intégrale sur la bande passante

$$L^{capteur}(\theta, \varphi) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda}^{cible}(\theta, \varphi) f_{\lambda} d\lambda$$

A.2.2 Etalonnage et manipulation des signaux d'un radiomètre à bande large.

Pour disposer d'un signal suffisant et donc augmenter la sensibilité de l'instrument la solution souvent adoptée est d'utiliser une bande spectrale large (ex : 8-14 μ m). Le signal est alors

$$S^{cible} \propto \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) L_{\lambda}^{cible}(\varepsilon; T) d\lambda \quad \text{ou} \quad S^{cible} \propto \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) L_{\lambda}^0(T) d\lambda$$

si la cible est un CN.

L'étalonnage consiste à établir expérimentalement la relation entre le signal délivré par le radiomètre et la température du CN.

Si la fonction filtre est connue avec précision, il est possible de calculer la luminance intégrée sur la bande passante pour chaque valeur de température de CN. Le signal mesuré sur une cible non CN peut donc être mis en correspondance avec la température d'un CN dont la température est alors dite température de brillance (ou température équivalent CN) de la cible.

Cependant, la seule façon d'exploiter et de manipuler quantitativement les mesures radiométriques infrarouge est de passer par la fonction de Planck en introduisant les notions de luminance spectrale équivalente et de longueur d'onde centrale, en écrivant :

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) L_{\lambda}^{cible}(\varepsilon; T) d\lambda \equiv L_{\lambda_c}^{cible} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) d\lambda \equiv L_{\lambda_c}^{cible} \times \Delta\lambda = L_{\lambda_c}^0(T_B) \times \Delta\lambda$$

soit :

$$L_{\lambda_c}^{cible} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{f(\lambda)}{\Delta\lambda} L_{\lambda}^{cible}(\varepsilon; T) d\lambda = L_{\lambda_c}^0(T_B)$$

Du fait de la non linéarité de la fonction de Planck et de la loi de Wien, la longueur d'onde λ_c pour laquelle la relation ci-dessus est satisfaite dépend de la température. Cette relation, en général fortement non linéaire, peut être calculée avec précision connaissant la fonction filtre $f(\lambda)$. Toute transformation de luminance en température ou de température en luminance doit passer par cette relation caractéristique d'un instrument donné.

Les relations $\lambda_c(T_B)$ et $\lambda_c(\text{Luminance})$ ont été établies pour les radiomètres et caméras large bande EVEREST, AGA et INFRAMETRICS.

L'utilisation d'un radio-thermomètre, généralement à bande large, pose le problème de la prise en compte de l'émissivité de la cible dans l'estimation de la température de surface.

En négligeant pour simplifier la fraction réfléchiée par la cible de la luminance atmosphérique ou d'environnement, la luminance émanant de la cible, perçue par l'instrument

$$L^{cible} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda}^0(T_s) d\lambda$$

peut s'écrire, en appliquant le théorème de la moyenne,

$$L^{cible} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda}^0(T_s) d\lambda = \varepsilon_{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) L_{\lambda}^0(T_s) d\lambda$$

ce qui définit une émissivité spectralement intégrée sur la bande passante du radiomètre

$$\varepsilon_{\Delta\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda}^0(T_s) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) L_{\lambda}^0(T_s) d\lambda}$$

Cette définition amène trois remarques :

- i) strictement parlant, l'émissivité intégrée n'est pas une caractéristique intrinsèque de la cible car sa valeur dépend de la fonction filtre instrumentale.
- ii) l'émissivité intégrée dépend de la température. Cependant, dans les conditions usuelles, cette dépendance est assez faible pour être négligeable.
- iii) Si le calcul de l'émissivité intégrée passe par la connaissance de la signature spectrale de la cible, elle nécessite aussi la connaissance précise de la fonction filtre. Il est fréquent que la bande passante (ex : 8-14 μ m) ne soit donnée que de façon approximative par le constructeur, ce qui entraîne une incertitude sur la conversion température de brillance – température de surface.

A.3 Mesures par télédétection

A.3.1 Rôle de l'atmosphère

Entre la surface dont on mesure les propriétés et le capteur, le rayonnement doit traverser une certaine épaisseur d'atmosphère. Les particules et gaz présents dans l'atmosphère interagissent avec le rayonnement par les deux mécanismes de diffusion et d'absorption. La diffusion se traduit par une redistribution dans l'espace du rayonnement incident, l'absorption par une atténuation du signal dans la direction de propagation. Le niveau de diffusion dépend de la longueur d'onde, de la densité de particules et de molécules, de la géométrie des particules.

L'absorption par les molécules de l'atmosphère (ozone, dioxyde de carbone et vapeur d'eau) est fortement sélective spectralement. Les régions les moins affectées par l'absorption vont constituer des fenêtres atmosphériques, au sein desquelles sont sélectionnées les longueurs d'onde les plus utiles à la télédétection.

Aux courtes longueurs d'onde, l'ozone bloque le rayonnement pour les longueurs d'onde <0,29 μ m et élimine ainsi les radiations ultraviolettes. Au-delà et jusque vers 2,5 μ m, dans le domaine du rayonnement solaire réfléchi, l'atmosphère est relativement transparente, sauf dans les bandes d'absorption de l'oxygène et de la vapeur d'eau. La fenêtre visible correspond à l'intervalle [0,4-0,65 μ m]. Dans l'infrarouge, au-delà de 2,5 μ m, l'absorption est essentiellement causée par 3 gaz : vapeur d'eau, gaz carbonique et méthane, et l'atmosphère ne laisse passer le rayonnement que dans un nombre limité de bandes spectrales, restreignant la détection à 2 fenêtres : la fenêtre [3-5 μ m] (avec cependant une très forte bande d'absorption du CO₂ vers 4,3 μ m) et la fenêtre [8-14 μ m], la plus importante en télédétection infrarouge (avec néanmoins une bande d'absorption de l'ozone centrée sur 9,6 μ m).

La propagation de l'énergie électromagnétique dans l'atmosphère est régie par la théorie du transfert radiatif qui permet de quantifier l'atténuation selon la ligne de visée du rayonnement venant de la

source et le rayonnement propre de l'atmosphère par diffusion ou par émission aux longueurs d'ondes (fréquences) où les molécules sont capables d'absorber. On démontre que la luminance spectrale reçue par le capteur satisfait à l'équation :

$$L_{\lambda}^{capteur}(\theta, \varphi) = L_{\lambda}^{surface}(\theta, \varphi) \times \tau_{\lambda}(\theta, \varphi) + L_{\lambda}^{atm\uparrow}$$

où $\tau_{\lambda}(\theta, \varphi)$ est le facteur de transmission et $L_{\lambda}^{atm\uparrow}(\theta, \varphi)$ la luminance atmosphérique montante.

Le rayonnement propre de l'atmosphère se faisant dans toutes les directions, la surface observée reçoit un rayonnement atmosphérique descendant $L_{\lambda}^{atm\downarrow}$ distribué sur tout l'hémisphère et en réfléchit une fraction vers le capteur :

$$L_{\lambda}^{surface}(\theta, \varphi) = L_{\lambda}^{cible}(\theta, \varphi) + \iint_{2\pi sr} \rho_{b,\lambda}(\theta, \varphi; \theta', \varphi') L_{\lambda}^{atm\downarrow}(\theta', \varphi') \cos \theta' d\omega'$$

Dans le domaine infrarouge, l'atmosphère est peu diffusante et son rayonnement propre d'émission est essentiellement déterminé par la densité de molécule et la température du gaz.

La luminance de surface peut s'écrire, en première approximation (Lambertienne) :

$$L_{\lambda}^{surface}(\theta, \varphi) = \varepsilon_{\lambda}(\theta, \varphi) L_{\lambda}^0(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\lambda}^{atm\downarrow}$$

dans cette expression, comme dans la précédente, on a négligé la réflexion par la cible du rayonnement venant des objets proches de la cible (par réflexion ou par émission).

A.3.2 Corrections atmosphériques

Les corrections atmosphériques sont nécessaires pour corriger les mesures de luminance au capteur des contributions de l'atmosphère (transmission et rayonnement propre) de façon à déterminer la luminance de surface et dans un deuxième temps les caractéristiques intrinsèques de la cible, réflectivité bidirectionnelle ou température de surface et émissivité dans l'infrarouge.

Les contributions de l'atmosphère peuvent être calculées à l'aide de codes informatiques qui modélisent les processus physiques dans l'atmosphère à partir de la connaissance de sa structure verticale (composition et température essentiellement). Le code le plus utilisé est le code MODTRAN-4 (Kneizys et al, 1996) qui utilise une décomposition de l'atmosphère en 16 niveaux et simule la propagation de l'énergie électromagnétique émanant de la surface et de l'atmosphère à la résolution spectrale de 2 cm^{-1} , à partir de paramètres spécifiant la surface, l'atmosphère et les conditions d'observation. La stratification verticale (profils) de l'atmosphère est renseignée soit par des profils standards soit, mieux, par des radiosondages effectués en coïncidence spatiale et temporelle avec les observations. L'importance de la diffusion atmosphérique aux courtes longueurs d'onde peut être évaluée, à défaut de mesures directes par spectro-photomètre solaire, par la connaissance du trouble atmosphérique ou du paramètre de visibilité. Dans l'infrarouge, l'information indispensable porte sur les profils d'humidité et de température dans les couches inférieures, au moins jusqu'à 4Km.

Dans le domaine solaire réfléchi, la grandeur recherchée est en principe la réflectivité bidirectionnelle de la cible. Le processus d'inversion de la luminance mesurée au capteur peut être extrêmement complexe en raison des interactions radiatives qui se produisent entre la cible et l'atmosphère via la diffusion (albédo atmosphérique) ainsi qu'entre la cible et son environnement, soit directement, soit via la diffusion par l'atmosphère.

Pour beaucoup d'applications, une solution approchée sur la base d'une surface Lambertienne et en négligeant les interactions de second ordre est suffisante. La réflectance r_λ , exprimée sous forme de réflectivité hémisphérique, est alors extraite de la luminance de surface par la relation

$$r_\lambda = \frac{L_\lambda^{surface}(\theta, \varphi)}{E_s(\text{heure; date}) / \pi}$$

où l'éclairement solaire E_s est fonction de l'heure solaire vraie et de la date (jour Julien).

A.3.3 Problématique de la mesure dans l'infrarouge.

Dans le domaine infrarouge, les contributions atmosphériques proviennent quasi exclusivement de l'absorption et de l'émission par la vapeur d'eau. Avec les profils déduits des radiosondages le code MODTRAN permet de calculer assez précisément ces contributions et d'extraire ainsi pour chaque canal de mesure la luminance de surface de la luminance au capteur. Se pose alors la question du passage de la luminance de surface aux grandeurs spécifiques de la cible : les problèmes sont de deux sortes :

- comme dans le domaine solaire réfléchi, la correction du terme de réflexion par la surface (cible) du rayonnement atmosphérique descendant. Il est généralement suffisant de considérer la cible Lambertienne et d'utiliser la relation de Kirchoff.
- l'accès aux paramètres physiques de cible est beaucoup plus complexe et conceptuellement spécifique de l'infrarouge.

En effet, si la grandeur généralement recherchée en priorité est la température (de surface), le rayonnement émis par la cible est fonction, non seulement de la température mais aussi de l'émissivité :

$$L_\lambda^{cible}(T_s; \theta, \varphi) = \varepsilon_\lambda(\theta, \varphi) L_\lambda^0(T_s)$$

On se trouve en présence d'un problème « mal posé » avec deux inconnues pour une seule équation (mesure) : on parle ainsi d'équation manquante en radiométrie infrarouge. Pour déterminer la température par une mesure de luminance à une longueur d'onde donnée, la connaissance de l'émissivité à cette longueur d'onde est nécessaire (et vice-versa pour la détermination de l'émissivité).

De très nombreuses recherches ont été et sont menées pour contourner ce problème et trouver des solutions au découplage émissivité-température. Ces travaux ne seront pas repris ici. On se bornera à introduire de façon très succincte deux approches particulièrement significatives et qui ont été utilisées dans ce travail.

- Méthode « Split-Window » (Price, 1984) de correction atmosphérique dans l'infrarouge.

Cette méthode a été imaginée pour répondre au besoin de déterminer de façon précise la température de surface de la mer. Dans ce cas, l'émissivité de l'eau peut être considérée comme proche de l'unité (quasi CN) et peu variable spectralement. On démontre théoriquement que l'accès à la température de surface de l'eau peu se déduire directement des mesures au capteur exprimées en températures de brillance mesurées dans deux canaux adjacents dans la fenêtre atmosphérique IR (d'où le nom Split-Window), positionnés vers 10,5 μm et 11,5 μm avec aussi peu de recouvrement qu possible.

Si T1 (resp.T2) sont les températures de brillance (niveau capteur) mesurées dans les canaux 1 (resp. 2), l'algorithme le plus simple exprime la température de surface comme combinaison

Linéaire :

$$T_s = T_1 + a(T_1 - T_2) + b$$

où a et b sont des coefficients qui dépendent, notamment, du type d'atmosphère et sont obtenus par méthode de simulation sur des données synthétisées. Des algorithmes plus élaborés peuvent développés pour incorporer dans ces coefficients une dépendance angulaire (angle d'observation), une

dépendance par rapport à l'émissivité, etc. Connaissant la fonction filtre des canaux utilisés pour une méthode SW, les coefficients de l'algorithme peuvent être obtenus via des simulations utilisant MODTRAN.

- Mesures de signatures spectrales : méthode TES-MMD.

Pour les surfaces sèches et minérales, l'hypothèse de valeur élevée d'émissivité est le plus souvent en défaut et l'approche SW pour la température n'est plus applicable. Il est alors nécessaire de déterminer la signature spectrale d'émissivité de la cible directement à partir des mesures de luminance, et ce quelle que soit la température de surface qui cependant est identique dans tous les canaux. Parmi différentes solutions au problème du découplage émissivité-température, la méthode TES-MMD tend à se généraliser, pour autant que le capteur dispose d'au moins quatre canaux dans la fenêtre [8-14 μ m]. Cette méthode, itérative, est complexe et ne sera pas détaillée. Son principe essentiel repose sur l'existence, expérimentalement vérifiée pour la grande majorité des milieux naturels, d'une relation empirique entre la valeur moyenne de la signature spectrale et l'écart entre les valeurs maximales et minimales. Cette relation constitue une information complémentaire associée aux mesures relatives dans les différents canaux et permet d'assurer de façon satisfaisante le découplage recherché. Néanmoins, cette méthode doit être appliquée sur des luminances de surface et non sur les luminances au capteur, et suppose donc une étape préalable de correction atmosphérique canal par canal. Les sorties de l'algorithme seront alors les émissivités dans les différents canaux du capteur et la température de surface commune à tous les canaux.

La méthode peut aussi être appliquée à des mesures *in situ*, ce qui a été fait dans ce travail (mesures avec le radiomètre CIMEL).

Annexe B Profils verticaux de l'atmosphère

Nous présentons ici les radiosondages réalisés simultanément aux vols DAIS et de l'hélicoptère (figures B.1 à B.5). Ces données sont indispensables aux corrections atmosphériques qui ont été réalisées sur les données recueillies pour chacun des vols.

Dans le cas des vols hélicoptères, nous avons disposé sous l'hélicoptère une sonde qui a mesuré pression, humidité et température. Celle-ci était placée sous la soute de l'hélicoptère. Les valeurs obtenues sont précieuses pour déterminer, par comparaison avec les radiosondages, l'altitude de survol de l'hélicoptère, information importante toujours dans le cadre des corrections atmosphériques.

Les radiosondages nous donnent la pression pour chaque altitude. Ainsi, en considérant que pour une altitude donnée, la pression au dessus de Strasbourg est quasiment la même que sur le site où ont été récoltés les radiosondages, on obtient une altitude pour toute pression mesurée avec la sonde. La pression mesurée à l'heure de passage au dessus des sites nous permet donc d'obtenir l'altitude de survol (figures B.6 à B.8). Précisons que pour le vol du matin, le pas de temps d'acquisition des données était moyenné d'1/4 d'heure, ce qui explique la faible quantité de données dont nous disposons. En revanche, l'analyse des données de la mi-journée et de l'après-midi laissent bien apparaître dans les deux cas les deux survols successifs, séparés par un intervalle de temps de 15 à 20 minutes où la pression est constante et élevée. Il s'agit du temps nécessaire au changement d'objectif sur la caméra. Pour les courbes de température, on constate sa diminution à mesure que l'appareil s'élève, et les températures les plus basses sont atteintes au moment des survols des sites : on retrouve bien les heures de survols :

- 8h30 : survol avec l'objectif 20°
- 9h00 : survol avec l'objectif 7°
- 11h50 : survol avec l'objectif 7°
- 12h30 : survol avec l'objectif 20°
- 15h30 : survol avec l'objectif 20°
- 16h00 : survol avec l'objectif 7°

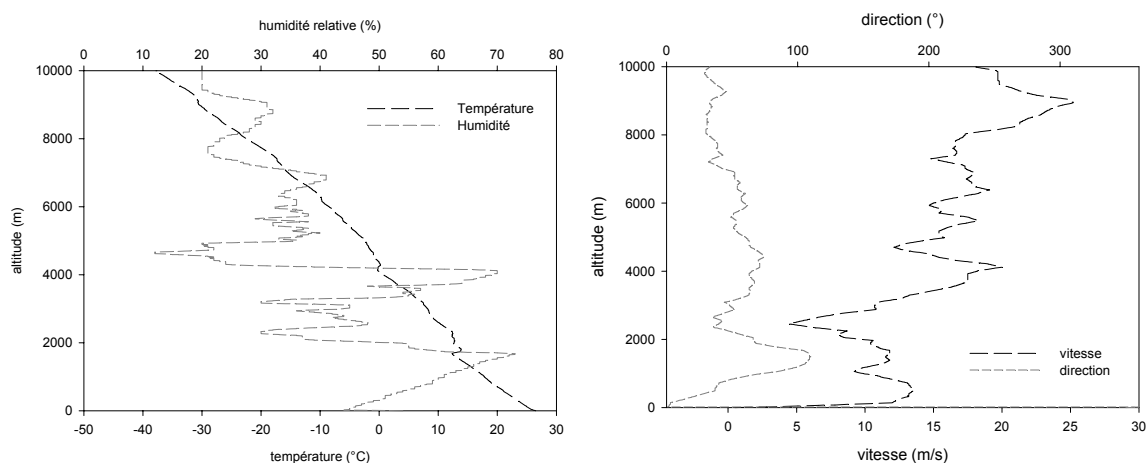


Figure B.1 Radiosondage réalisé le 27/07 à 16h

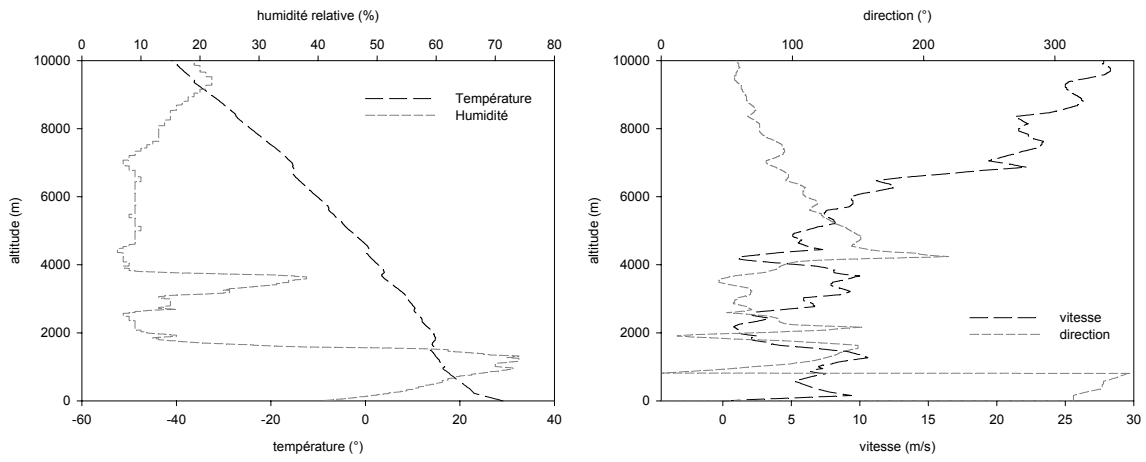


Figure B.2 Radiosondage réalisé le 28/07 à 11h30

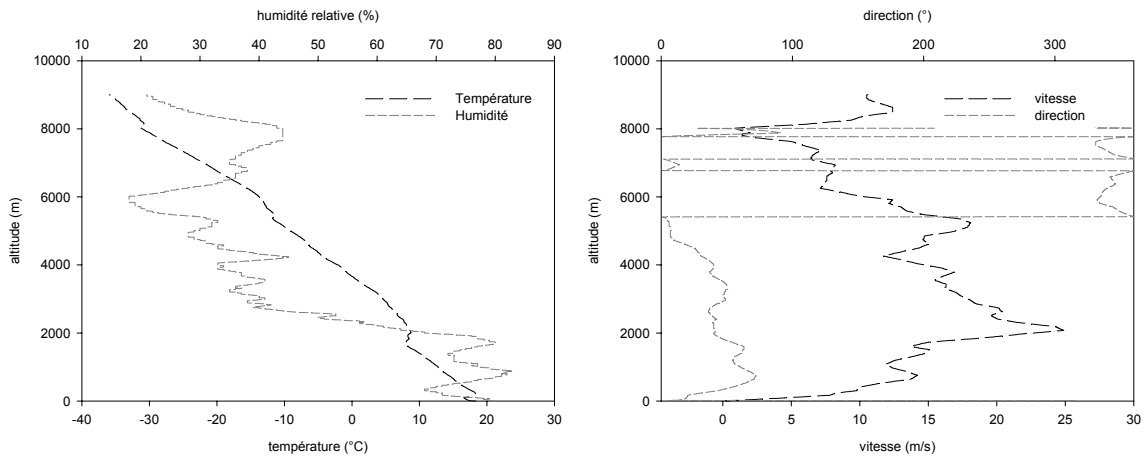


Figure B.3 Radiosondage réalisé le 14/08 à 7h

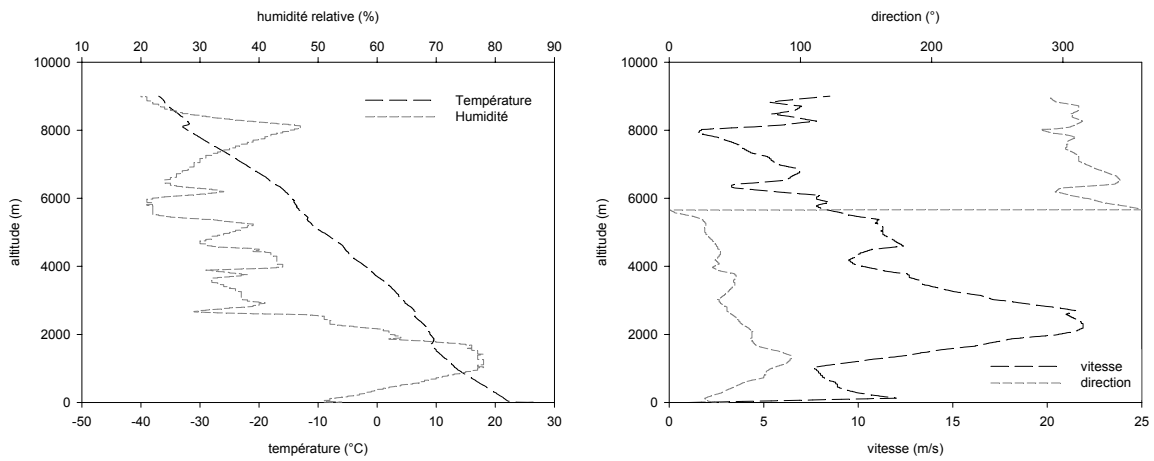


Figure B.4 Radiosondage réalisé le 14/08 à 11h30

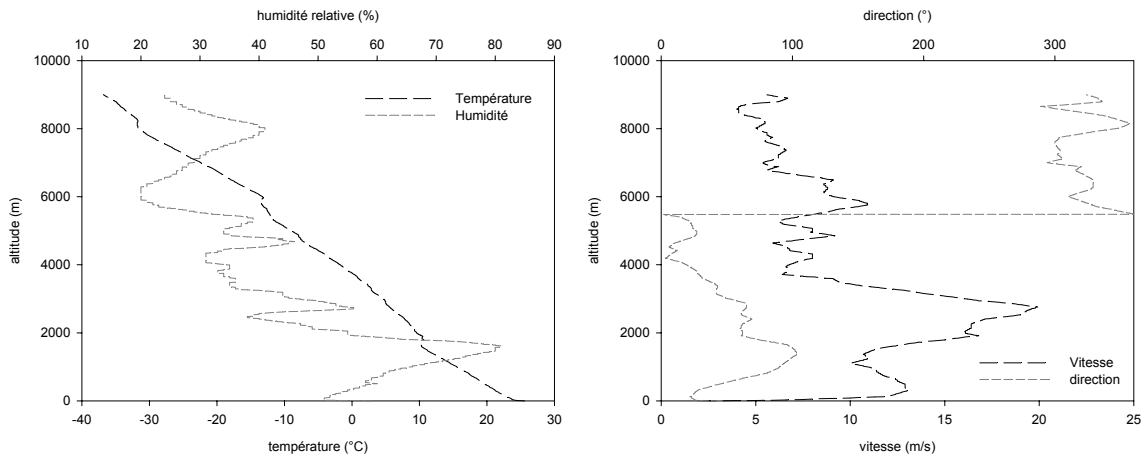


Figure B.5 Radiosondage réalisé le 14/08 à 16h

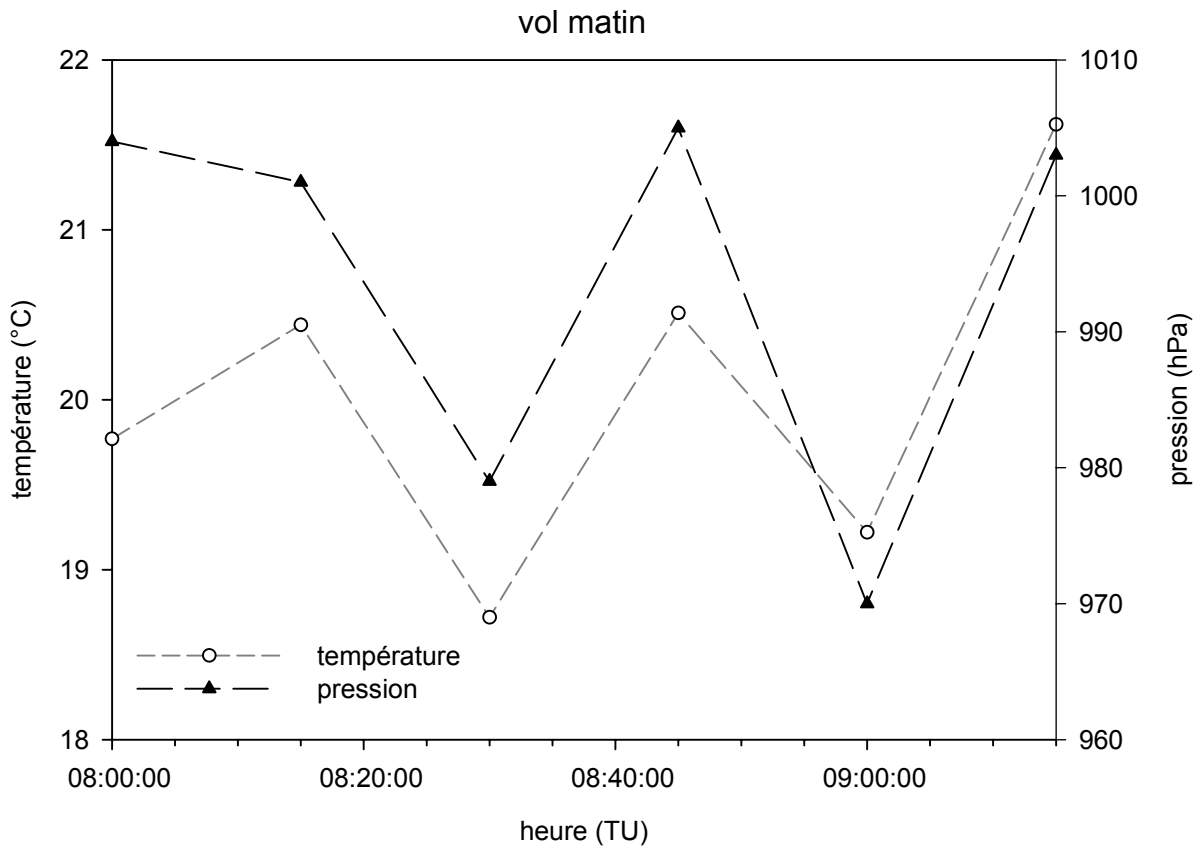


Figure B.6 Pression et température obtenues grâce à la sonde placée sous l'hélicoptère (8h30)

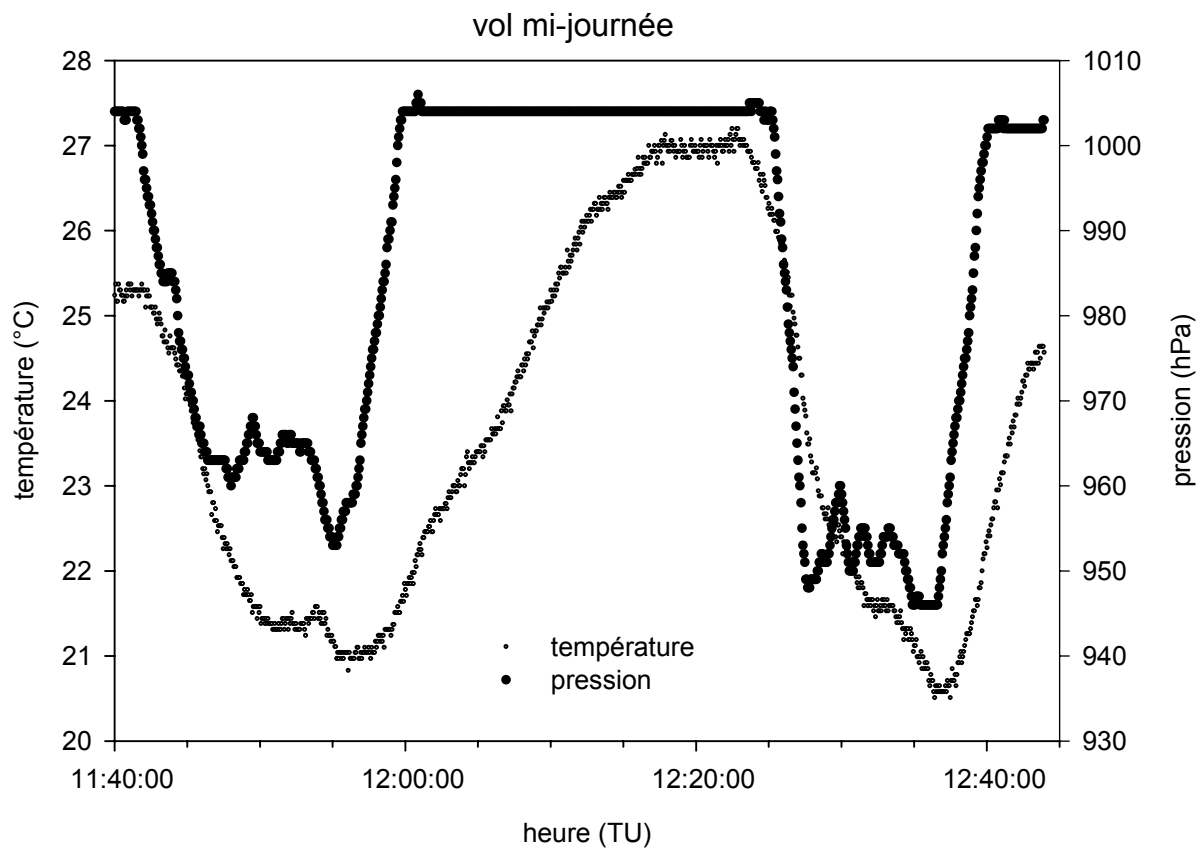


Figure B.7 Pression et température obtenues grâce à la sonde placée sous l'hélicoptère (12h30)

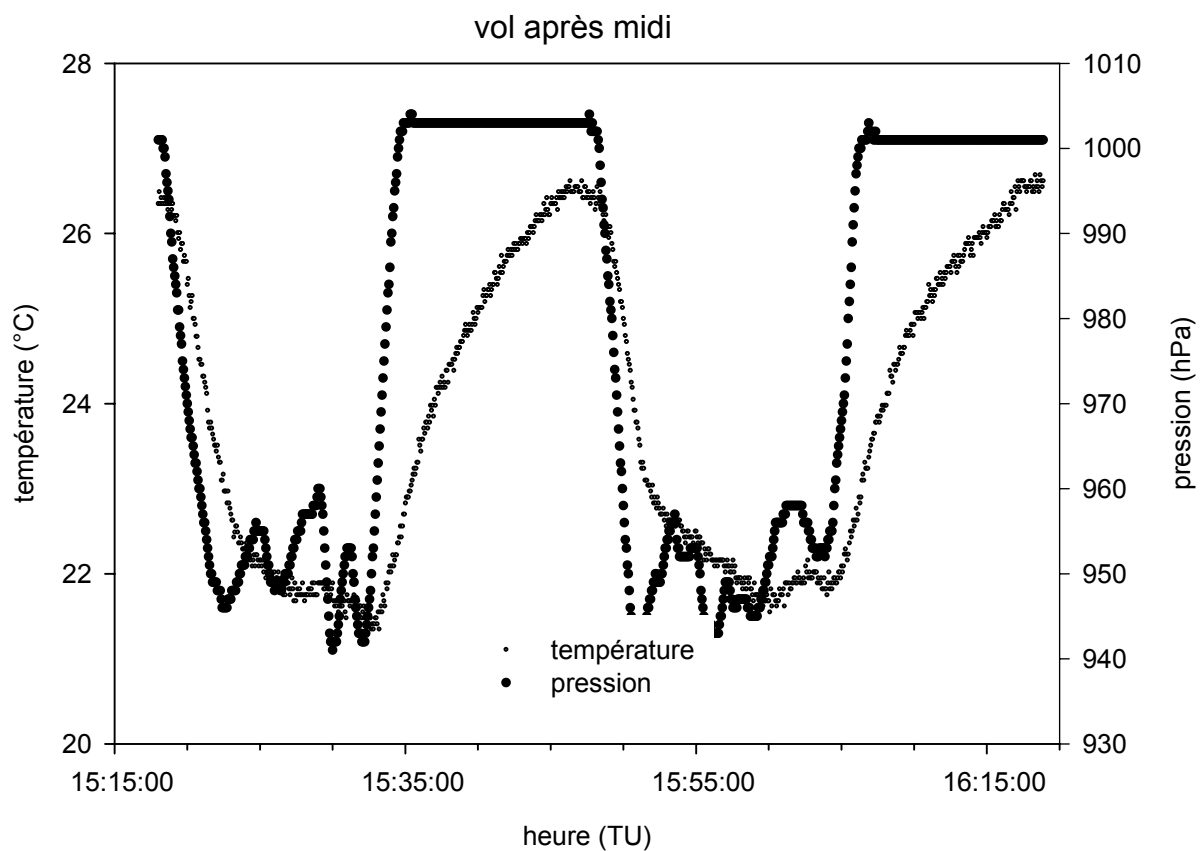


Figure B.8 Pression et température obtenues grâce à la sonde placée sous l'hélicoptère (15h30)

Annexe C Estimation de l'effet de miroitement

On peut estimer l'effet de miroitement sur l'eau en considérant que la luminance δL_{mir} s'ajoutant à la luminance émise par l'eau se calcule comme la luminance du disque solaire (diamètre apparent $30' \approx 9$ mrd) vue par réflexion spéculaire sur la surface de l'eau dans l'angle solide de la caméra (IFOV $\approx 1,8$ mrd), modulé par une fonction de probabilité de distribution de pente $f(p)$:

$$\delta L_{\text{mir}} \approx \tau_{\text{atm}} \times L_{\lambda}^{\text{soleil}}(T_{\text{soleil}}) \times \left(\frac{1,8}{9}\right)^2 \times R(\theta_i) \times f(p)$$

En prenant une longueur d'onde autour de $10\mu\text{m}$, la luminance spectrale du soleil, pour une température de corps noir de l'ordre de 5600K est $\approx 0,4 \text{ W cm}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$. On prend pour la transmission atmosphérique (TOA – surface – capteur) $\tau \approx 0,55$.

L'angle d'incidence sur l'eau est la moitié de l'angle solaire zénithal à l'heure de l'observation : les angles solaires approximatifs sont les suivants :

Heure TU	Elévation (°)	Zénith (°)	Azimut (°)	Incidence θ_i (°)
8 :30	39	51	+65	≈ 25
10 :30	54	36	-22	≈ 18
15 :30	31	59	-75	≈ 30

Pour l'observation du matin, le soleil direct est masqué du fait de l'azimut combiné à l'élévation.

Le calcul de la variation angulaire du pouvoir réflecteur entre 0° et 30° montre que cette variation est négligeable : on prend la valeur $R \approx 2\%$.

On estime la luminance due au miroitement de la façon suivante :

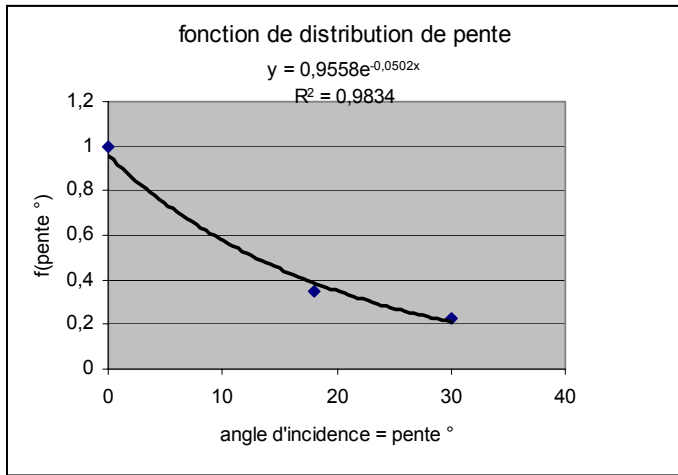
$$\delta L_{\text{mir}} = [(L_{\text{Lum-capt}})_{\text{max}} - (L_{\text{Lum-capt}})_{\text{calc}}] - \Delta L(\text{matin})$$

Le dernier terme est destiné à corriger l'écart observé entre luminance max sur l'image et luminance calculée de la variabilité intrinsèque de l'image indépendamment de l'effet de miroitement.

Le résultat pour la fonction de pente est le suivant :

Angle d'incidence θ_i	Fonction de pente $f(p)$
0°	1
18°	0,346
30°	0,227

NB : la fonction de probabilité de pente prend la valeur 1 pour l'horizontale.



On observe bien une forte décroissance de $f(p)$ en fonction de l'augmentation de la pente, bien corrélée avec une variation exponentielle.

Ce résultat n'est cependant qu'indicatif mais conforte la solution adoptée pour l'étalonnage de la caméra hélicoptérée.

Résumé :

Ce travail a pour objectif de contribuer à l'approfondissement des connaissances des mécanismes d'échange d'énergie entre la canopée urbaine et la couche limite urbaine en suivant une démarche de mesures et modélisation couplée à une utilisation de la télédétection pour la nécessaire validation à l'échelle spatiale du « fragment urbain » des sorties de modèles testées à l'échelle locale du « canyon urbain ». Un élément clé du problème est le bilan radiatif dont la détermination précise conditionne l'accès aux autres termes du bilan d'énergie dont certains, comme le flux de chaleur dans le sol ne sont pas mesurables directement. Ce travail de thèse a donc été focalisé en priorité sur le bilan radiatif, sa mesure et sa modélisation à différentes échelles, sa validation puis son intégration dans une première évaluation du bilan d'énergie global, sur la zone d'étude constituée par l'agglomération strasbourgeoise. La démarche quantitative privilégiée dans ce travail conjugue alors un modèle physique capable d'appréhender la complexité 3D d'une zone bâtie, et un ensemble de mesures réalisées dans le cadre d'une campagne intensive, mesures qui, soit en entrée, soit en sortie, constituent la vérité terrain pour la validation du modèle. A l'échelle du canyon, une très bonne concordance entre les sorties du modèle et les mesures terrain est observée, notamment dans le domaine du rayonnement solaire. Les résultats valident donc le modèle et son utilisation en tant que référence. En revanche, lorsqu'on sort d'un système simple comme celui d'un canyon pour passer à celui, plus hétérogène, du fragment urbain, un certain nombre de problèmes ont été identifiés, tant en ce qui concerne les mesures, la validation que la spatialisation à partir des données images.

Abstract :

The objective of this work is to contribute to the understanding of energy exchange between the urban canopy and the urban boundary layer by combining measurement and modelling techniques with the use of remote sensing which is necessary to validate at the spatial level of the urban fragment, models tested locally in the urban canyon. A key element of the problem is that the determination of the radiative balance effects other terms in the energy budget some of which, like the rate of change of heat in the soil are not directly measurable. This thesis focussed especially on the radiative balance including measurement and modelling to different scales, the validation of these models and the integration of results in an evaluation of the global energy bilan using the agglomeration of Strasbourg as a case study. The quantitative approach prioritised in this work combines a physical model capable of encompassing the complexity of a 3D built up zone and a collection of measurements undertaken in the context of an intensive fieldwork campaign, measurements which either as a input or an output represent the most valid framework for the validation of this model. At the level of the canyon, a good conformance was noted between the outputs of the model and the ground measurements, especially for solar radiation. The results therefore validate the model and its use as a reference. On the other hand, going outside of a simple system like that of a canyon, to a more heterogeneous system, a certain number of problems were identified both with measurements and validation of the models and with the spatialisation from remote sensing data.