



**HAL**  
open science

# Propositions pour une analyse radiative thermique des espaces urbains

Lamia Tiraoui

► **To cite this version:**

Lamia Tiraoui. Propositions pour une analyse radiative thermique des espaces urbains. Energie électrique. Université de Nantes; Isitem, 2000. Français. NNT : 2000NANT2016 . tel-00546143

**HAL Id: tel-00546143**

**<https://theses.hal.science/tel-00546143v1>**

Submitted on 13 Dec 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DE NANTES – ISITEM – ECOLE D'ARCHITECTURE DE NANTES

Année 2000

N° attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

## **PROPOSITIONS POUR UNE ANALYSE RADIATIVE THERMIQUE DES ESPACES URBAINS**

**Thèse pour l'obtention de grade de  
Docteur de l'Université de Nantes  
Discipline Sciences pour l'Ingénieur option Architecture**

**Filière doctorale : ambiances architecturales et urbaines**

**Présentée et soutenue publiquement par :**

**Lamia TIRAOU**

Le 30 mai 2000 à Nantes

Devant le jury composé de :

Francis ALLARD, Professeur à l'Université de La Rochelle

Patrick DEPECKER, Professeur à l'Université de Lyon (Rapporteur)

Albert DUPAGNE, Professeur à l'Université de Liège (Rapporteur)

Jean-Jacques DELETRE, Professeur à l'Ecole d'Architecture de Grenoble

Pierre Yves NIZOU, Professeur à l'Université de Nantes

Jean-Pierre PENEAU, Professeur à l'Ecole d'Architecture de Nantes (Directeur de thèse)



UNIVERSITE DE NANTES – ISITEM – ECOLE D'ARCHITECTURE DE NANTES

Année 2000

N° attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

## **PROPOSITIONS POUR UNE ANALYSE RADIATIVE THERMIQUE DES ESPACES URBAINS**

**Thèse pour l'obtention de grade de  
Docteur de l'Université de Nantes  
Discipline Sciences pour l'Ingénieur option Architecture  
Filière doctorale : ambiances architecturales et urbaines**

**Présentée et soutenue publiquement par :**

**Lamia TIRAOUI**

Le 30 mai 2000 à Nantes

Devant le jury composé de :

Francis ALLARD, Professeur à l'Université de La Rochelle

Patrick DEPECKER, Professeur à l'Université de Lyon (Rapporteur)

Albert DUPAGNE, Professeur à l'Université de Liège (Rapporteur)

Jean-Jacques DELETRE, Professeur à l'Ecole d'Architecture de Grenoble

Pierre Yves NIZOU, Professeur à l'Université de Nantes

Jean-Pierre PENEAU, Professeur à l'Ecole d'Architecture de Nantes (Directeur de thèse)







# **Propositions pour une analyse radiative thermique des espaces urbains**



## Remerciements

Tout d'abord, j'aimerais dédier ce travail à mes parents, qui grâce à leurs sacrifices m'ont permis de mener à bout mes projets.

Je voudrais remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu et encouragé.

Mille mercis à :

Stéphane  
Marie-Joëlle, Martine et Janick.

Jean-Pierre Péneau et Marie-Joëlle Antoine,  
pour leur encadrement durant cette thèse.

toute l'équipe du CERMA

Je voudrais exprimer mes vifs remerciements à Patrick Depecker et Albert Dupagne qui me font l'honneur de rapporter cette thèse, ainsi qu'à tous les membres du jury, qui ont bien voulu l'examiner.



## Résumé

La prise en compte des ambiances urbaines dans la conception pose la question de l'interprétation spatiale des phénomènes physiques notamment microclimatiques dans le projet. Ce travail tente d'y répondre partiellement en proposant un modèle qui traite du rapport entre phénomènes climatiques thermiques et formes urbaines.

Ce modèle permet l'analyse d'impact des formes urbaines sur les échanges radiatifs thermiques. Il repose sur le développement d'expressions physiques qui tentent de concilier la représentativité spatiale et la fidélité d'interprétation des phénomènes physiques. L'impact radiatif est défini par les transformations thermiques d'une surface provoquées par le changement d'environnement bâti.

L'illustration des différents types d'analyse et d'interprétation des interactions entre phénomènes et formes que permet le modèle est présentée. Elle tente d'introduire un essai de caractérisation spatiale et physique des impacts radiatifs de l'urbain.

La discussion de la fidélité d'interprétation des phénomènes physiques permet de proposer d'éventuelles perspectives de développement du modèle vers une analyse plus poussée des impacts radiatifs et convectifs du cadre bâti. Ces perspectives abordent également la question de l'utilisabilité et de l'interprétabilité des grandeurs physiques dans l'analyse des ambiances physiques climatiques.



## **Abstract**

The problematic of urban environment improvement lead to take into account microclimatic phenomena in urban development. This work attempts to develop a model, which allows the analysis of the relations between urban form and thermal phenomena. This model permits the analysis of the impact of urban form on thermal radiative exchanges. It is based on physical expressions, which attempt to conciliate spatial representativeness and interpretation faithfulness of physical phenomena. The impact is defined as thermal transformation led by building environment changes, which are due to urbanization. Some illustrations of the different kind of analysis and interpretations that the model leads to are presented.

The faithfulness of the physical phenomena interpretations are discussed. Some perspectives are proposed about the development of the model for better physical and perceptive impact studies. This work attempts to introduce the questions of the use and interpretation of physical figures in the definition of the climatic environment.



## **Sommaire**

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>15</b>
<b>CHAPITRE 1</b>	
<b>PROBLÉMATIQUE ET HYPOTHÈSES</b>	<b>27</b>
<b>CHAPITRE 2</b>	<b>LA</b>
<b>VILLE ET LES PHÉNOMÈNES CLIMATIQUES THERMIQUES</b>	<b>53</b>
<b>CHAPITRE 3</b>	
<b>CONSTRUCTION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE DES</b>	
<b>IMPACTS RADIATIFS THERMIQUES</b>	<b>131</b>
<b>CHAPITRE 4</b>	
<b>ILLUSTRATIONS APPLICATION À UN ESPACE</b>	
<b>URBAIN. EXEMPLE DE LA PLACE DU PILORI</b>	<b>169</b>
<b>CHAPITRE 5</b>	
<b>VERS UNE INTERPRÉTATION QUALITATIVE PHYSIQUE</b>	
<b>ET SPATIALE DES IMPACTS RADIATIFS THERMIQUES</b>	<b>191</b>
<b>CHAPITRE 6</b>	
<b>DISCUSSION</b>	<b>247</b>
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b>	<b>275</b>
<b>NOMENCLATURE</b>	<b>287</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>295</b>
<b>TABLES DES ILLUSTRATIONS</b>	<b>309</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>321</b>



## **Introduction générale**



## **Contexte de la recherche**

La recherche sur les ambiances architecturales et urbaines, remet en surface le dilemme existant entre le caractère flou des ambiances et le souci de leur compréhension et de leur conception.

Par conception des ambiances urbaines, nous entendons une mise en scène urbaine, c'est-à-dire la construction d'un environnement urbain mis en forme pas seulement par les aspects matériels de la forme mais également par ceux non-matériels liés à la perception et aux usages. Cette mise en scène devient aujourd'hui, le centre d'intérêt des communautés urbaines. En effet, l'expérience des développements urbains a révélé l'insuffisance de la concentration d'activités dans un lieu, pour en faire un pôle d'échange économique et social. La recherche d'une qualité des espaces urbains, remet en surface les questions relatives au cadre de vie, au mal de vivre, à l'insécurité et aux nuisances.

Les ambiances thermiques intérieures ont fait l'objet d'investigations plus poussées que celles des espaces urbains. La maîtrise des ambiances climatiques urbaines est en effet, moins évidente que celle d'un espace intérieur. Il est possible d'énoncer deux raisons principales. En premier lieu, la forme urbaine se définit souvent de manière peu prévisible dans le temps et l'espace. Ceci est lié à la diversité des acteurs et des enjeux urbains. En deuxième lieu, les phénomènes physiques d'ambiance se laissent également difficilement saisir. En effet, l'espace urbain constitue le milieu où interagissent de manière complexe la forme, les phénomènes physiques perceptibles et l'usage qui rendent les ambiances difficilement compréhensibles et très peu maîtrisables.

Face à cette complexité, il devient cependant, nécessaire de comprendre et de concevoir les ambiances urbaines, afin de pouvoir répondre à la problématique du développement urbain actuel. En effet, ce dernier vise principalement la (re) qualification de l'espace de la ville. Il est plus soucieux de la valorisation du cadre de vie, de l'image de la ville et au foisonnement des usages.

La construction d'ambiances par le concepteur dépend souvent de la mise en forme des intentions d'effets sensibles. Ces effets se définissent comme le résultat d'interaction entre plusieurs types de facteurs d'ambiance : physiques, sensibles, culturels, etc. Ces effets ne constituent pas une superposition ou concaténation de ces facteurs. Ils dépassent les relations de cause à effet pour recouvrir une combinaison complexe et interdépendante des paramètres d'ambiance. Ces formes sensibles se trouvent donc au centre d'une trilogie présentant des liens complexes et étroits entre la sensation, la perception et la

représentation individuelle et collective : autrement dit, entre interprétation physique, sensible et sociale des phénomènes sensibles. Les ambiances sont le fruit d'interaction entre des paramètres matériels et non matériels, intervenant souvent de manière floue et aléatoire.

La construction de la connaissance architecturale s'effectue généralement avec le temps. La mise en forme d'effets sensibles d'ambiance est souvent le fruit de diverses expériences réalisées ou vécues. Les villes vernaculaires ont su développer avec le temps, une maîtrise ambiante pertinente aussi bien de l'espace extérieur qu'intérieur et constituent pour le concepteur une référence intéressante. La connaissance nécessaire à la mise en forme des ambiances, est principalement liée à la compréhension des différents facteurs ou paramètres et de leur implication dans l'effet désiré. Les effets d'ambiances révèlent le caractère inachevé de l'architecture. Ils sont pensés comme éléments évoluant avec le temps et les usages, et jamais figés de l'espace.

Les questions de l'extraction et de l'applicabilité des connaissances sur les ambiances mises en œuvre dans le projet doivent être posées. Ces dernières se présentent souvent dans le processus du projet, de manière synthétique, figurée et/ou référencée. Il est clair que la prise en compte des savoirs dans les processus de conception architecturale et urbaine s'effectue de manière variable et selon leur importance et leur degré d'interaction avec les autres éléments du projet. En effet, les intentions d'ambiances sont confrontées à d'autres facteurs et paramètres, et interviennent rarement de manière simple ou évidente.

La reformulation et la réinterprétation des connaissances constituent un travail tout aussi important que l'extraction de la connaissance sur les ambiances urbaines. Elles reposent sur un travail de collaboration avec des concepteurs évoluant dans le cadre de projets urbains et nécessitent également une connaissance dite experte clairement identifiée.

Les phénomènes physiques constituent l'un des paramètres d'ambiance. Ils restent étroitement liés aux effets sensibles. Les phénomènes physiques perceptibles affectent nos sensations et par de là nos comportements ainsi que nos usages et nos perceptions de l'espace dans lequel nous évoluons. Ils constituent également les paramètres les plus palpables des facteurs d'ambiances dans le projet. La maîtrise des phénomènes physiques sensibles (perçus par nos sens) en architecture tels que la lumière, la chaleur, a révélé ces éléments comme de véritables matériaux de construction du lieu, et restent donc inhérents à la forme et à l'espace.

Dans le cadre de la construction de connaissances d'aide à la mise en forme des ambiances urbaines, nous nous intéressons aux effets physiques climatiques caractéristiques de la ville.

Par la conception des ambiances, il est clair que nous n'entendons pas une recherche d'environnement orienté vers l'hyper-régulation. Comme le souligne

P. Amphoux (1999), il est important de lutter contre l'indifférenciation sensible à l'espace urbain. La construction urbaine basée sur un modèle thermique universel d'espace urbain par exemple, constitue pour nous une erreur qui va à l'encontre de la spécification du lieu et de la richesse sensorielle des ambiances urbaines. La recherche de moyens de maîtrise des ambiances s'oriente vers une proposition d'éléments nécessaires à la compréhension et à la construction de cette richesse sensorielle, qui ne trouve pas un champ d'investigation poussé. Nous n'aborderons pas dans cette recherche, une approche transversale entre le palpable et le non-palpable, et entre sensation perception et représentation, qui est inhérente aux ambiances. En effet ceci nécessiterait en dehors d'une connaissance poussée des phénomènes physiques d'ambiance, une enquête psycho-sociologique permettant la mise en exergue des effets sensibles des phénomènes. L'objet de cette investigation réside dans la caractérisation des effets physiques. La désignation d'effet sensible perceptible s'oppose à celle d'effet physique, et concerne une investigation intégrant la perception et le comportement. L'effet prend dans cette investigation, essentiellement le sens d'impact physique, car il met en relation les configurations spatiales et les phénomènes physiques thermiques.

Les caractéristiques climatiques urbaines sont définies généralement par les différences de comportements thermiques et radiatifs entre ville et campagne. Les phénomènes climatiques urbains sont associés aux perturbations écologiques et climatiques qu'induit l'environnement urbain. Ces derniers sont généralement dus aux développements économiques et industriels ; pollution, densité de population, transport, industries, etc.

L'un des acteurs importants de cette caractérisation climatique est le bâti. La ville ne fait pas que subir le climat, elle le modifie. Quoique les facteurs anthropiques soient importants, le milieu bâti joue un rôle considérable dans la modulation des ambiances thermiques urbaines (ombres, inertie thermique des matériaux, multiréflexions, etc.). La prise de conscience à elle seule de l'implication des choix architecturaux et urbains dans la caractérisation climatique, voire dans les problèmes environnementaux que connaît la ville, ne suffit pas. Il est évident qu'il faut mettre à la disposition des concepteurs plus d'éléments de connaissance ou d'outils permettant une meilleure maîtrise de l'environnement physique sensible.

Cependant, les avancées scientifiques en terme d'impacts climatiques de l'urbanisation sur le confort de l'usager semblent rester très peu exploitées, ou encore insuffisamment développées pour être intégrées dans le processus de production de la ville. Généralement, les climatologues développent la recherche microclimatique à des échelles importantes ne permettant pas l'applicabilité ou l'interprétation des résultats à des niveaux d'action qui sont plus réduits et plus spécifiques qui est l'échelle d'intervention des architectes.

Le deuxième niveau de décalage entre les recherches climatiques et le milieu de la pratique urbaine, se trouve au niveau des différences d'objectifs dans l'un est la production de connaissance et l'autre la production urbaine. En effet, les climatologues s'attachaient principalement à l'analyse des phénomènes physiques sans établir nécessairement des relations avec les aspects pragmatiques architecturaux et urbanistiques du développement urbain actuel. Notons cependant que la recherche s'oriente vers une démarche interdisciplinaire et met en œuvre des approches qui tentent de rapprocher les attentes des deux domaines. Ceci va de pair avec l'intérêt croissant que porte les concepteurs aux aspects physiques de l'environnement.

La microclimatologie urbaine regroupe aujourd'hui des scientifiques de différentes disciplines (climatologues, météorologues, physiciens, architectes, urbanistes,...). Elle aborde également des échelles et enjeux environnementaux divers suivant les situations spécifiques auxquelles la ville peut être confrontée. Ces enjeux relèvent de l'ordre de :

- l'écosystème naturel. Il peut être perturbé soit localement ou de manière globale : réchauffement planétaire, perturbation du microclimat local (existence de relations étroites du climat avec la faune et la flore existante, etc.),
- l'écosystème urbain où l'utilisateur joue un rôle important. Effets du microclimat sur l'image, la fonction et le degré d'usage de l'espace public. Ces effets mettent en jeu le confort et l'appréciation climatique du lieu.

L'apogée actuelle des enjeux environnementaux, fait de la problématique de l'applicabilité des connaissances et son rapport avec les dimensions projectives, l'enjeu primordial de la recherche climatique urbaine actuelle.

La recherche sur le rapport entre microclimatologie et conception urbaine impose un environnement d'investigation par essence pluridisciplinaire, qui repose sur la complémentarité des approches. La particularité du domaine de la recherche microclimatique réside en effet, dans l'étude de phénomènes physiques particuliers cherchant à mettre en place des connaissances d'ordre général de ces phénomènes. Le domaine de la pratique architecturale et urbaine adoptant une démarche inverse; tente de trouver des propositions (solutions) spécifiques à partir d'une connaissance d'ordre général du phénomène.

L'établissement d'interfaces entre les milieux scientifiques et les acteurs du projet dépendra principalement de la définition des relations entre les effets climatiques recherchés et les facteurs à mettre en œuvre dans le projet nécessaires à leur réalisation. Ces interfaces ne peuvent se définir que par la compréhension et la collaboration de ces deux champs : l'un affecté à la recherche, l'autre à la réalisation.

Le développement de la recherche microclimatique au CERMA est ancré aujourd'hui sur deux principaux axes :

- caractérisation climatique de dispositifs et de tissus urbains, où il est question d'effectuer une étude comparée de plusieurs configurations et de tissus urbains du point de vue microclimatique,
- développement d'outils de simulation et d'analyse des phénomènes microclimatiques locaux.

Ceci dirige les réflexions du laboratoire vers d'autres questionnements liés au souci d'application des connaissances développées dans la pratique architecturale et urbaine. Ces questionnements sont : comment la recherche microclimatique actuelle peut-elle aider à la prise en compte des phénomènes climatiques dans la conception urbaine ? Quels types d'interface entre les milieux scientifiques et ceux de la pratique faudra-t-il développer ? Comment ces interfaces doivent-ils être intégrés dans le processus du projet ?

D'autres questions découlent de celles-ci : comment les dimensions climatiques peuvent-elles être abordées ? Quels sont les connaissances et les outils qui permettent de les manipuler ? Quels sont le rôle et la place de ces éléments dans le processus de conception ?

Pour permettre la prise en compte des phénomènes microclimatiques dans la conception architecturale et urbaine, il devient nécessaire de développer des connaissances mettant en relation les impacts microclimatiques et les propositions urbaines et architecturales.

Dans cette recherche, nous proposons une méthode permettant cette mise en relation, en mettant en relief les aspects formels des propositions urbaines.

Le laboratoire CERMA tente de cerner les ambiances physique en milieux urbains, principalement par le développement d'outils de simulation physique. Notons les travaux effectués sur les ambiances solaires (Groleau et al. 1995), et sur l'éclairage naturel des espaces urbains (Miguet 1996). La recherche sur les caractéristiques ambiantales des milieux urbains a conduit à une réflexion sur la possibilité de développement des techniques et outils déjà adoptés pour la compréhension des phénomènes thermiques liés à l'ensoleillement sur le microclimat urbain.

Le développement d'outils nous paraît nécessaire à cette investigation. Face à la diversité croissante des formes urbaines et la complexité des interactions des phénomènes physiques, la simulation permet d'aborder les situations les plus complexes et les plus variées. Elle permet également de les comparer et de les analyser. Cependant, il est important de soulever les questions relatives à la fidélité des outils de simulation et à la nécessité de validation expérimentale. En effet tout modèle physique reste une représentation d'une réalité dans la fiabilité dépendra de sa fidélité d'expression d'un phénomène. Cette fidélité ne peut être validée qu'à partir de sa confrontation à cette réalité. Nous tenterons de prendre des réserves quant à l'interprétation des résultats et nous

consacrerons un chapitre à la discussion de la validation de la méthode développée (cf. chap.6).

L'objectif de compréhension des impacts microclimatiques urbains, suppose un repositionnement de la démarche de modélisation actuelle, qui serait axée vers l'explication et l'analyse plutôt que la description des phénomènes physiques urbains : modèle explicatif. En effet, nous proposons un modèle climatique physique qui a pour objectif la mise en exergue des impacts du cadre bâti sur les situations climatiques thermiques.

Cette démarche ne veut en aucun cas s'opposer à la modélisation microclimatique descriptive, au contraire, elle lui est complémentaire sur deux points. En premier lieu, elle tente d'expliquer les phénomènes observés ; elle met en relief les facteurs caractérisant les situations thermiques simulées. En deuxième lieu, devant la complexité des manifestations climatiques analysées, le modèle développé repose sur la conciliation entre la précision des résultats numériques et la représentativité spatiale des phénomènes analysés. Il ne peut pas, au même moment, expliquer et décrire de manière précise (numériquement) les impacts climatiques. Il n'apporte que des informations d'ordre qualitatif et vient compléter de ce fait les outils de simulations dits descriptifs.

La proposition d'un modèle d'analyse des impacts climatiques urbains implique la définition de descripteurs représentatifs des manifestations étudiées. Ces derniers expriment une *variation* d'état plutôt qu'une situation physique donnée. En effet, dans l'objectif de la mise en exergue des facteurs intervenant dans la caractérisation thermique des espaces urbains, il s'agit de définir les manifestations qui représentent les impacts thermiques climatiques. Ces derniers désignés par *influences*, expriment les variations thermiques subies par une surface en présence d'un cadre bâti. Par la détermination des influences thermiques, spécifiquement radiatives, différents descripteurs physiques et spatiaux sont proposés.

Les influences, le modèle physique explicatif et les descripteurs constituent le cadre méthodologique proposé, permettant l'analyse des impacts radiatifs thermiques urbains.

Dans les prochains chapitres, nous présenterons de manière plus précises les modalités de construction du modèle développé, et l'élaboration méthodologique proposée nécessaire à la description et à l'analyse des impacts climatiques thermiques du cadre bâti.

Dans ce qui va suivre, nous tenterons d'aborder les développements essentiels à notre investigation, ainsi que l'environnement spécifique à ses déploiements.

## Développement de la recherche

La prise en compte des phénomènes climatiques dans le projet implique la définition de leur relation avec les propositions architecturales et urbaines et de leur degré d'implication dans la qualité du projet. Les projets urbains résultent partiellement des choix de positionnement par rapport aux différents facteurs intervenant. L'argumentation et la justification des choix sont inhérentes à la validité de la proposition. L'argumentation devient d'autant plus importante quand le projet va à l'encontre des intentions du maître d'ouvrage ou quand il induit des frais supplémentaires. Nous n'aborderons pas ici de manière plus poussée la question de l'argumentation dans le projet par rapport aux phénomènes microclimatiques. En effet, elle nécessite une investigation sur l'implication des phénomènes microclimatiques dans le projet et sur son incidence non seulement sur la perception et l'usage de l'espace mais également sur les autres aspects du projet (techniques, économiques, etc.).

Il s'agit de répondre principalement à la question de l'implication des choix architecturaux et urbains, de par leur caractéristiques formelles dans les impacts microclimatiques physiques. Ceci constitue une réponse indispensable à la question de l'argumentation. Nous rappelons que très peu de travaux se positionnent à cette échelle qui est celle du projet urbain. Ce dernier opérant à l'échelle de la rue, de l'îlot ou du quartier, ne trouve pas de réponses dans les recherches microclimatiques actuelles, qui se positionnent principalement à l'échelle de l'agglomération. Rappelons qu'en dehors de la question de l'échelle, la recherche microclimatique s'investit dans des questions plus pointues des phénomènes physiques. L'extraction des relations entre caractéristiques du bâti et impacts microclimatiques constitue pour nous l'investigation plus ciblée vers la conception. En effet, elle met en relation à l'échelle du projet, les aspects configurationnels de l'espace et le microclimat.

Cette idée d'interaction entre les phénomènes physiques climatiques et les aspects formels de l'espace, a induit un terrain d'investigation pluridisciplinaire réunissant physiciens et architectes. Il est important de préciser que ce type d'environnement de recherche a permis le croisement d'approches disciplinaires diverses qui a enrichi ce travail. Cet environnement ne s'est pas traduite en aucun cas par une relation de demande et d'offre comme pourraient le croire les concepteurs ou les physiciens. En effet, il ne s'agissait pas de formuler des questions et aux physiciens de trouver des réponses. Les préoccupations soulevées par ce travail, permettaient de confronter les différentes questions et réponses et de discuter de leur validité, non seulement en termes physiques mais également du point de vue architectural et urbain. Une expérience intéressante permettant de révéler non seulement la participation des architectes aux questions physiques, mais également celle des physiciens aux questions architecturales et urbaines, qui était très enrichissante.

Les développements de ce travail ont pour objectif la proposition d'un modèle permettant la mise en relation des facteurs physiques et formels intervenant sur le microclimat urbain. L'enjeu premier de ce modèle ne réside pas dans sa complexité et sa précision, mais dans cette mise en relation permettant la représentativité spatiale des phénomènes thermiques climatiques, sans nuire à la représentativité physique des phénomènes.

La construction du modèle repose sur :

1. la recherche sur les facteurs reliant les phénomènes physiques aux caractéristiques formelles de l'espace.
2. la discussion de la représentativité de ces facteurs transversaux dans le modèle.
3. la discussion de l'interactivité et de la validité des analyses mettant en exergue cette transversalité.

Ces trois principaux points structurent notre recherche. Par cette investigation nous tentons de démontrer principalement la possibilité de conciliation entre la représentation spatiale et la fidélité d'interprétation physique des phénomènes microclimatiques. Elle met en relief également, la construction de grandeurs ou descripteurs significatifs par rapport aux aspects physiques et spatiaux des phénomènes microclimatiques. Dans ce cadre d'investigation, l'interprétabilité et l'utilisabilité des descripteurs proposés sont discutées.

Afin de mieux aborder ces différents points nous limitons notre étude aux aspects radiatifs thermiques. La prise en compte des autres facteurs climatiques dans la construction du modèle développé est possible. Ceci fera l'objet de propositions de développement.

Ce rapport de thèse se structure comme suit.

Au chapitre 1 : *Problématiques et hypothèses*, l'approche adoptée : explicative sera présentée de manière plus rigoureuse. Nous tenterons de définir les choix relatifs à notre travail et les résultats attendus.

Le chapitre 2 : *La ville et les phénomènes climatiques thermiques*, un état de l'art sur la recherche et la prise en compte des phénomènes microclimatiques urbains est dressé. Il tente de mettre en relief les différents facteurs climatiques physiques et spatiaux nécessaires à la construction du modèle. Les questions relatives à l'investigation microclimatique, dans l'objectif de sa prise en considération dans la conception des espaces extérieurs, sont également abordés.

Les chapitres qui suivent font état de nos propositions.

Au chapitre 3 : *Construction méthodologique et physique d'analyse des impacts radiatifs thermiques du cadre bâti*, nous présenterons la construction méthodologique et physique relative à la mise au point du modèle.

Au chapitre 4 : *Illustrations*, nous tenterons d'argumenter le type d'interprétation et d'analyse microclimatique qu'induit le modèle et cela en premier lieu à travers un exemple illustré d'analyse : place du Pilon à Nantes.

Au chapitre 5 : *Interprétations physiques et spatiales des influences radiatives thermiques urbaines*. Des analyses plus théoriques, permettent de présenter les différentes interprétations possibles des impacts thermiques des formes urbaines, que permet le modèle explicatif. Par cela nous posons quelques éléments de caractérisation thermique de la forme urbaine, de manière plus générale, abordée du point de vue des impacts.

Au chapitre 6 : *Discussion*, nous discuterons le modèle en terme de fidélité d'interprétation des phénomènes physiques d'impact.

En *conclusion*, nous proposons d'esquisser quelques perspectives de développement du modèle, non seulement en terme d'analyse d'impact thermique du cadre construit sur les surfaces urbaines, mais également celle de son impact sur la perception des usagers.



# **Chapitre 1**

## **Problématique et hypothèses**



Ce travail cherche à définir des effets qui sont à la croisée des phénomènes radiatifs thermiques climatiques et des formes urbaines. Il s'agit de définir : comment caractériser les formes spatiales urbaines du point de vue des phénomènes thermiques climatiques ?

Nous rappelons que la caractérisation des dimensions thermiques et spatiales climatiques urbaines permet de définir un corpus nécessaire à l'intention projective, soucieuse des questions de qualité de l'environnement climatique.

Nous pourrions exprimer l'essence de cette recherche par l'analyse et la compréhension des interactions entre bâti et phénomènes. Le bâti est considéré par ses aspects formels et spatiaux. Les phénomènes regroupent les échanges radiatifs thermiques des parois entre elles et avec leur environnement.

Notre champ d'investigation se limite à la caractérisation formelle et physique des ambiances urbaines. Cela ne suppose en aucun cas que les facteurs physiques sont les seuls intervenant dans les ambiances thermiques urbaines. Cependant, les caractériser constitue une des premières étapes d'appréhension des dispositifs complexes qui définissent les ambiances urbaines.

La proposition présentée dans notre rapport, concerne le développement d'un modèle physique dit explicatif mettant en relation les caractéristiques formelles de l'espace et physiques des phénomènes thermiques climatiques. La construction méthodologique de notre approche sera argumentée de manière déductive à partir de quatre points principaux.

En premier lieu nous tenterons de poser les questions relatives à la complexité de l'appréhension formelle de l'urbain. La construction de connaissance sur les impacts thermiques climatiques, à partir de l'observation climatique des différents types de formes urbaines existants, est prohibitif. Le choix d'une approche explicative se justifie dans le sens où elle permet d'apporter des réponses à nos interrogations qui soient applicables à des cas urbains, aussi bien caractéristiques que spécifiques, et de pouvoir les vérifier. Ainsi, le modèle développé doit permettre de répondre à la question suivante :

Comment la caractérisation thermique d'un espace urbain de par ces particularités formelles peut-elle être possible ?

En deuxième lieu, sera abordé le modèle explicatif. Il s'agit de poser les éléments méthodologiques relatifs à la construction d'un modèle physique qui répond à notre problématique de compréhension des interactions entre phénomènes physiques climatiques et formes.

En troisième lieu, nous présenterons les différents types de démarches employées dans l'analyse climatique thermique de l'urbain. Ceci nous permet de dresser le cadre d'investigation méthodologique que nécessite le modèle physique explicatif climatique que nous développons.

En dernier lieu, Il s'agit de présenter nos interprétations spécifiques de la démarche explicative, ainsi que les différents choix de positionnement. Cela s'effectuera en rapport avec ce que nous entendrons par l'analyse climatique thermique de la forme urbaine. Les principales hypothèses inhérentes à la construction du modèle seront présentées

## 1.1 Problématique

La caractérisation formelle de l'urbain permettrait-elle la définition de microclimats spécifiques ? Cette question constitue l'objectif principal de notre travail, et doit être précédée par deux types de questionnements partiels mais déterminants dans notre recherche :

- Questionnements relatifs à la lecture formelle de la ville, par exemple :
  - Existe-t-il une logique de lecture de la forme urbaine ?
  - Est-il possible de définir un répertoire de formes urbaines ou spatiales à partir duquel sera esquissé celui des microclimats urbains types ?

Ainsi nous tenterons de présenter les difficultés de caractérisation formelle de la ville, qui sont liées à trois principaux points :

- la difficulté d'utilisation des descripteurs d'analyse urbaine développés par les morphologues à l'étude microclimatique,
  - la complexité urbaine,
  - l'édification méthodologique de l'analyse urbaine et l'implication des vocations disciplinaires dans la définition des approches.
- 
- Questionnements relatifs au moyen de la mise en correspondance des caractéristiques formelles de l'espace avec les conditions climatiques thermiques. En effet, comment les dimensions thermiques et spatiales de l'urbain peuvent-elles être abordées ? Ceci définira les principales hypothèses inhérentes à cette recherche, qui s'oriente vers le développement de modèle physique. Ainsi la problématique de cette recherche est de définir comment la forme urbaine participe à la création d'un microclimat local ?

La caractérisation formelle de la ville dépend de la structure méthodologique de la lecture urbaine mise en œuvre. Les structures méthodologiques sont basées sur la définition de moyens de caractérisation formelle de l'espace urbain, définis différemment suivant l'approche d'analyse urbaine adoptée.

L'approche de lecture urbaine est basée sur l'étude du rapport entre les objets constitutifs de l'urbain qu'ils soient matériels (cadre bâti, topographie, etc.) ou non-matériels (comportements sociaux, les développements économiques, etc.). Cette approche se situe dans la perspective de connaissance à trois niveaux : descriptif, interrogatif et explicatif. Le descriptif, l'interrogatif et l'explicatif restent étroitement liés à la structure méthodologique relative mise en place. Ces derniers apparaissent dans la littérature étroitement liés.

Dans le cadre d'une analyse strictement formelle comment sont définis les objets matériels de la forme urbaine ? Quels rôles jouent les figures géométriques et topologiques dans la définition de ces objets urbains et architecturaux ?

Pour répondre à ces questions, nous avons retenu trois définitions assez précises de ce qui est désigné par "*forme*" et "*géométrie*" en architecture et en urbanisme. Nous proposons un choix de trois auteurs qui essaient de définir la portée géométrique et dimensionnelle de la forme. Albert Lévy se distingue des deux autres par l'introduction de contenu social dans le concept de forme urbaine.

Selon A. Lévy (Merlin et al. 1988) :

"La forme urbaine est un dispositif topologique :

La forme urbaine est reconnue comme une structure sémiotique de correspondance entre une organisation sociale et sa distribution spatiale donnant lieu à un dispositif topologique et proxémique (à partir de l'exploitation des rapports de continuité/discontinuité, centre / périphérie, haut/bas, intérieur / extérieur, est / ouest, nord / sud, éloignement / proximité...) en rapport avec les usages et les mœurs d'une société qu'il sous-tend, et les significations mythiques, symboliques, ... qu'il recouvre.

La forme urbaine est une configuration géométrique :

Une même distribution urbaine peut donner lieu à plusieurs conformations urbaines ou si l'on veut, un même dispositif topologique peut engendrer plusieurs configurations géométriques différentes (homéomorphisme).

A ce niveau de saisie de la forme urbaine, il s'agit de voir comment la géométrie, ses figures et ses propriétés, sont utilisées pour mettre en place et renforcer une distribution urbaine : axialité, tracés, trames, figures, ... vont venir régulariser et soutenir l'implantation urbaine, en fonction de la conception sociale des mathématiques. Définir le rapport (historiquement défini) entre morphologie sociale et formes urbaines. Nous appellerons typologie urbaine formelle la prise

en compte de ces configurations géométriques, comme critères de classification des villes à travers leur conformation".

Selon P. Pinon (1992) :

"La *topologie* rend compte des positions et de liaisons, elle intéresse tous les instruments de la composition. Le *positionnement* (éloignement, proximité, contiguïté externe ou interne, chevauchement, inclusion latérale ou totale) intéresse plus particulièrement le *découpage* ou les *occupations*. Le *liaisonnement* (direct ou indirect, linéaire, arborescent ou rayonnement, en boucle, en résille ou tramé, en échelle) intéresse plus particulièrement les *tracés*.

La *géométrie* rend compte des figures (géométriques, déformées, résiduelles, organiques) et des directions (obéissance par parallélisme, par perpendicularité, par convergence, obéissances latérales, axiales ou totale désobéissance). Elle concerne surtout les tracés ou éventuellement le contour des découpages. La géométrie joue un rôle important dans l'intégration des figures ou des directions les unes aux autres".

Selon C. Norberg-Schulz (1979) :

"La description formelle est par définition indépendante de la dimension sémantique. Le problème sera donc d'établir un système de catégories formelles permettant de décrire et de comparer les structures formelles.

Le besoin de catégories formelles part du désir que toute description devrait être faite "en terme d'objet". Quand nous disons que l'analyse formelle consiste à indiquer les éléments et les relations, cela signifie en premier lieu que nous devons utiliser des objets définis comme dimension de comparaison (éléments) et deuxièmement que nous devons rendre compte des rapports existant entre ces dimensions.

Le terme de relation désigne une façon systématique de distribution des éléments.

Le terme élément a une double signification, il désigne :

- un ensemble indépendant,
- une partie appartenant à un contexte plus vaste.

Pour classer les éléments architecturaux, nous nous baserons sur les concepts de "masse", d' "espace" et "surface".

La surface peut servir de limite aux masses et aux espaces. Le terme masse désigne tout corps à trois dimensions tandis que l'espace s'applique à un volume bien défini par les surfaces délimitantes des masses environnantes.

- Les *relations formelles* sont nécessairement tridimensionnelles ou spatiales puisque les éléments sont nécessairement des masses et des espaces. Les relations bidimensionnelles sont désignées par euclidiennes, alors que les relations formelles sont désignées par topologiques.

- Les *relations bidimensionnelles* appelées relations géométriques sont commodément classées en tant qu'organisation d'éléments par rapport à un point, à une ligne, ou à un système de coordonnées

Un type particulier de *structure formelle* n'admet que des éléments pourvus de certaines propriétés. Différentes combinaisons d'éléments et de relations peuvent créer un nombre infini de structures formelles. Il ne suffit pas de dire que l'élément doit appartenir au système. Il doit jouer un rôle particulier à l'intérieur du système."

Les auteurs cités définissent la *géométrie* et la *topologie* comme éléments de base pour l'analyse des structures formelles de l'urbain. Cette dernière est définie par les objets architecturaux appelés encore éléments ou masses. Dans les approches citées, on note la présence de deux éléments qui composent l'urbain : les masses et l'espace. Ces composants entretiennent des relations topologiques, géométriques et même dimensionnelles et numériques selon Pinon.

Les termes de géométrie et de topologie en architecture recouvrent des aspects configurationnels différents. La topologie signifie l'analyse relationnelle des objets architecturaux entre eux, et le terme de géométrie recouvre quant à lui l'aspect formel des objets. Donnons quelques exemples de représentation topologique et géométrique d'un réseau de communication. Du point de vue topologique, ce dernier peut être en ligne (en chaîne), en anneau (en boucle), en arbre (hiérarchique ou en arborescence), en grappe, ou en nébuleuse, etc. Du point de vue géométrique le réseau peut être diagonal, orthogonal, radioconcentrique, etc. Pour A. Lévy, la troisième dimension qui sépare le géométrique du topologique représente les comportements sociaux. Par ces exemples d'analyse formelle de l'urbain, il est possible d'observer que les éléments de définition ne sont pas nécessairement géométriques, et dépendent principalement des repères dimensionnels utilisés par les morphologues urbains. *Morphologie urbain* est emprunté au terme anglais *morphologist*

utilisé dès 1845 d'après les membres de l'association internationale d'étude urbaine (Urban Morphology Interest Groupe), et désigne des chercheurs ou mouvement en analyse de la forme urbaine.

Les composants pleins (bâti) se définissent selon leur nature géométrique, par la ligne, le plan, le volume. Les composants vides (espaces) ont beaucoup plus de mal à être définis. La forme introduirait plutôt le concept de *figure*, et l'espace peut être défini en tant que volume par les objets qui l'entourent.

Dans le cas d'une rue par exemple, elle est définie par sa figure linéaire, sa largeur, les hauteurs de ses limites. Mais quand on parle d'espace géométriquement complexe, tel que les centres d'îlot, le problème se complique ; certains auteurs comme M.-J. Bertrand (1980) utilisent un indice de dispersion des surfaces, où il est question de rapport entre largeur et profondeur de la parcelle. L'aspect géométrique ici tend à disparaître et est remplacé par un coefficient.

L'idée de décomposition et de recomposition est également émergente dans les différentes analyses urbaines développées dans la littérature. Les éléments de l'urbain seraient des composants d'autres éléments urbains et qui entretiennent entre eux des relations qui caractérisent une totalité ou des parties d'une totalité : un tissu ou un fragment urbain.

Ainsi, on peut noter quelques exemples de rapport d'analyse de forme, observés dans la littérature :

- forme de l'îlot / découpage parcellaire,
- parcellaire/ tracé parcellaire / division parcellaire/ occupation du parcellaire (Rouleau 1967),
- typologie formelle / typologie des bâtiments (dimension, style, hauteur...) / typologie des axes/ typologie des tracés / voirie / réseau,
- structure / structure spatiale / organisation spatiale,
- espace ouverts / espace bâti (bâti/ non bâti)...

Rappelons que le tissu urbain est une expression métaphorique assimilant les cellules construites et les vides urbains à l'entrelacement des fils d'un textile (Merlin et al. 1996). Le tissu urbain présente des composants urbains (cadre bâti, parcellaire, voirie, etc.) et des règles de composition (découpage parcellaire, organisation du bâti, etc.) qui sont homogènes ou récurrents.

On peut ainsi résumer les paramètres d'analyse formelle urbaine, selon les références citées comme suit :

- les paramètres formels sont géométriques : position, orientation, longueur, largeur, superficie, périmètre, ...
- les paramètres relationnels sont topologiques : disposition, type de relation : voisinage, intersection, inclusion, continuité, discontinuité, etc.

La caractérisation formelle de la ville se révèle cependant complexe. Bien que nous pouvons parler de typologies urbaines récurrentes, la récurrence ne concernera que certains types de relation et de forme. Chez les morphologues urbains, les descripteurs géométriques et topologiques sont définis suivant la situation urbaine analysée. Ces descripteurs mettent en relief les aspects formels caractéristiques du type ou du fragment urbain étudié. Ces démarches concernent les domaines de la géographie humaine, l'architecture et l'urbanisme. D'autres types de travaux d'analyses plus objectivées se distinguent. Ils reposent sur l'analyse numérique de la forme urbaine, tels que l'analyse des textures dans la télédétection (Bonn et al. 1992) et l'analyse fractale (Woloszyn 1998).

L'efficacité et la pertinence des descripteurs géométriques et topologiques développés ont été prouvées pour des situations d'analyse urbaine spécifiques, qu'en est-il de leur utilité par rapport aux ambiances thermiques ? Comment peuvent-ils être exploités ?

La difficulté de retranscription des descripteurs présentés plus haut, dans notre champ d'investigation est liée à deux points fondamentaux.

La première difficulté réside dans la complexité formelle de la ville.

Les formes urbaines sont liées au mode de production, qui dépendent d'un certain nombre de facteurs qui sont : les capitaux, les techniques et les relations socio-économiques. La forme urbaine peut être le fruit d'une création esthétique, mais elle ne peut en aucun cas être indépendante du contexte de production, qui est tributaire des moyens de maîtrise et de la direction du processus. A l'intérieur de ce contexte, un certain nombre d'éléments de cohérence peuvent être décelés. Chaque contexte révèle une cohérence proche de son mode de production, et de composition.

La ville constitue également, un milieu où plusieurs modes de production coexistent. Elle constitue une superposition, une juxtaposition et/ou combinaison de différentes compositions urbaines. Il est clair que l'identification formelle de la ville passe obligatoirement par la compréhension du contexte et des conditions de production. Une caractérisation formelle existe dans le cadre d'une contextualisation des faits de sa production et reste donc relative à un lieu et un temps donné.

Le discours sur la lecture de la forme sur le plan méthodologique reste ainsi spéculatif, car une mise en forme méthodologique est difficilement envisageable, en dehors du contexte d'étude. En effet, la trame de lecture formelle apparaît grâce aux éléments de cohérence relevant du contexte urbain étudié.

La deuxième difficulté est liée au fait que les lectures formelles de la ville sont également confrontées aux champs disciplinaires abordés. Plusieurs disciplines

scientifiques qui affirment leur vocation urbaine se sont développées. Elles sont à l'origine des différentes approches d'analyse formelle de la ville, qui se révèlent rarement monodimensionnelle. La ville est à la fois objet, sujet et artefact et implique de ce fait plusieurs dimensions de connaissance : historique, sociales, économiques, etc.

Donnons l'exemple d'analyse urbaine de Borie et al. (1987), qui définis plusieurs logiques d'organisation de la forme :

- logiques *référentielles* qui procèdent de la référence à des modèles (modèle de copie ou de démarche)
- logiques *fonctionnelles* qui renvoient à des structures fonctionnelles
- logiques *contextuelles* (situation géographique, historique,...)
- logiques *coexistentielles* qui renvoient à des préoccupations de cohérences internes à la forme.

La problématique posée plus haut, nous incite à mettre en place une approche spécifique répondant à nos interrogations. Cette approche délimite un champ d'investigation et oblige une construction méthodologique ciblée.

Nous ne pouvons répondre à nos objectifs visés que par la seule approche morphologique ou climatique de la ville. Une démarche combinant les aspects recherchés dans les deux champs, est plus susceptible de mettre en œuvre une analyse climatique pertinente de la forme urbaine.

Il ne s'agira pas pour nous d'étudier la prise en compte du facteur climatique dans la complexité du processus urbain, mais de comprendre comment l'urbain modifie les phénomènes thermiques. Nous allons faire abstraction de tous les autres facteurs (historiques, sociaux, etc.), pour n'étudier que la forme même de l'espace et son impact sur le microclimat. Cette limitation du champ d'investigation permet de cibler les questions relatives à la compréhension des relations entre forme et phénomènes physiques.

Face à une diversité formelle croissante de l'espace urbain, la mise en place d'un outil d'analyse nous paraît indispensable. La réflexion sur un modèle nous permettant la mise en relation des aspects géométriques et physiques thermiques, nous semble intéressante afin de répondre à nos questionnements principaux.

Dans ce qui suit, nous aborderons le cadre méthodologique relatif au choix du type de modèle, qui serait représentatif de nos préoccupations.

## **1.2 Éléments de réponse : développement d'une approche qualitative explicative**

Rappelons que, notre étude repose sur la définition d'une démarche qui permettra de mettre en évidence les relations entre phénomènes d'échanges thermiques et configuration urbaine. Toutefois, l'étude des phénomènes physiques en milieu urbain, se confronte à une complexité mettant en jeu un

certain nombre de facteurs et de paramètres, qui agissent de manière interdépendante. Généralement, le modèle physique demeurant une représentation conçue de la réalité, s'efforce de refléter cette complexité.

Notre position tente cependant, de développer un modèle physique qui serait basé sur la mise en exergue des éléments constitutifs d'une structure mettant en relation les aspects physiques des échanges et formels de l'urbain. Face à la complexité d'interaction de ces facteurs, la démarche proposée, veut rendre une structure complexe, plus compréhensible, en conciliant la représentativité spatiale de l'urbain et physique des phénomènes.

La conciliation est nécessaire, car les phénomènes ne se prêtent pas facilement à la compréhension, c'est-à-dire à la décomposition. En effet, Ils ne peuvent être observés, soit décomposés, seulement quelques paramètres sont mesurables.

Trois principaux types de modèles physiques peuvent être répertoriés. Le modèle *descriptif* qui tente de décrire une situation physique donnée, sans nécessairement expliquer les différentes manifestations physiques responsables des conditions observées. Le modèle *prédictif* lui, à partir d'un contexte proposé ou simulé, cherche à prédire les manifestations ou phénomènes.

Le prédictif concernera un environnement supposé qui se prête moins à la validation que le modèle descriptif. En effet ce dernier tente de refléter au mieux une réalité physique existante. La validation du modèle s'effectue par la comparaison des deux situations : réelle et simulée. Nicolas Bouleau (Bouleau 1999, p. 312) donne un exemple de comparaison entre le modèle descriptif et le modèle explicatif qui traite de feux de forêt :

- le modèle descriptif tente représenter le front de la flamme par une loi de propagation dont les vitesses sont liées au vent et ajuster ce modèle sur les observations d'incendies où le vent et la vitesse ont été mesurés.

- Le modèle explicatif prend en compte la physique du phénomène : énergie combustion en fonction du couvert végétal d'où une loi de propagation en fonction du vent par l'oxygène apporté.

Ce dernier modèle est considéré comme explicatif car il tente de montrer les relations entre un facteur physique donné ici le vent avec la vitesse de propagation de l'incendie. Le modèle descriptif tente de représenter une loi de propagation d'un incendie donné, sans pouvoir affirmer son applicabilité à d'autres situations. Cependant, ce dernier est plus près numériquement des données expérimentales, d'où la caractérisation du modèle descriptifs comme modèle quantitatif. Le modèle explicatif est considéré qualitatif, car il tente de transmettre une compréhension du phénomène (cf. fig.1.2).

Rappelons que notre problématique concerne la caractérisation thermique des espaces urbains. L'objectif visé est la compréhension des rapports existant entre les configurations spatiales et les ambiances thermiques.

L'orientation de notre étude vers une *approche explicative* est liée à la nécessité de compréhension des impacts thermiques de l'urbain. Les modèles explicatifs thermiques définissant des phénomènes climatiques à partir de paramètres physiques, tentent de mettre en relation les caractéristiques physiques de l'urbain (les énergies, les conductivités et absorptivités de parois, etc.) avec les températures extérieures et de surfaces. Une étude de sensibilité est possible à travers ce type de modèle. La compréhension de l'impact urbain que nous mettons en œuvre tente de *décomposer* et *évaluer leur influence* en mettant en relation environnements spécifiques (surfaces, ciel, etc.) de l'urbain aux caractéristiques physiques climatiques.

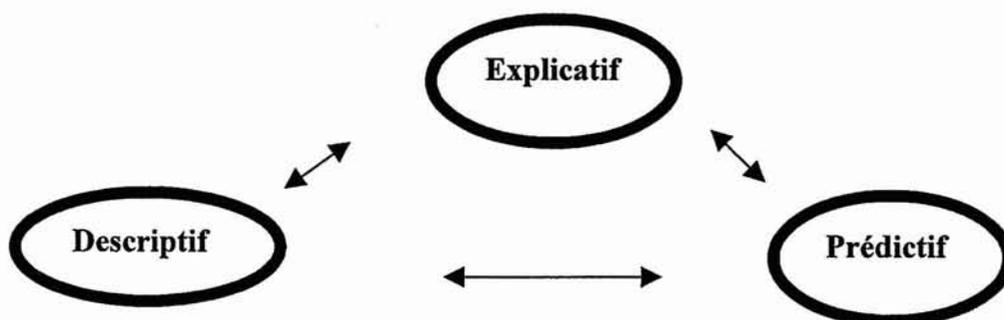


Figure 1.1 L'interdépendance des trois types de modèles : descriptif, prédictif et explicatif

Le modèle explicatif constitue donc une abstraction d'une réalité qui serait régie par la mise en exergue de relations pertinentes nécessaire à l'explication des phénomènes observés. La pertinence repose, pour nous, sur la mise en relation des éléments manipulés par le concepteur : la forme, le paysage, avec la lumière, la chaleur, etc.

L'approche explicative que nous pourrions nommer *qualitative* reposera sur la construction d'un modèle physique d'une abstraction telle qu'elle écarte la complexité de la réalité donnée au profit d'une compréhension des phénomènes d'impact que nous considérons important dans l'objectif d'étude de transformation de l'espace. Elle tente d'apporter des résultats d'ordre qualitatif plus que quantitatif qui seraient représentatifs des phénomènes d'impact observés.

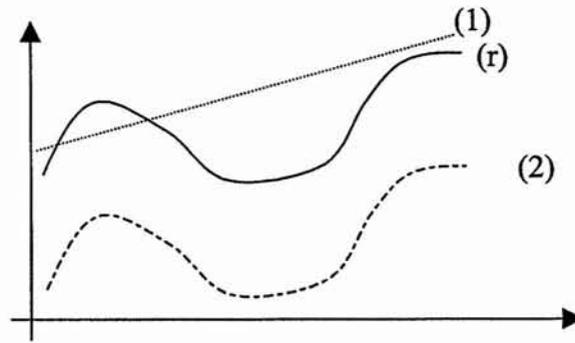


Figure 1.2. Représentation comparée des types de résultat de simulation de deux modèles : descriptifs (1) et explicatif (2) et leur positionnement par rapport à une situation mesurée (r) (Bouleau 1999).

L'objet de notre étude réside dans l'analyse du positionnement d'un type de facteur par rapport à un système physique et urbain complexe. Notre proposition doit permettre une vision synoptique qualitative de cette entité.

En effet, il s'agit d'aborder un système physique d'échange complexe, qu'il faudra décomposer, afin de permettre la mise en exergue des facteurs à observer. Cette décomposition ne doit pas exclure la possibilité d'analyse relationnelle des différents facteurs et donc permettre la recombinaison des facteurs et leur positionnement par rapport au système d'échange thermique global.

Ceci implique une double attitude, devant l'analyse des impacts ciblés. En premier lieu, la décomposition est nécessaire, car elle permet la reconnaissance des facteurs d'impact liés à la transformation spatiale d'une situation donnée. En deuxième lieu, la recombinaison permet de construire une vision synoptique du phénomène et cela par le repositionnement de chaque facteur par rapport aux impacts globaux analysés.

En dehors du type de lecture qu'implique cette démarche, la définition de descripteurs est essentielle à l'identification du phénomène observé. L'efficacité d'interprétation de ce dernier dépend de la pertinence des descripteurs à mettre en œuvre.

Nous aborderons de manière générale, les aspects physiques de décomposition et de recombinaison en partie développement du modèle (cf. §1.2.2.) et au chapitre 3 de manière plus précise.

Tout au long de ce rapport, nous aborderons les aspects relatifs à la construction du modèle : le développement du modèle explicatif et du cadre méthodologique des analyses que permet le modèle, la discussion de la pertinence de l'analyse et des descripteurs mis en œuvre, la discussion des limites d'une telle approche et les perspectives de développement.

Avant d'aborder notre interprétation spécifique de la démarche explicative, nous présenterons dans ce qui suit, les différents types de construction méthodologique des modèles d'analyse microclimatique urbaine.

### **1.2.1 Analyse thermique urbaine à partir des modèles descriptifs et explicatifs.**

Les modèles physiques climatiques ont fait l'objet d'une investigation. Ils sont basés sur l'écriture d'équations de bilans complexes et interdépendants dont les résultats découlent de la convergence de processus itératifs nécessaires à leur résolution. Les modèles numériques reposant sur des équations de bilans thermiques et thermo-aérauliques, n'ont pas fait l'objet de validation très poussée. En effet, la variation souvent imprévisible des conditions microclimatiques urbaines et leur complexité rendent leur développement plus difficile à résoudre. La majorité des modèles numériques aujourd'hui trouvent des applications sur des rues de type canyon de longueur infinie.

La question de la représentativité physique et spatiale des phénomènes microclimatiques n'a été que partiellement résolue. Ceci est dû à la complexité de la ville et à la variation temporelle et spatiale des phénomènes microclimatiques.

Les modèles numériques reposent sur deux types fondamentaux de représentation : *géométrique* exprimant le site et *physique* reposant sur la mise en relation de différents phénomènes convectif, radiatif et conductif. Les plus complexes tenteront de prendre en considération les milieux végétaux, l'humidité et d'estimer le confort en milieu extérieur. Les résultats de simulations peuvent être : les flux incidents, les températures de surface, les vitesses et la turbulence de l'air, les températures de l'air, et le niveau de confort extérieur, etc.

Parallèlement aux modèles explicatifs, quelques rares modèles descriptifs ont été développés, qui mettent en exergue contrairement aux précédents un nombre limité de facteurs.

Nous construisons notre approche d'analyse microclimatique à partir du développement d'un modèle physique. Dans ce cadre, il est possible de répertorier deux types d'approche d'analyse climatique urbaine :

#### **1.2.1.1 Analyse à partir de modèle physique complexe**

Cette analyse repose sur la modélisation et l'expression complexe des phénomènes observés. Elle s'appuie sur la comparaison de résultats de simulation, appliquée à des situations diversifiées. Par cette analyse, il est possible d'observer les phénomènes physiques à partir de l'étude de la variation d'un paramètre donné : étude de sensibilité. L'interprétation est souvent

difficile, mais cette observation permet de formuler des hypothèses et des axes d'investigation.

Le travail de Oke T.R. (1988) (cf. tableau 1.1) est très représentatif de ce type d'investigation. En effet, il effectua une synthèse de différents résultats de simulation. Ces derniers mettent en relation les variations proportionnelles de la rue canyon avec celle des conditions thermo-aérauliques et de la dispersion des polluants. Il compare trois facteurs : l'écoulement, la dispersion des polluants et l'accessibilité des rayonnements solaires avec l'intensité d'îlot de chaleur.

<b>La protection des vents</b>	H/W=0.65	Apporte une bonne protection du vent
	H/W=0.4	Induit une faible interférence d'écoulement
<b>Dispersion des polluants</b>	H/W=0.65, D=0.25	Induit une dispersion convenable des polluants
	H/W=0.5-2.0	L'absorption solaire est de 13-27%, quand l'albédo de surface est de 0.4
<b>L'accessibilité solaire</b>	H/W=0.58	Est approprié pour la latitude 45°
	H/W=0.4	Gain de chaleur est de 1/3 (par rapport à une situation de surface dégagée)
<b>Gain de chaleur</b>	H/W=0.7	Gain de chaleur est de ½
	H/W=1.0	Gain de chaleur est de 2/3

Tableau 1.1 Tableau synthétique des relations existantes entre proportions de la rue canyon et intensité d'îlot de chaleur. La rue canyon étudiée est semi-infinie, se trouvant à la latitude 45° Nord, orientée nord sud, les vents sont orientés à 30° par rapport à l'axe de la rue. (H : hauteur de rue, W : largeur de rue)

#### 1.2.1.2 Analyse reposant sur des expressions simplifiées

Cette analyse repose sur la modélisation simplifiée des phénomènes observés. Les modèles explicatifs ou descriptifs développés, analysent un aspect spécifique du phénomène physique étudié (ex. piégeage solaire, îlot de chaleur, etc.), cela grâce à des descripteurs. Souvent, ils apportent une vision partielle et s'efforce de ce fait d'être complémentaires avec les modèles descriptifs.

Ces modèles sont basés, pour la plupart, sur le développement d'expressions physiques simplifiées et d'indicateurs qui permettent la *description*, *l'analyse* des phénomènes thermiques climatiques.

Trois types d'indicateurs principaux peuvent être répertoriés : indicateurs solaires, thermo-aérauliques et de confort. Nous développerons ci-après de manière succincte quelques indicateurs, qui permettront de situer le cursus scientifique auquel nous nous référons.

### **Indicateurs solaires**

Les indicateurs solaires répertoriés sont essentiellement destinés à la compréhension du phénomène du piégeage solaire et des apports énergétiques solaires en milieu urbain.

Facteur d'ombre du sol :

Développé par H Swaid (1993), il définit la fraction d'ombre du sol et cela en prenant en compte l'orientation et les angles d'incidence solaire.

$$PSA = \frac{x}{W} = \frac{\cos \alpha}{\tan \beta} \left( \frac{H}{W} \right)$$

$$\text{avec } \alpha = \sin^{-1} \left( \frac{\cos \delta \sin t}{\cos \beta} \right)$$

(1.1) et (1.2)

- $\alpha$      azimut solaire
- $\beta$      hauteur solaire
- $\delta$      déclinaison solaire

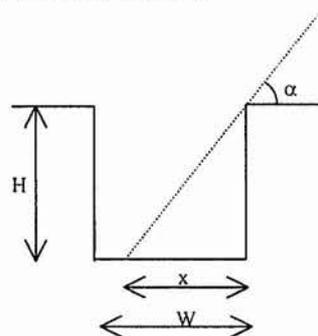


Figure 1.3 Schéma de coupe sur une rue canyon

Indices d'accessibilité solaire :

- J Arnfield (1990) définit le facteur d'accessibilité solaire comme égal au rapport entre l'énergie incidente sur une face ou une rue et la quantité de flux reçue dans une situation solaire équivalente par une surface horizontale et dégagée.
- Project ZED du *Martin Center for Architectural and urban studies* (Université de Cambridge, département d'Architecture). (Steemers et al. 1996) : qui a pour objectif la modélisation des caractéristiques environnementales des formes urbaines par la comparaison des flux énergétiques incidents sur les surfaces comparées dans des situations morphologiques différentes.

Indice de réflectivité solaire urbaine :

Exprime le rapport de la quantité d'énergie sortant d'un espace ou d'un fragment urbain donné par rapport à celle incidente. Il définit le piégeage solaire ; c'est-à-dire la quantité d'énergie non restituée à l'atmosphère.

Coefficient d'ensoleillement :

Représente le rapport entre surface ensoleillée et surface totale d'une face.

Coefficient de réduction de durée et énergétique (Hierry 1987) :

Le facteur de réduction de durée : exprime le rapport entre la différence de durée d'ensoleillement due à la présence de masque par rapport à la durée d'ensoleillement de la façade sans masque.

Même définition pour le facteur de réduction des apports énergétiques, appliquée aux énergies.

$$F_{red} = \frac{D_i - D'_i}{D_i} \cdot 100(\%) \quad (1.3)$$

L'extrapolation de l'expression pour toute une scène géométrique s'exprime comme suit :

$$F_{red\_total} = \frac{\sum_i S_i \cdot (D_i - D'_i)}{\sum_i S_i \cdot D_i} \cdot 100(\%) \quad (1.4)$$

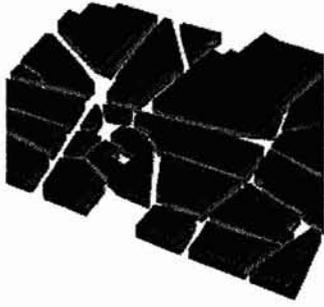
avec :

$S_i$  surface de chaque maille,

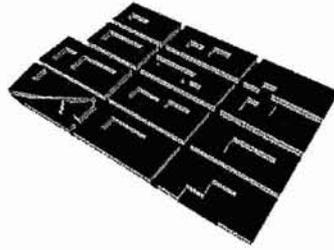
$D_i$  durée d'ensoleillement ou apport énergétique solaire de la face (i) en absence de masque.

$D'_i$  durée d'ensoleillement ou apport énergétique solaire de la face (i) en présence de masque.

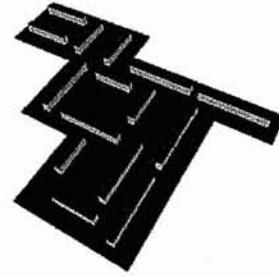
L'estimation des coefficients de réduction d'ombrage et d'apport énergétique a été effectuée et comparée sur des surfaces de trois tissus urbains, à morphologie contrastée (fig. 1.4). (Groleau et al. 1995)



Le quartier du Bouffay  
(Nantes)



Bastide Sainte Foy la Grande



Le Château de Rezé (Nantes)

Figure 1.4 Les trois tissus analysés par Groleau et al. (1995).

### ***Indicateurs thermiques et aérauliques***

#### Indicateurs aérauliques

Paramètre descriptif de la gêne due au vent (Gandemer et al. 1976) : échelle de Beaufort, fréquence d'inconfort, etc.

Paramètre descriptif des réductions de vitesse du vent dans la ville : rugosité urbaine.

#### Indicateurs thermiques

Suivant l'échelle à laquelle on se réfère, il existe deux types d'indicateurs. Les indicateurs d'îlots de chaleur qui ont pour objectif de comparer des situations thermiques entre ville et campagne ou entre fragments urbains. Et enfin les indicateurs d'espaces urbains qui ont pour objectif la caractérisation thermique d'un espace ou d'un point de vue physique ou de confort.

#### Indicateurs d'"îlot de chaleur"

Ce type d'indicateurs, pouvant exprimer l'intensité du phénomène d'îlot de chaleur dans un milieu urbain donné, a été le plus développé par les climatologues. Nous ne présenterons que quelques indicateurs importants :

- T. R. Oke (1988) développe un modèle descriptif par la mise en place d'une relation existante entre les propriétés d'une rue canyon et les écarts de température entre la ville et la campagne. Cette relation a été établie à partir de l'observation de plusieurs villes anglo-saxonnes (basées sur une structure d'îlots tramée).

$$\Delta T_{u,r}(\text{max}) = 7.54 + 3.6 \cdot \ln\left(\frac{H}{W}\right)$$

( 1.5)

$\Delta T_{u,r}$  différence de température entre la ville et la campagne.

$H$  hauteur de la rue

$W$  largeur de la rue

- Afin de prédire les écarts de température d'air entre une situation de départ (température station météorologique) et après transformations par les obstructions solaires, H. Swaid (1993) met en place un certain nombre d'indices dont le *CTTC* (*Cluster thermal Time Constant Parameter*). Il exprime l'inertie thermique d'un fragment urbain par rapport à sa forme :

$$CTTC = 8 \cdot \left( 1 - \frac{FA}{S} + \frac{WA}{SA} \right) \quad (1.6)$$

*FA* surface plancher

*WA* surface mur

*S* surface parcelle

Le *CTTC* permet d'estimer les différences de température de l'urbain dues à l'absorption solaire des surfaces, qui s'exprime comme suit :

$$\Delta T_{a,solar}(t) = \sum_{\lambda=0}^t \frac{m \Delta I_{pen}(\lambda)}{h} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t-\lambda}{CTTC}\right) \right) \quad (1.7)$$

*m* absorptivité solaire de surface

$\lambda, t$  temps

$\Delta I_{pen}(\lambda)$  rayonnement solaire incident sur les surfaces à temps ( $\lambda$ )

*h* coefficient d'échange convectif

- Iino A. et Hoyano A (1996) définissent l'indice *HIP* de potentiel d'îlot de chaleur (*Heat Island Potential*). Cet indice exprime l'intensité d'îlot de chaleur de différents fragments urbains.

$$HIP = \frac{\int_{all\ surfaces} (T_s - T_a) \cdot ds}{A} \quad (1.8)$$

*HIP* (*Heat island Potential*) indicateur du potentiel d'îlot de chaleur (C°)

*T<sub>a</sub>* température de l'air moyenne à l'échelle de la canopée urbaine (C°).

*T<sub>s</sub>* température de surface (C°)

*ds* surface d'un élément de face (m<sup>2</sup>)

*A* surface d'îlot (m<sup>2</sup>).

#### *Indicateurs thermiques d'espaces urbains*

Ce champ est très peu développé et constitue le domaine principal d'investigation en terme d'impact des bâtiments sur leur environnement immédiat et sur les ambiances en milieu extérieur.

#### *Indicateurs et indices de confort thermiques*

Ces recherches ont été plus développées en milieu intérieur qu'extérieur. En milieu extérieur, nous retrouvons les mêmes bilans physiologiques et indices.

Seulement, quelques particularités climatiques, sont prises en compte, elles sont plus ou moins négligées en milieux intérieurs : le rayonnement solaire, les échanges radiatifs entre le corps et son environnement et le vent. Les indices développés sont par exemple : le *OUT\_SET\** de Pickup (1999), le *PET* de Höppe (1999), le *PT* de Mayer (1998), etc.

Les travaux présentés ici sont les plus significatifs en terme de mise en relief des interactions entre les phénomènes physiques climatiques d'ambiances et la forme de l'espace. La majorité d'entre eux abordent les caractéristiques formelles de l'espace les plus élémentaires : largeur et hauteur de la rue.

Notons cependant les différents effets aérodynamiques définis par J. Gandemer et A.Guyot (1976) qui mettent en relief l'interaction de forme disposition urbaine et le comportement du vent. Cette mise en exergue de ces effets a pour objectif l'aide à la prise en compte des phénomènes d'inconfort dus au vent dans la conception urbaine.

Les indicateurs se présentant souvent sous forme de grandeurs numériques, sont plus à l'usage des scientifiques que des praticiens et décideurs. La plupart des indicateurs physiques sont utilisés afin de mettre en exergue des phénomènes physiques précis.

## **1.2.2 Développement d'un modèle d'analyse radiative thermique urbain**

Nous rappelons que les modèles descriptifs complexes donnent comme résultats des grandeurs physiques (ex. énergies, températures, etc.) sans pouvoir distinguer les différents facteurs impliqués dans la caractérisation thermique d'un lieu, et leur degré d'implication. Le modèle explicatif à développer tentera d'être complémentaire au descriptif, par la réponse à cette principale particularité : pouvoir évaluer et analyser les facteurs de caractérisation d'une situation thermique donnée.

### **1.2.2.1 Hypothèses relatives au modèle**

Trois hypothèses fondamentales sont inhérentes au modèle.

La première hypothèse soutenue est que les facteurs thermiques observés sont identifiés dans notre modèle en tant qu'impact de milieux influants. En effet, le climat urbain est déterminé par l'interaction entre différents milieux tels que les surfaces minérales, végétales (non traitées ici), avec le ciel et le soleil. Ces milieux possèdent des caractéristiques physiques, aussi bien propres que dépendantes de celles l'environnement.

L'objectif est de ramener les phénomènes physiques à un système relationnel reconnaissable par le concepteur, essentiellement identifié par ses caractéristiques formelles, faisant appel à des conditions thermiques

spécifiques. Des entités donc géométriques, mais qui impliquent un comportement thermique caractéristique.

La deuxième hypothèse soutenue est inhérente aux objectifs de notre modèle physique explicatif représentatif des impacts urbains. C'est-à-dire, qu'il ne s'agit pas de faire ressortir des grandeurs physiques exprimant un *état* mais un *changement d'état*. Ce dernier représente l'impact thermique urbain et que nous définirons par *influence*.

Les *influences* sont considérées comme perturbations thermiques d'un milieu urbain donné identifiées par rapport à une situation de référence. Ainsi est défini le degré d'influence, comme degré de perturbation ou de changement de condition thermique d'un environnement par rapport à une situation de référence. Le modèle reposera sur la comparaison de deux situations thermiques ; celle analysée comparée à une autre, que nous définirons comme référence. La situation de référence est spécifiée suivant le type d'impact radiatif étudié. Ce dernier sera présenté de manière plus précise au chapitre 4.

La troisième hypothèse soutenue, est liée au traitement des impacts thermiques, aussi bien de manière isolée que globale. Nous admettons une simplification de l'expression générale des interactions physiques thermiques, afin de permettre la construction d'un cadre méthodologique d'analyse reposant sur la décomposition et la recombinaison des manifestations responsables de la caractérisation thermique d'un espace.

$$\mu_k C_{pk} \frac{\partial T_{sk}}{\partial t} = \Phi_{conv} + \Phi_{cond} + \Phi_{solaire} + \Phi_{IR} \quad (1.9)$$

$\mu_k$	masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )
$C_p$	capacité calorifique (J/KgK)
$T_s$	température de surface (K)
$t$	temps (s)

Notre démarche sera fondée à partir de la déduction de l'expression physique classique (cf. équation 1.9) d'une nouvelle expression mettant en exergue l'influence du ciel, du soleil, de l'air et des surfaces (fig.1.5). Ainsi la nouvelle expression se formulera comme suit :

$$\text{Influence totale} = \text{Influence des surfaces} + \text{Influence du soleil} + \text{Influence du ciel} + \text{Influence de l'air}$$

Les relations physiques résultantes sont plus linéaires et moins complexes que celles de la première formulation (cf. équation 1.9). La linéarisation permet cette décomposition ou isolation des différentes manifestations physiques responsables des conditions climatiques extérieures. Elle permet également la recombinaison, c'est-à-dire, le repositionnement de ces différents facteurs par

rapport à une situation thermique générale. Cette approche d'analyse basée sur la comparaison de situations climatiques repose également sur la définition des caractéristiques physiques d'une situation donnée. En discussion, il est primordial de poser les questions relatives à la fidélité d'interprétation des impacts parallèlement à la validité du modèle utilisé.

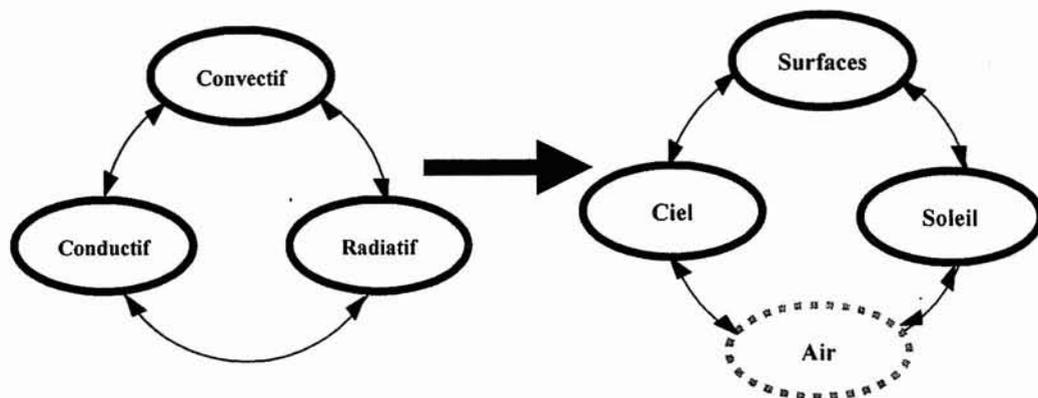


Figure 1.5 Etablissement d'un modèle explicatif basé sur une représentation type environnement plutôt que type échange.

La quatrième hypothèse soutenue, est liée à l'intention de limiter notre champ d'investigation aux aspects radiatifs thermiques. Nous ne considérerons pas l'influence du cadre bâti sur les échanges convectifs. Cette limitation est liée au souci de maîtrise des aspects radiatifs des impacts thermiques. Néanmoins, nous proposerons plus loin, les différentes évolutions à mettre en œuvre afin de considérer les impacts convectifs. Nous verrons que ces derniers reposeront principalement sur la définition de l'impact d'un bâtiment sur les écoulements d'air à son voisinage. Il s'agira de considérer cet aspect en présence de plusieurs éléments de constructions.

Ceci nous amène à considérer deux grands axes de recherche :

- La mise en exergue des différentes manifestations représentatives des influences thermiques : réfléchir ainsi sur la possibilité d'une description des rapports entre les caractéristiques formelles et physiques de l'espace urbain.
- Construction d'un modèle numérique représentatif du comportement thermique et définir son applicabilité sur un échantillonnage pertinent d'espaces urbains.

Dans l'analyse des ambiances climatiques, l'échelle de la ville ne constitue pas une dimension spatiale pertinente pour notre étude. L'échelle du piéton ou de l'utilisateur cadre bien notre champ de recherche. En effet, la généralisation de certains phénomènes ne peut pas rendre compte des particularités ambiantales d'un espace urbain.

Au **chapitre 3**, nous présenterons la démarche de construction du modèle explicatif dit *d'analyse des influences* et de manière plus détaillée les types d'analyse que le modèle proposé permet et le vocabulaire qui lui est associé. En effet, nous mettrons en relief des manifestations physiques spécifiques représentatives des impacts du cadre construit. Ces manifestations seront définies par une situation physique particulière et par des descripteurs qui les identifient.

Le cadre méthodologique de l'analyse sera également introduit. Il sera illustré et discuté de manière plus spécifique, à travers l'exemple de la place du Piloni présenté au **chapitre 4**. Nous verrons de manière plus concrète, ce que nous entendons par l'approche de décomposition/recomposition des différentes manifestations définissant l'impact. La complémentarité des modèles explicatifs et descriptifs, pourra également être observée, à travers cette analyse.

Un essai de généralisation sur les types d'interprétation physique et spatiale des impacts est présenté au **chapitre 5**. Il s'agira de définir la pertinence des éléments de caractérisation des impacts radiatifs thermiques. Des investigations plus théoriques appliquées à des configurations urbaines simples permettent d'illustrer cette caractérisation des impacts.

La construction d'une approche explicative à partir d'une reformulation simplifiée d'un système d'interaction physique complexe, n'est pas sans influence, sur le degré d'interprétabilité des résultats. Ceci fera l'objet de discussion au **chapitre 6**.

Avant d'aborder le modèle, nous tenterons de présenter, au **chapitre 2** qui suit, les types d'investigations microclimatiques, et les différents aspects climatiques physiques et perceptifs auxquels la ville est confrontée.

## Références bibliographiques du chapitre

- [Arnfield 1990] A.J. Arnfield  
Street design and urban canyon solar access /  
Energy and building vol.14 pp.117-131.
- [Bertrand 1980] M.J Bertrand  
Architecture de l'habitat urbain, la maison, le  
quartier, la ville, Paris : Dunod 230p.
- [Bonn et al. 1993] F. Bonn, G Rochon  
Précis de télédétection. Volume 1 : Principes et  
méthodes, Québec : Presse Universitaire du  
Québec 485p.
- [Borie et al. 1987] A. Borie, P. Micheloni, P. Pinon  
Analyse morphologique et composition  
architecturale, Paris : Ecole d'Architecture de  
Paris-la-Défense 83p.
- [Bouleau 1999] N. Bouleau  
Qualité et pragmatique des modèles. Ecole  
thématique : modélisation de la ville Nantes : 20-  
24 septembre 1999. Communication orale
- [Bouleau 1999] N. Bouleau  
Philosophies des mathématiques et de la  
modélisation. Du chercheur à l'ingénieur.Paris :  
l'Harmattan, 1999, 363 p.
- [Gandemer, Guyot 1976] J. Gandemer, A. Guyot  
Intégration du phénomène vent dans la conception  
du milieu bâti, Paris : Ministère de l'Equipement  
Direction de l'Aménagement Foncier et de  
l'Urbanisme 130p.
- [Groleau et al. 1995] D. Groleau, C. Marenne  
Environmental specificities of the urban built forms  
in: Rebuil-Rebuilding the European City.  
Integration of Renewable Energies in Established  
Urban Structures, Corfou, 29-30 Juil. [s.l] [s.n.]
- [Hierry 1987] P. Hierry  
Utilisation des techniques de synthèse d'image  
pour la visualisation des phénomènes solaires et  
énergétiques / Nantes : Ecole d'Architecture de  
Nantes 48p.
- [Höppe 1999] P. Höppe  
An universal index for the assessment of thermal  
environment. The physiological equivalent  
temperature PET in: Proceedings of the 15th  
International Congress of Biometeorology &  
International Conference on Urban Climatology,  
8-12 Nov. Sydney [CD-ROM]. Sydney : Macquarie  
University, 6p.
- [Iino et al. 1996] A. Iino, A. Hoyano  
Development of a method to predict the heat island  
potential using remote sensing and GIS data /  
Energy and Buildings vol.23 pp.199-205.
- [Mayer 1998] H. Mayer  
Human-Biometeorological assessment of urban

- microclimates according to the German VDI-Guideline 3787 part II, in : 2nd Symposium on urban environment, 2-6 nov. Albuquerque, New Mexico/ Boston MA (USA): American Meteorological Society, pp.136-139.
- [Merlin et al. 1988] P. Merlin, F. Choay  
Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement, Paris, Presses Universitaires de France 723p.
- [Merlin et al. 1988] P. Merlin, E. D'Alfonso, F. Choay  
Morphologie urbaine et parcellaire, Saint Denis : Presses Universitaires de Vincennes 292p.
- [Miguet 1996] F. Miguet  
Eclairages énergétiques et lumineux en milieu urbain / Nantes : Laboratoire CERMA 67p.
- [Norberg-Schulz 1979] C. Norberg-Schulz  
Système logique de l'architecture, Bruxelles : Pierre Mardaga 1979 301p.
- [Oke 1988] T. R. Oke  
Street design and urban canopy layer climate / Energy and Building vol.11 pp.103-113.
- [Pickup, De Dear 1999] J. Pickup, R. De Dear  
An outdoor thermal comfort index (OUT\_SET\*). Part I - The model and its assumptions, in : Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, 8-12 Nov. Sydney Australia [CD ROM]. Sydney: Macquarie University, 6p.
- [Pinon 1992] P. Pinon  
Composition urbaine. Tome 1: Repères, Paris : STU 1992 106p.
- [Rouleau 1967] B. Rouleau  
Le tracé des rues de Paris : Formation, typologie, fonctions, Paris : Editions du Centre National de la Recherche Scientifique 1967 129p.
- [Siret 1997] D. Siret  
Proposition pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural. Application à l'ensoleillement / Nantes : Université de Nantes 323p.  
Thèse en science pour l'ingénieur : option architecture
- [Steemers, Baker, Crowther et al. 1996] K. Steemers, N. Baker, D. Crowther et al.  
Project ZED: modeling environmental characteristics of urban forms, in : 4th European Conference on solar energy in architecture and urban planning, 26-29 Mar. Berlin, Germany 4-7p.
- [Swaid 1993] H. Swaid  
Urban climate effects of artificial heat sources and ground shadowing by buildings / International Journal of Climatology vol.13 797-812p.

[Woloszyn 1997]

P. Woloszyn  
Vers un simulateur des ambiances sonores  
urbaines / Acoustique et Technique vol.8 17-19p.

## Chapitre 2

### La ville et les phénomènes climatiques thermiques

*"... C'est que selon les philosophes, la joie et le contentement résultent de la dilatation et la diffusion de l'esprit animal. Inversement, la tristesse est due à la contraction et à la concentration de celui-ci. Or la chaleur diffuse et raréfie l'air et les vapeurs, qu'elle augmente... Les habitants des régions côtières ressemblent un peu aux méridionaux. Leur climat est beaucoup plus chaud, à cause de la réfraction de la lumière et des rayons solaires sur la surface de la mer. Ils ont donc plus de qualités dues à la chaleur – gaieté et légèreté – que les gens des pays froids et montagneux".*

*De l'influence du climat sur le caractère  
(Ibn Kheldûn 1377)*



Avant d'aborder notre proposition de recherche, nous tenterons de cerner au sein de ce chapitre les quatre points fondamentaux nécessaires à la compréhension de l'étude microclimatique urbaine, qui sont :

- l'évolution de la prise en compte de la contrainte climatique dans le projet architectural et urbain,
- la spécificité du microclimat urbain et les différents éléments constitutifs,
- les différentes méthodes d'investigation microclimatiques et leurs limites,
- le confort climatique thermique de l'utilisateur en milieu extérieur.

En premier lieu, nous tenterons de cerner la problématique de la prise en compte des phénomènes climatiques et son évolution à travers le temps. Le climat urbain fera l'objet d'une présentation plus poussée à travers la définition des phénomènes physiques le caractérisant. L'analyse microclimatique repose sur certains types d'investigation et sur des limites qu'il s'agira de positionner par rapport à notre choix d'étude. Nous soulèverons également, les questions relatives à la perception du confort thermique extérieur qui reste très peu exploré.

Il s'agira pour nous de cerner en dernier lieu les arguments spécifiques à notre travail et sa situation dans un contexte présentant un souci d'intégration sur les plans : de la recherche, de la pratique et de la perception de l'utilisateur.

## **2.1 Le microclimat et la conception urbaine**

Les différentes recherches entreprises par J.-P. Péneau (s.d.) sur l'ajustement climatique des villes à travers l'histoire, nous permettent de dresser une synthèse introductive aux préoccupations climatiques d'aujourd'hui.

La problématique de l'adaptation climatique de la ville apparaît dès l'antiquité et cela pour des raisons d'hygiène ou de rituels. Chez les Grecs, bien qu'on accordait à l'aspect religieux une grande importance dans l'organisation de la ville, les premiers soucis de protection contre les agressions climatiques semblaient se dessiner. Hippocrate (460-377 av. J.-C.) nota l'influence du climat sur le caractère et la santé. Les premières indications rejetaient les orientations au sud et préféraient l'orientation au soleil levant. D'autres indications suivront sur l'orientation et la largeur des rues par rapport aux vents, afin de permettre le renouvellement d'air. Les villes étaient souvent construites à partir d'une trame orthogonale, mais seulement certaines d'entre elles sont orientées exactement suivant les points cardinaux.

Vitruve (1<sup>er</sup> s. av. J.-C.) pour des raisons de salubrité, de santé et de commodité énonça quelques règles d'orientation et d'organisation des pièces d'habitation qui ne sont pas sans influence sur l'organisation de la ville. Les règles

d'organisation urbaine concernent principalement la protection des rues contre les vents forts et froids. Le souci d'amélioration des conditions d'ensoleillement des pièces d'habitation, en évitant les ombres portées par les façades avoisinantes apparaît également. Ces indications sont suivies par des prescriptions sur le choix du site d'implantation : choix d'un lieu salubre, aéré regardant un ciel tempéré (ni chaud, ni froid).

Les écrits de Vitruve continueront à influencer les arts de conception de la ville dans les siècles qui suivront. Les préoccupations esthétiques et de défenses se substitueront aux aspects religieux et de rituels. Le compromis entre l'aspect formel idéal de la ville et son adaptation climatique seront mis en exergue durant la période de la Renaissance. L.B. Alberti (1404-1472) présenta quelques prescriptions, en refusant la systématisation de l'expérience antique. La problématique d'adaptation climatique constituait pour lui l'amont de toute prescription. L'adaptation aux contraintes locales est une des exigences qui apparaît parallèlement à celle de l'esthétique de la ville. A. Palladio respectant les prescriptions de ces prédécesseurs, recommanda en 1570 d'opter, dans les pays froids et tempérés, pour des rues plus larges qu'en pays chauds.

La progression des maladies et leur fréquence en ville, ont incité à adopter une démarche de structuration hospitalière au siècle des lumières. Cette démarche tentait de répondre à une nouvelle politique de la santé basée sur les soins et la prévention. Les recherches scientifiques ont accentué sur le rapport entre les propagations épidémiques et le climat. Parallèlement au rôle de la médecine dans le contrôle de l'hygiène et de la salubrité, la création d'espaces urbains ouverts permettant la libre circulation de l'air, était la prescription fondamentale du moment.

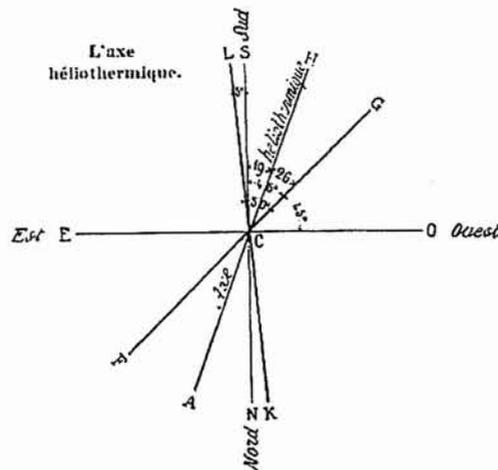


Figure 2.1 Axe héliothermique de A.Rey (Péneau s.d.)

Les prescriptions sur l'adaptation climatique de la ville resteront très sommaires et très peu argumentés, jusqu'aux développements techniques et scientifiques que connaît l'Europe à partir de la révolution industrielle.

Suites aux avancées scientifiques concernant la prolifération des maladies infectieuses, et leur relation aux densifications intensives des villes, les questions climatiques seront relancées.

Au 19<sup>e</sup> siècle, les préoccupations hygiénistes se sont développées avec plus de vigueur en Angleterre. Les industriels étaient soucieux de la conception de cités ouvrières saines, où les conditions de largeur de rue et les hauteurs de bâtiments seraient très strictes. Des cités jardins construites, sont caractérisées par des hauteurs de maison faibles et des espaces verts intégrés.

A la fin du 19<sup>e</sup>, l'art urbain avait pour objectif de concilier les exigences esthétiques (architecturales et urbaines) et les progrès techniques et sociaux.

En France, les préoccupations hygiénistes seront plus tardives, mais deviendront un enjeu majeur aussi bien pour les scientifiques que pour les industriels. Au-delà de l'orientation solaire, on commencera à se préoccuper de la qualité du rayonnement. Cette qualité sera recherchée en terme d'éclairage, d'apport calorifique et d'effets anti-bactériens.

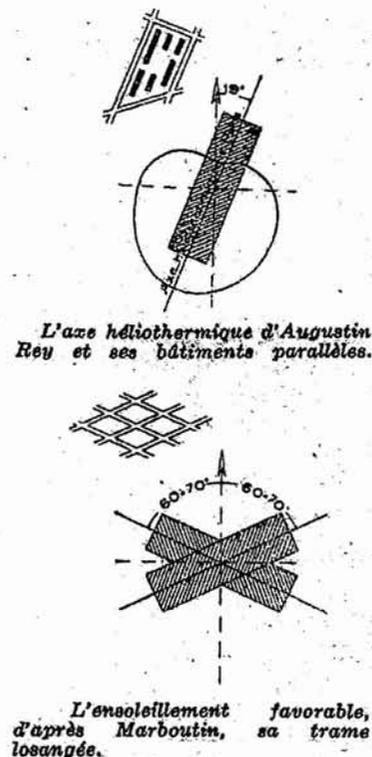


Figure 2.2 L'axe héliothermique de A. Rey et l'axe de meilleure insolation de F. Marboutin (Bardet 1943)

A. Rey, J. Pidoux (astronomes) et Ch. Barde (architecte) publièrent en 1928 "*la science des plans de villes*" (Péneau s.d.). Ils définirent un axe héliothermique qui concilie des préoccupations d'éclairage solaire (axe du méridien) et d'apport de chaleur (axe thermique : où la quantité de chaleur incidente est au maximum) (cf. fig.2.1). Cette orientation qui constitue la bissectrice de l'axe thermique et du méridien, permettrait d'avoir un équilibre des apports solaires et thermiques des faces d'habitation à orientation double. F. Marboutin (fig.2.2) définissait quant à lui, l'exposition favorable dès 1910 (Bardet 1943) selon un axe faisant angle entre  $60^{\circ}$ - $75^{\circ}$  avec le méridien pour la ville de Paris.

L'orientation définie selon ces auteurs permettait d'éviter le surchauffement l'été et le refroidissement l'hiver de l'habitation. L'intégration solaire et thermique de l'urbain reposa à l'époque essentiellement sur la recherche de *l'exposition favorable*, qui est définie par celle entraînant une atténuation de l'amplitude de variation d'ensoleillement annuelle.

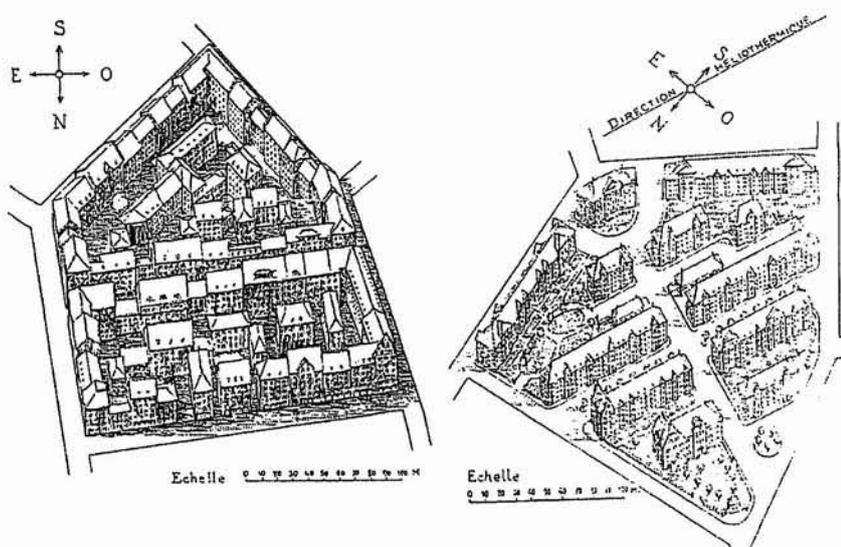


Figure 2.3. Disposition de bâtiments suivant la direction héliothermique d'après A Rey. (Péneau s.d.).

La venue des CIAM (Congrès International d'Architecture Moderne) contribua à définir les fondements de l'urbanisme moderne. Le soleil fut considéré comme un des principaux matériaux de l'urbanisme moderne. Un nombre d'heures minimal d'ensoleillement devait être respecté pour les espaces d'habitation.

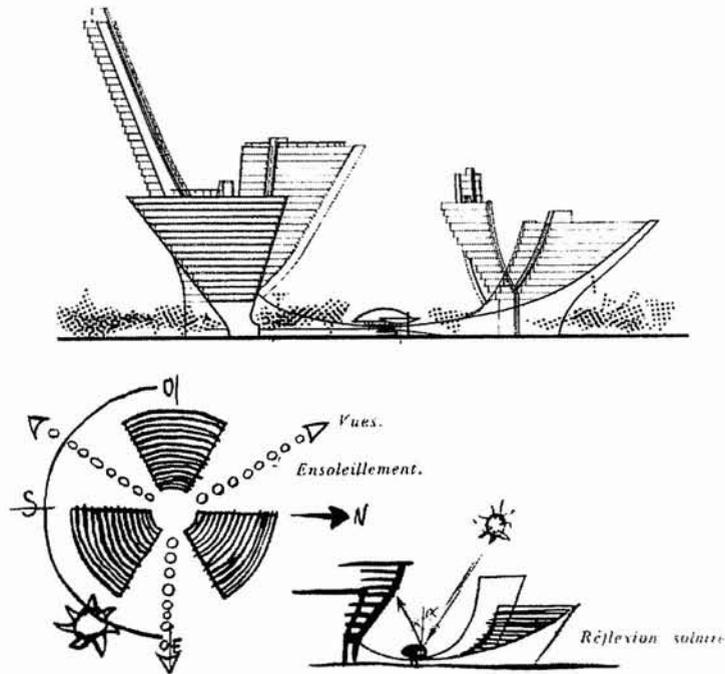


Figure 2.4 Etude d'architecture spatiale à forte concentration, architectes : L. Mirabaud et C. Parent (1962).

Deux facteurs historiques importants contribueront au délaissement de l'espace urbain au profit du confort intérieur. En premier lieu la crise énergétique, qui accéléra la recherche sur l'obtention de conditions de confort thermique intérieur avec le recours aux moyens passifs. Des règles de disposition et d'organisation sont à respecter afin de minimiser les consommations de chauffage (cf. fig.2.5). Le deuxième facteur est lié aux fondements de l'espace moderne qui substituèrent l'espace vert et libre à l'espace urbain.

Les crises de l'urbanisme moderne et de l'énergie participeront à la mise en place d'une dissymétrie très remarquable entre les avancées en terme de maîtrise du confort extérieur par rapport à celui de l'intérieur.

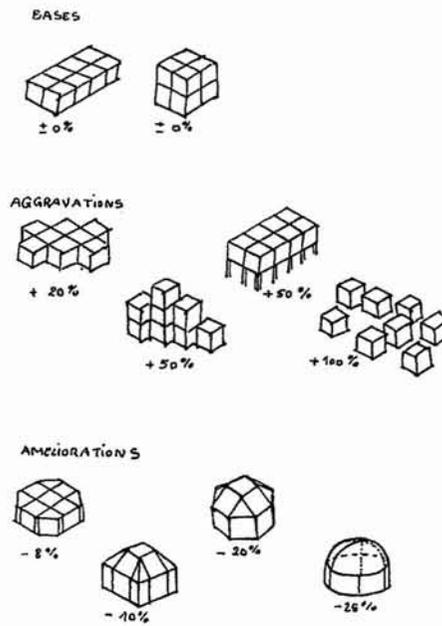


Figure 2.5 Variation des besoins de chauffage pour un même volume selon la forme du bâtiment, d'après J.P. Cordier (Auriault 1979).

L'architecture et l'urbanisme traditionnels sont souvent considérés comme des réponses passives de référence à l'intégration climatique. L'architecture et l'urbanisme vernaculaires du latin vernaculus (c'est-à-dire propre à une ethnie) sont souvent le fruit d'expérience et de collaboration de plusieurs personnes sur plusieurs générations. Cette construction basée sur l'expérience et l'expérimentation présente généralement un respect du site et du milieu naturel, donc une adaptation au microclimat local assez intéressante. A. Rapoport (Rapoport 1972) souligna cependant la nature modifiante du facteur climatique et non dominante sur les formes architecturales et urbaines. La recherche sur l'adaptation climatique des villes vernaculaires ne peut s'effectuer sans une détermination du rôle spécifique des facteurs sociaux et culturels. Quelques exemples d'adaptation climatique de l'habitat ont été présentés par cet auteur. Il opposa dans l'exemple présenté ci-dessous (cf. fig.2.6 & 2.7) les réponses formelles à l'adaptation climatique en zone de condition de chaleur sèche avec celle en zone de chaleur humide.

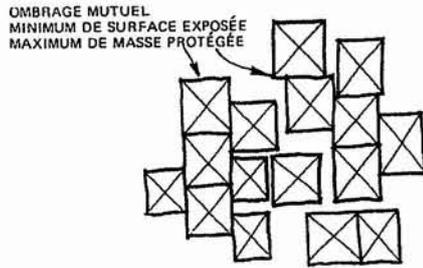


Figure 2.6 Schéma montrant une densité de bâti typique des climats chaud et sec (Rapport 1972).

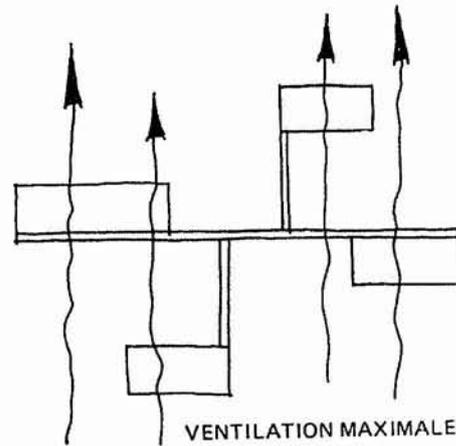


Figure 2.7 Schéma montrant une organisation bâti typique des climats chauds et humides (Rapport 1972).

La perturbation climatique urbaine soulève aujourd'hui un intérêt grandissant dû à la problématique de la crise écologique actuelle. L'homme transforme-t-il son climat ? Existe-t-il un réchauffement planétaire depuis la révolution industrielle ? Ces questions constituent les moteurs de recherche sur le rôle de la pollution et des villes dans la perturbation de l'écosystème planétaire.

La prise en compte des interactions entre ville et climat dans la conception et le développement urbain est loin d'être effective. Cependant, des procédures sont en cours de constitution, qui incitent à considérer les impacts environnementaux dans les projets urbains. Le terme impact est utilisé en signe de reconnaissance de l'implication de l'œuvre humaine dans la modification des conditions naturelles. Cette reconnaissance a donné lieu à l'adoption de la politique du développement durable lors de la conférence de Rio en 1992. Cette dernière définit le développement durable comme celui devant : *"répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre à leurs propres besoins"* extrait du rapport Brundtland de 1987 (Duport et al. s.d.).

L'adoption d'une attitude idéologique dite durable a permis le développement de démarches en vue de la prise en compte des impacts environnementaux dans les développements urbains et industriels. L'introduction de nouvelles politiques urbaines sur le plan national et international a poussé la relance des travaux sur la pathologie urbaine. Ces nouvelles politiques se traduisent par la prise en compte des impacts environnementaux dans l'approbation et l'évaluation de projets urbains et architecturaux pour certaines communautés adoptant cette attitude dite durable. Au sein de la communauté européenne, il est important de signaler l'apparition des agendas 21 locaux permettant de mettre en place des directives locales en vue de la prise en compte et de l'amélioration des conditions de la qualité de vie urbaine sur les plans :

écologique, social et économique, et cela de manière à assurer l'équilibre entre ces trois dimensions. Le développement durable vise une meilleure utilisation des ressources et de l'espace et cela aussi bien à l'échelle planétaire que locale et architecturale.

A l'échelle de l'espace architectural et urbain, il est important de noter l'apparition de labels identifiant la qualité environnementale du projet et qui prennent souvent forme de directives et de démarches assurant cette qualité. En France, ces directives environnementales apparaissent sous l'égide de la Haute Qualité Environnementale (HQE) qui permet la prise en compte des impacts du bâtiment non seulement sur l'environnement intérieur mais également extérieur et cela en termes de confort, de pollution et de respect de l'environnement.

La dimension climatique n'est pas absente dans les approches du développement durable, au contraire. Cependant, elle prend souvent une forme idéologique plutôt que prescriptive concrète. La gestion de la connaissance environnementale fait apparaître des tensions et des dysfonctionnements dans les relations élus – experts. Il a été constaté un besoin urgent d'éléments ou de boîtes à outils permettant la prise en compte des conditions d'environnement, notamment climatiques qui seraient à la fois, à la portée des décideurs et des experts.

L'architecture d'aujourd'hui tente de valoriser aussi bien l'intérieur que l'extérieur, pas seulement parce que ce dernier peut être une extension de l'habitation (cf. fig.2.8), mais aussi parcequ'il est considéré également comme un lieu de vie et d'interaction social et économique.

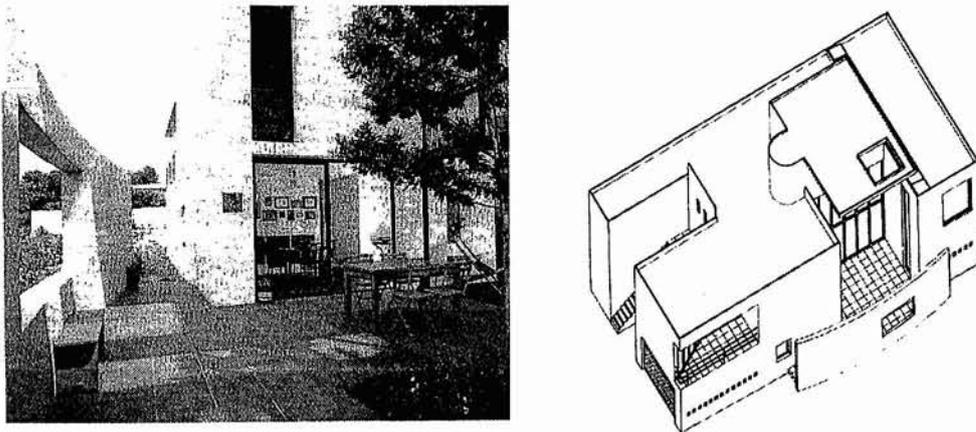


Figure 2.8 Une architecture créatrice de microclimat. Maison avec serre tropicale près de Montpellier (Hérault), architecte Jordi Battle (1992).

Au sein de la communauté scientifique, est observée une multiplication des travaux sur les villes en terme de pollution, de changement de conditions climatiques par rapport à la campagne et au milieu naturel. En réponse à la problématique du confort climatique en milieu extérieur, les solutions proposées se caractérisent souvent par :

- un retour vers la ville peu dense,

- l'usage et l'introduction de la végétation en milieu urbain (Chandler 1976),
- la référenciation à l'adaptation climatique de l'urbanisme vernaculaire (Escourrou 1991).

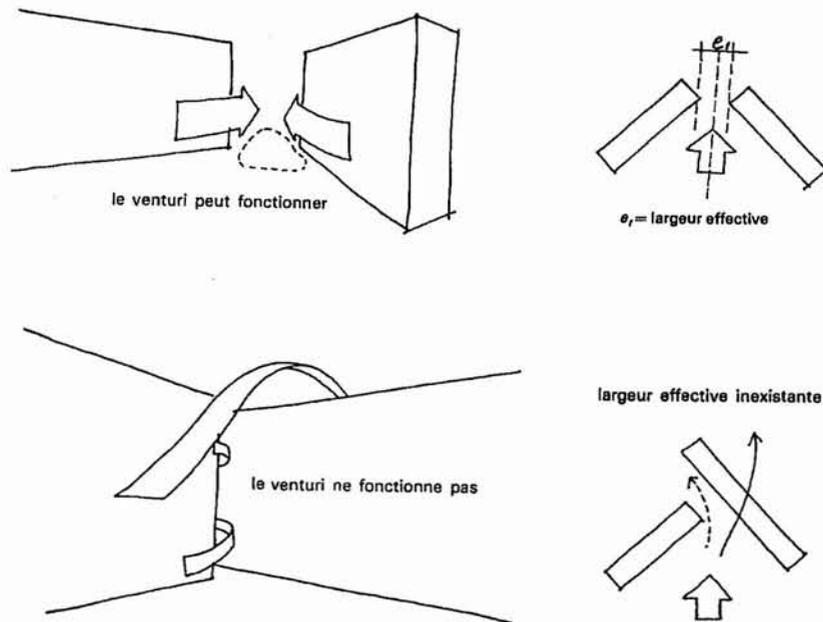


Figure 2.9 Effets aérodynamiques : effet de Venturi (Gandemer et al. 1976)

La recherche scientifique tente par le développement de modèles et d'observations de plus en plus complexes et précises de cerner les phénomènes climatiques urbains et cela à différentes échelles : espace urbain-agglomération – région. Seulement les deux dernières échelles, ont fait l'objet de recherche plus poussée. L'échelle de l'espace urbain se restreint à l'étude de la rue de type canyon.

L'observation des différences qui existent entre la ville et le milieu rural du point de vue énergétique et radiatif a une grande importance dans l'évaluation de l'influence de l'urbanisation sur le microclimat urbain. Des études tentent de mettre en place une connaissance scientifique nécessaire à la compréhension de la complexité des phénomènes observés.

Les aspects thermiques et radiatifs extérieurs restent très peu développés en terme de description d'effet et de prescription. Cependant, certains urbanistes et architectes sont sensibles à ces phénomènes. Robert Auzelle explique qu'en disposant des bâtiments en équerre convenablement implantés, on peut créer un microclimat élevant la température d'un lieu de 2° à 3° (1989).

Avant d'aborder la nature de ces travaux, il est nécessaire de présenter le vocabulaire et les facteurs inhérents aux phénomènes microclimatiques urbains.

## 2.2 Le microclimat urbain

Le microclimat urbain se révèle par les éléments constitutifs de la ville (les bâtiments, les places, etc.) et par les phénomènes physiques caractérisés par les échanges thermiques. En premier lieu seront présentés les différents phénomènes de transfert thermique, qui seront nécessaires à l'introduction des effets climatiques physiques spécifiques à la ville. En second lieu, nous aborderons les spécificités du microclimat urbain et les différents type de recherches effectués jusqu'à aujourd'hui. L'usager sera au cœur du débat sur le confort urbain dans la dernière partie consacrée à cet état de l'art. Nous tenterons de cerner de façon générale comment l'usager réagit aux phénomènes climatiques, et de manière plus poussée, aux phénomènes radiatifs thermiques.

### 2.2.1 Introduction aux transferts thermiques

Les phénomènes climatiques observés dans l'espace urbain sont liés à un certain nombre de phénomènes caractérisés par les transferts thermiques.

Le transfert de chaleur intervient naturellement entre deux systèmes dès qu'existe entre eux une différence de température, et cela quel que soit le milieu, même vide qui les sépare (Sacadura 1982).

A la base du transfert thermique, interviennent la quantité de chaleur (qui est une forme particulière de l'énergie) et la différence de température. Deux types de chaleur peuvent être distinguées selon le type d'influence qu'elle induit sur le corps concerné :

*La chaleur sensible* concerne la baisse ou l'élévation de la température d'un corps. La capacité d'absorption de la chaleur par un corps donné est exprimée par la chaleur massique ou la chaleur volumique ; c'est-à-dire par le rapport entre la quantité de chaleur et l'accroissement de température par masse (KJ/KgC) ou par volume (KJ/m<sup>3</sup>C).

*La chaleur latente* concerne le changement d'état de la matière ( par fusion, solidification, vaporisation ou condensation) à température constante, et qui implique une consommation d'énergie considérable.

Exemple de l'eau :

Fusion solidification		334 (KJ/Kg)
Vaporisation / condensation	20°C	2450 (KJ/Kg)
	30°C	2424 (KJ/Kg)

Trois grands modes de transfert de chaleur peuvent se distinguer par le processus physique qui les provoque.

L'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à l'énergie cinétique de ces constituants (atomes, molécules, etc.). Ceux-ci peuvent échanger une partie ou la totalité de leur énergie thermique, c'est-à-dire gagner ou perdre de l'énergie cinétique :

- soit par interaction directe avec les molécules voisines, ce qui correspond à la *conduction*,
- soit par absorption ou émission des radiations électromagnétiques, ce qui correspond au *rayonnement*,
- soit par mouvement de fluides à l'échelle macroscopique, dans le cas d'un gaz ou d'un liquide, qui correspond à la *convection*.

### 2.2.1.1 La conduction

La conduction nécessite un support matériel contrairement au rayonnement. La vitesse de propagation de la chaleur reste plus faible que celle du rayonnement. En maintenant les mêmes conditions pendant une durée assez longue nous aurons d'abord une étape transitoire dans laquelle le système est en évolution (régime variable dans le temps), ensuite un régime établi lorsque le système a trouvé sa stabilité (régime permanent). Les vibrations moléculaires se propagent de la zone la plus turbulente vers la moins turbulente (du plus chaud au plus froid).

Dans un milieu repéré en coordonnées cartésiennes, la quantité d'énergie traversant selon la direction  $\vec{n}$  (-1,0,0), un corps côté  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  s'écrit :

$$dE = -\lambda \cdot \text{grad}T \cdot \vec{n} \cdot dy \cdot dz \cdot dt \quad (2.1)$$

### 2.2.1.2 Le rayonnement

Le mouvement moléculaire est à l'origine de l'émission de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. La vitesse de propagation dépend du milieu où se propage l'onde. Les rayonnements émis dans le vide sont proches de ceux qui traversent l'air ambiant. L'air est transparent pour une large gamme de rayonnement, ce qui n'est pas le cas pour tous les gaz. Le rayonnement thermique est un phénomène de surface. Soit une surface  $\delta S$  qui rayonne une énergie  $\delta E$  pendant un temps  $\delta t$ .

$\delta E / \delta t = d\Phi(\lambda)$  est le flux énergétique rayonné dans une gamme d'onde électromagnétique ( $\lambda$ ).

Le rayonnement reçu sur une surface est soit :

- absorbé d'où le coefficient d'absorption  $\rho$ ,
- réfléchi d'où le coefficient de réflexion  $\alpha$ ,
- transmise à travers le matériau quand ce dernier n'est pas opaque, d'où le coefficient de transmission  $\tau$ .

### Le rayonnement et la géométrie

Considérons deux surfaces grises  $S_1$  et  $S_2$  (cf. fig.2.11) se trouvant dans un milieu matériel complètement transparent (non absorbant, non émissif),  $r$  étant la distance entre deux éléments de surface  $ds_1, ds_2$ .

$F_{12}$  est un nombre sans dimension représentant la fraction du flux total hémisphérique de la surface  $S_1$  qui atteint  $S_2$  (Sacadura 1982), où :

$$E_{12} = F_{12} \cdot E_1 \quad (2.2)$$

$E_{12}$  flux émis par  $S_1$  qui atteint  $S_2$  (s'exprime en Watt).

$E_1$  flux total émis par  $S_1$  (s'exprime en Watt).

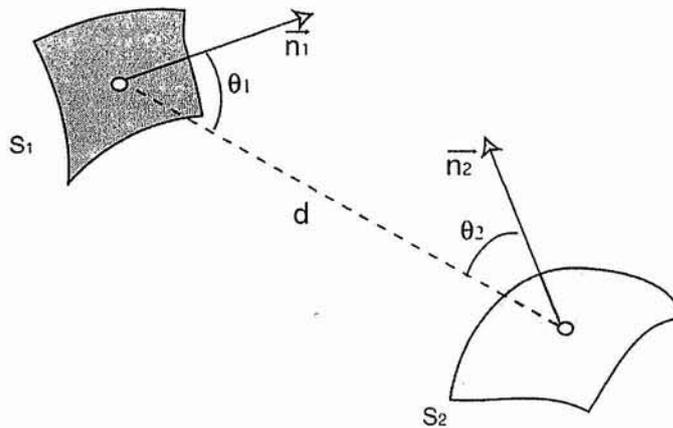


Figure 2.10 Echange de chaleur par rayonnement entre deux faces.

L'expression mathématique du facteur de forme  $F_{12}$  est :

$$F_{12} = \frac{1}{S_1} \iint_{S_1 S_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \cdot ds_1 \cdot ds_2}{\pi \cdot r^2} \quad (2.3)$$

où :

- $\theta_1$  et  $\theta_2$  angles entre les faces et leurs normales.
- $r$  distance entre les deux faces.
- $S_1$  surface de la face calculée.

$F_{12}$  appelé facteur de forme, dépend de l'orientation relative des surfaces et de leur distance. Ce facteur introduit la dimension géométrique des surfaces soumises aux échanges par rayonnement.

Nous pouvons exprimer le flux émis par  $S_1$  et atteignant  $S_2$  également comme suit :

$$E_{12} = F_{21} \cdot \frac{S_2}{S_1} \cdot E_1 \quad (2.4)$$

Soit,

$$\Phi_{12} = F_{21} \cdot \Phi_1, \quad (2.5)$$

et cela en considérant la loi de réciprocité :

$$F_{12} \cdot S_1 = F_{21} \cdot S_2 \quad (2.6)$$

$\Phi_{12}$  et  $\Phi_1$  s'expriment en ( $\text{Wm}^{-2}$ )

Le rayonnement se caractérise à la fois par la lumière et la chaleur. On distingue deux gammes de rayonnement :

Le rayonnement thermique de grande longueur d'onde (GLO) ou rayonnement thermique, dont la bande de fréquence est comprise entre 5 et 100  $\mu\text{m}$ . Ce rayonnement est émis et absorbé par tout corps à une température absolue de l'ordre de 300K ceci correspond aux transferts de chaleur dans les conditions d'ambiance naturelles. Au niveau des surfaces des parois, plus de la moitié de la puissance est échangée de cette manière.

Le rayonnement de courte longueur d'onde (CLO) est le rayonnement visible ou proche infrarouge dont la bande spectrale est comprise entre 0.4 et 1.5  $\mu\text{m}$ .

### ***Le rayonnement et le matériau***

Nous avons 4 grands groupes de matériaux opaques qui ont un comportement spécifique du point de vue du rayonnement :

- *les corps noirs* : ( les matériaux de construction en général) absorbent le rayonnement solaire et émettent beaucoup en infrarouge.
- *les anticorps noirs* : absorbent peu en solaire et émettent très peu d'énergie infrarouge.
- *les corps sélectifs froids* (ex. les métaux) : absorbent très peu (ou réfléchissent beaucoup) en solaire, mais émettent énormément en I.R.
- *les corps sélectifs chauds* (ex. surfaces galvanisées ou oxydées) : absorbent beaucoup (réfléchissent peu) en solaire et émettent très peu d'énergie infrarouge.

Pour les corps transparents (ex. le verre) : Ils sont transparents pour les courtes longueurs d'onde (suivant l'angle d'incidence des rayonnements) et pratiquement opaques pour les grandes longueurs d'onde.

La conservation de l'énergie impose que  $\alpha + \rho + \tau = 1$

- $\tau$  *transmittivité* : fraction d'énergie transmise par la surface ; caractéristique des surfaces transparentes.
- $\rho$  *absorptivité* : fraction d'énergie absorbée par la surface.

-  $\alpha$  *réflectivité* : fraction d'énergie réfléchie par la surface.

Pour les parois opaques, la transmittivité est nulle. L'émissivité de la paroi est égale à son absorptivité.

Les rayonnements peuvent être émis de manière monochromatique (par une seule longueur d'onde) ou multichromatique (par plusieurs longueurs d'ondes), directionnelle (spéculaire) pour les verres et les métaux polis par exemple, ou hémisphérique diffuse pour les surface dites Lambertienne.

### ***Le rayonnement et l'air***

L'air atmosphérique n'absorbe les rayonnements infrarouges que dans des bandes d'absorption de certains de ses composants que sont la teneur de vapeur d'eau en premier lieu, puis les gaz carboniques, etc. La vapeur d'eau affecte le rayonnement essentiellement en grande longueur d'onde, elle présente une très forte absorption pour une longueur d'onde comprise entre 5 et 8  $\mu\text{m}$  et une transparence parfaite entre 8.5 et 13  $\mu\text{m}$ . On considère le plus souvent que l'air ambiant d'une pièce et celui entourant un bâtiment est transparent à l'infrarouge. Mais cette considération n'est plus valable pour les épaisseurs atmosphériques importantes.

Pour le ciel les bandes d'absorption sont les couches basses de l'atmosphère qui fournissent le rayonnement reçu au sol et ce rayonnement se fait à une température très proche de celle de l'air ambiant. Par ciel couvert, les nuages occultent les couches supérieures froides de l'atmosphère et le rayonnement reçu provient de l'émission des nuages. Si les nuages sont assez bas, le rayonnement thermique est en majeure partie celui émis par le sol et rediffusé par les nuages. Ainsi, par temps couvert, plus les couches nuageuses sont basses, plus la température radiative du ciel se rapproche de celle du sol.

#### 2.2.1.3 La convection

La convection est un problème de conduction dans un milieu en mouvement où un transfert de masse est associé aux transferts de chaleur. (Hernot et al. 1984).

*La convection naturelle* est due aux mouvements de fluide résultant des différences de température du milieu. Le fluide chauffé ou refroidi au voisinage de la surface induit une variation de sa masse volumique par rapport à celle du fluide environnant. La poussée d'Archimède fait monter ou descendre le fluide le long de la paroi.

Les grandeurs relatives aux fluides qui interviennent dans ce type d'échange sont :

- $h$  coefficient d'échange ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )
- $\rho$  masse volumique ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
- $\nu$  viscosité ( $\text{Kg}/\text{ms}$ )
- $\lambda$  conductivité ( $\text{W}/\text{mK}$ )

$C_p$  chaleur massique ( J/KgK)  
l'emplacement et la géométrie de l'élément considéré

Les variables définissant le mouvement naturel du fluide sont :

- $g$  L'accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ )
- $\chi$  Le coefficient de dilatation volumique à pression constante du fluide ( $K^{-1}$ )
- $\Delta T$  Les écarts de température entre celle du fluide et de la surface (K). Plus cet écart est grand plus les mouvements sont importants.

*La convection forcée* est due au mouvement du fluide imposé par une force extérieure : le vent par exemple dans un espace urbain, ou encore la ventilation dans un environnement intérieur.

La couche limite est considérée comme une zone de mouvement en filets parallèles à la surface qui est limitée à une zone de turbulence aléatoire proche de la paroi. L'épaisseur de cette zone turbulente dépend de :

- $\nu$  la viscosité du fluide (Kg/m.s)
- $vm$  la vitesse moyenne (m/s)
- la géométrie de l'élément considéré (ex. D diamètre d'un conduit).

Les équations d'échanges convectifs introduisent quatre principaux nombres :

Nombre de Grashof : 
$$Gr = \frac{\chi \cdot g \cdot \Delta T \cdot \rho^2 \cdot D^3}{\nu} \tag{2.7}$$

Nombre de Reynolds : 
$$Re = \frac{vm D \rho}{\nu} \tag{2.8}$$

Nombre de Prandtl : 
$$Pr = \frac{\nu \cdot C_p}{\lambda} \tag{2.9}$$

Nombre de Nusselt : 
$$Nu = \frac{h \cdot D}{\lambda} \tag{2.10}$$

Où (Hernot et al. 1984) :  
 $f(Gr, Pr) = Nu$  pour la convection naturelle (2.11)

$f(Re, Pr, Nu) = 0$  pour la convection forcée (2.12)

La convection présente un problème de définition des coefficients de transfert convectif. Ils sont estimés par plusieurs auteurs (Pignolet 1996) et leurs expressions peuvent induire des différences numériques assez remarquables entre elles. Les valeurs du coefficient d'échange convectif extérieur ont été

estimées par des études expérimentales en espace libre ; c'est-à-dire qu'aucune surface ne vient gêner la circulation du fluide au voisinage de la surface observée. Ces estimations ont été considérées proches de la réalité. Le coefficient d'échange extérieur présenté par les règles DTU (Document Technique Unifié- Règles TH-K 97) englobe trois modes d'échanges : convection naturelle, convection forcée et échanges radiatifs. Les échanges radiatifs considérés sont dus à l'émission infrarouge du ciel, du sol et des surfaces environnantes. (L'air supposé complètement transparent en infrarouge).

### 2.2.2 Le rayonnement solaire

L'énergie solaire est l'un des facteurs les plus importants définissant les caractéristiques climatiques thermiques des espaces urbains. Le rôle que joue le rayonnement solaire dans les effets microclimatiques urbains sera présenté de manière plus détaillée plus loin. Dans cette partie, nous aborderons de manière synthétique les caractéristiques propres à ce rayonnement.

L'énergie solaire reçue par la Terre, à la limite supérieure de l'atmosphère (soit à environ 80 km d'altitude), est estimée à  $1380 \text{ W/m}^2$  (De Blichambaut et al. 1974) . Cette valeur appelée constante solaire, correspond à l'énergie reçue sur une surface perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil moyenne.

Le rayonnement solaire extraterrestre est composé de :

- 8 % ultraviolet
- 41 % visible
- 51 % infrarouge

98 % de l'énergie est rayonnée entre deux valeurs de longueurs d'onde  $0,25$  à  $4 \mu\text{m}$  . Cette énergie est en partie renvoyée vers l'espace et en partie absorbée par la terre.

Un tiers du flux solaire arrivé à la limite de l'atmosphère terrestre est *renvoyé* vers l'espace. Deux tiers sont *absorbés* par l'hémisphère éclairé et après avoir donné lieu à diverses transformations thermodynamiques, sont rendus à l'espace sous forme dégradée de rayonnements infrarouges de la planète.

*A la traversée de l'atmosphère*, le rayonnement solaire est soit :

- diffusé par les molécules gazeuses ou par les particules en suspension
- absorbé par certains gaz ou certaines particules
- transmis directement.

Par suite de la diffusion, une partie du rayonnement est renvoyée vers l'espace, une autre est envoyée vers le sol et constitue le rayonnement diffus. La partie absorbée par l'atmosphère conduit à un échauffement de celle-ci.

A son arrivée au sol, le rayonnement est soit :

- réfléchi ou diffusé
- absorbé.

La partie réfléchie est renvoyée vers l'espace (une partie est absorbée au passage par l'atmosphère). La partie absorbée par le sol et les océans provoque un échauffement et une évaporation importante des eaux de surface.

L'énergie incidente qui a été absorbée, contribue à réchauffer l'atmosphère et le sol. Ceux-ci réémettent de l'énergie sous forme de rayonnement infrarouge de longueur d'onde comprise entre 5 et 100  $\mu\text{m}$ .

#### 2.2.2.1 Rayonnement direct- rayonnement diffus

L'énergie solaire diffuse et directe atteignant une surface est fortement soumise à des lois astronomiques et géométriques faisant intervenir :

- la latitude du lieu,
- la déclinaison solaire,
- l'heure du jour
- l'orientation et l'inclinaison de la surface.

Elle est soumise aux caractéristiques de la couche atmosphérique traversée : les gaz et teneurs en vapeur d'eau, etc. Ainsi l'énergie solaire atteint le sol de deux manières : directe, et diffusée par l'atmosphère.

Après avoir traversé l'atmosphère, le rayonnement solaire arrive au sol où il produit un éclaircissement qui est une densité de puissance incidente et s'exprime en  $\text{W}/\text{m}^2$ . L'énergie correspondante reçue pendant une durée déterminée (heure, jour, mois, année) est égale à l'intégrale de cet éclaircissement pendant le temps correspondant. On l'appelle aussi irradiation et on l'exprime en  $\text{Wh}/\text{m}^2$  ou en  $\text{J}/\text{cm}^2$ . Une partie du rayonnement provient directement du disque solaire (pendant les seules périodes d'ensoleillement). On l'appelle rayonnement direct. Une partie du rayonnement solaire qui provient de la demi-sphère vue par la surface réceptrice, à l'exception du disque solaire, est le rayonnement diffus. Cette demi-sphère comprend le ciel qui peut avoir des conditions claires ou nuageuses. Ces dernières peuvent prendre des formes diverses : des conditions nuageuses épaisses, faiblement denses, etc.

La plupart des modèles d'estimation des flux diffus utilisés, est d'ordre statistique. Ces modèles permettent de tenir compte des conditions les plus diverses du ciel, pouvant induire une répartition de l'énergie solaire céleste non-homogène (Miguet 1995).

Le rayonnement global regroupant le direct et le diffus est compris entre 0,25 et 5  $\mu\text{m}$  du spectre solaire.

#### 2.2.2.2 Les coordonnées astronomiques

Le soleil est caractérisé spatialement et temporellement par un certain nombre de coordonnées qui sont :

- *La déclinaison de la terre* est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre.

- *Les coordonnées angulaires du soleil* dépendent de la déclinaison de la terre comprise entre  $-23^{\circ}27'$  et  $23^{\circ}27'$ , et qui varie selon la date et l'angle horaire du soleil lié au temps solaire vrai compris entre  $180^{\circ}$  et  $-180^{\circ}$ . La déclinaison angulaire de la terre varie de manière presque sinusoïdale en fonction de la date de l'année.

Aux équinoxes (21 mars et 23 septembre) correspond une déclinaison nulle.

Aux solstices correspondent des valeurs extrêmes de déclinaison :  $23^{\circ}27'$  au solstice d'été : ( $-23^{\circ}27'$ ).

L'excentricité de la trajectoire elliptique de la terre autour du soleil entraîne des légères inégalités des durées des saisons. La déclinaison peut être considérée uniforme par la relation  $\sin \delta = 0,4 \cdot \sin t$ , où  $t$  correspond au nombre de jours écoulés depuis l'équinoxe de printemps multiplié par le facteur correctif 360/365.

- *Angle horaire AH* est déterminé par la rotation de la terre autour de son axe. L'angle est de  $0^{\circ}$  au plan méridien d'un lieu qui correspond au midi, heure solaire vraie. L'intervalle de temps entre deux passages successifs est de 24 heures. En une heure, le passage se traduit par un écart de  $15^{\circ}$  en angle horaire.

- *Hauteur angulaire du soleil*

Le calcul de la hauteur du soleil s'effectue comme suit :

$$\sin h = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos AH \quad (2.13)$$

$\varphi$  la latitude du lieu

$\delta$  la déclinaison du soleil (comprise entre  $+23^{\circ}27'$ ,  $-23^{\circ}27'$ )

$AH$  l'angle horaire du soleil.

La hauteur maximale du soleil lors de son passage au méridien est :

$$h_{\max} = 90^{\circ} - \varphi + \delta \quad (2.14)$$

- *Azimut du soleil*

L'azimut est l'angle formé entre la direction sud et la position est-ouest du soleil. L'azimut est égal à  $0^{\circ}$  quand le soleil est au sud,  $-90^{\circ}$  à l'est et  $+90^{\circ}$  à l'ouest.

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin AH}{\cosh} \quad (2.15)$$

$h$  la hauteur angulaire au-dessus de l'horizon.

$a$  l'azimut du soleil

### 2.2.2.3 Les aspects géométriques du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire direct et diffus incident est fortement soumis aux hauteurs angulaires du soleil et à l'orientation de la surface réceptrice.

L'expression du rayonnement direct ( $S$ ) incident par rapport au flux solaire ( $I$ ) est :

$$S(i, sud) = I (\cosh \sin i \cos a + \sinh \cos i) \quad (2.16)$$

$i$  l'angle formé par la normale au plan récepteur avec la verticale

<p>Pour un plan horizontal :</p> $S = I \cos \alpha \quad (2.17)$
<p>Plan incliné sur l'horizontale et orienté vers le sud :</p> $\alpha = 90^\circ - h \text{ soit } S = I \sin h \quad (2.18)$
<p>Plan vertical orienté vers le sud :</p> $S(90, sud) = I \cosh \cos a \quad (2.19)$
<p>Plan vertical d'orientation quelconque :</p> $S(90, \gamma) = I \cosh \cos(a - \gamma) \quad (2.20)$ <p><math>\gamma</math> étant l'angle formé par la normale au récepteur avec le plan méridien. On a <math>\gamma = -45^\circ</math> pour une façade sud-est, <math>\gamma = 90^\circ</math> pour une façade ouest.</p>
<p>Plan d'orientation et d'inclinaison quelconque :</p> $S(i, \gamma) = I [\cosh \sin i \cos(a - \gamma) + \sinh \cos i] \quad (2.21)$

Tableau 2.1 Estimation du flux solaire incident suivant l'orientation de la face réceptrice.

La répartition angulaire de l'énergie du ciel dépend de la hauteur du soleil, du coefficient de trouble de diffusion atmosphérique (moléculaires, en présence d'aérosols, de gouttelettes ou de cristaux de nuages). Lorsque le ciel est clair, la luminance de ce dernier n'est pas uniforme et se concentre autour de la couronne solaire.

Cette anisotropie donne lieu à des modèles de ciel complexes. L'hypothèse de l'isotropie permet de simplifier l'estimation de l'énergie diffuse qui peut aboutir à des résultats vraisemblables pour des conditions du ciel très nuageuses ou pour l'émission infrarouge du ciel. Cependant, cette hypothèse est difficilement applicable à un ciel clair.

La même remarque peut être appliquée au rayonnement solaire direct, qui subit des atténuations avec l'augmentation des troubles de diffusion atmosphérique. L'expression de la diffusion céleste ( $D$ ) isotrope des flux solaires peut être définie comme suit (De Blichambaut 1975) :

$$D=125.(\sinh)^{0.4} \quad (2.22)$$

$D$  est multiplié par 4/3 pour des conditions de ciel clair et par 3/4 pour des conditions de ciel pollué.

Plusieurs modèles de ciel et de soleil ont été déterminés pour des conditions de ciel serein, couvert ou tous temps que nous n'aborderons pas ici. Ces derniers sont présentés de manière plus exhaustive par F. Miguet (1995).

L'émission infrarouge du ciel est déterminée par :  $L \downarrow = \varepsilon_{ciel} \sigma T_s^4$  (2.23)

$\varepsilon_s$  émissivité du ciel  
 $T_s$  température équivalente du ciel.

$T_s$  est difficile à déterminer. L'émission infrarouge du ciel ( $W/m^2$ ) se trouve généralement exprimée en fonction de la température de l'air au voisinage du sol ( $T_{air}$ ) et d'une émissivité dépendante de la pression de vapeur d'eau ( $e$ ).

Dans le cas d'un ciel clair il est possible de retenir les expressions suivantes (Noilhan 1980) :

$$L \downarrow = (0.82 - 0.25 \cdot 10^{-0.07e}) \sigma T_{air}^4 \quad \text{Angström (1933)} \quad (2.24)$$

$$L \downarrow = (0.56 - 0.08 \sqrt{e}) \sigma T_{air}^4 \quad \text{Brunt (1933)} \quad (2.25)$$

$$L \downarrow = 5.5 T_{air} + 213 \quad \text{Unsworth et Monteith (1975)} \quad (2.26)$$

### 2.2.3 Les échelles des manifestations microclimatiques

Les phénomènes climatiques se définissent suivant l'échelle spatiale et temporelle de leur manifestation. La plupart des classifications des échelles climatiques selon Oke T.R. (1987), se caractérisent de manière spatiale de la façon suivante :

Echelle micro	$10^{-2}$ à $10^3$ m
Echelle locale	$10^2$ à $5 \cdot 10^4$ m
Echelle méso	$10^4$ à $2 \cdot 10^5$ m
Echelle macro	$10^5$ à $10^8$ m

La troisième dimension spatiale est définie par rapport à l'échelle d'interaction entre la surface et l'atmosphère qui est effective sous la troposphère, c'est-à-dire à 10 km d'épaisseur au dessus du sol.

Sous cette couche, d'autres sous-couches limites peuvent être définies, nous pouvons en noter trois principales :

- la couche limite atmosphérique qui accuse des variations journalières,
- la couche de rugosité urbaine dont la hauteur peut s'étendre jusqu'à 50m. Elle est définie à partir du sommet des éléments bâtis jusqu'à trois fois leur hauteur. Ces deux variations s'effectuent dans le court terme.
- la couche de turbulence ou de rugosité de surface se situe très près des surfaces. Elle se caractérise par l'aspect tridimensionnel des échanges. Les variations temporelles de cette dernière se définissent dans le très court terme.

L'observation des phénomènes microclimatiques caractéristiques de l'espace urbain s'effectue à une échelle spatiale et temporelle, qui est l'échelle micro. Cette échelle accuse généralement des plages temporelles de variation de bilan qui sont inférieures à une journée, et une échelle spatiale restreinte.

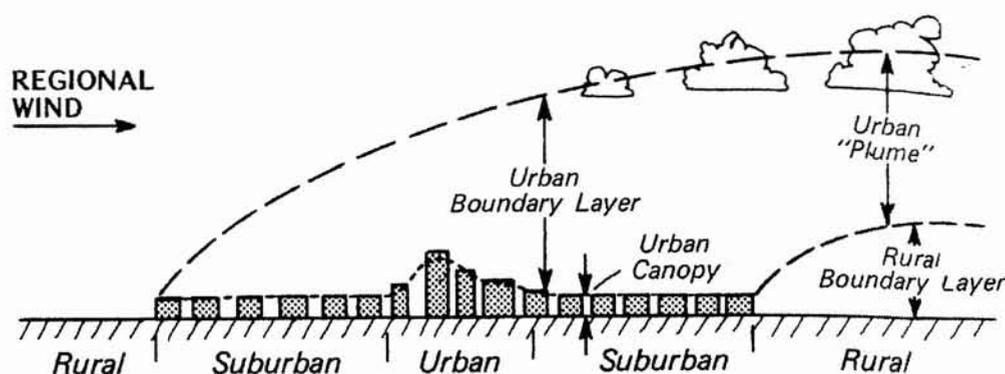


Figure 2.11 Représentation schématique des deux couches atmosphériques liées aux modifications urbaines (Oke, 1987)

En milieu urbain, les climatologues distingueront deux couches limites principales : la couche limite urbaine (*urban boundary layer*) et la canopée urbaine (*urban canopy*). La première couche constitue la limite de perturbation atmosphérique de la ville, tandis que la seconde est l'échelle la plus étudiée par les micro-climatologues. Le terme de canopée est utilisé pour désigner l'étage sommital de la forêt tropicale. Par extension la canopée urbaine désigne l'étage sommital de la ville. La construction de bilans thermiques et énergétiques à ces deux échelles, a pour objectif de mettre en exergue les différents types de manifestations physiques engendrés par la structure urbaine. L'analyse des interactions physiques de surface dans l'espace urbain impose une échelle d'étude se trouvant en dessous de celle de la canopée urbaine.

## 2.2.4 Bilan énergétique et thermique

La spécificité du bilan énergétique d'une ville réside principalement dans la considération des comportements des surfaces minérales se distinguant de ceux des surfaces naturelles caractéristiques du rural. La transformation d'un milieu naturel par des composants artificiels modifie de manière évidente le système terre-atmosphère existant.

L'aspect radiatif caractéristique de la ville, ne constitue pas à lui seul, le microclimat urbain. Un certain nombre de phénomènes se conjuguent avec ce dernier et se traduisent dans le bilan énergétique. Cette transformation s'opère à tous les niveaux d'échange : radiatif, convectif, par évaporation, etc., et à toutes les échelles. Les différents impacts de l'urbanisation s'opèrent au niveau:

- du système terre-atmosphère (réchauffement, couche d'ozone, perturbation climatique, etc.),
- du microclimat urbain (températures, précipitations, vitesse du vent, etc.),
- du confort de l'utilisateur.

Cependant l'échelle dominante de la modification du microclimat urbain est celle du bâtiment ou du groupement de bâtiment. En effet, c'est à cette échelle que les transformations les plus importantes s'opèrent, et peuvent avoir des répercussions sur toutes les couches atmosphériques de la ville.

Le bilan énergétique d'une surface s'écrit de manière générale (Oke 1987):

$$Q = Q_H + Q_E + Q_G \quad (\text{cf. fig.2.13}) \quad (2.27)$$

- $Q_H$  flux de chaleur transmis par les mouvements d'air,
- $Q_E$  flux de chaleur latente nécessaire à l'évaporation ou à la condensation sur la surface,
- $Q_G$  flux de chaleur transmis par conduction, ou inertie thermique.
- $Q$  bilan énergétique

Le bilan énergétique ( $Q$ ) traduit une perte thermique quand ce dernier est négatif, et il exprime un gain quand il est positif. La nature du bilan (positif ou négatif) dépendra principalement des conditions de surface. Les pertes thermiques sont liées à la chaleur latente ( $Q_E$ ) et aux pertes par convection ( $Q_H$ ). Les gains de chaleur sont liés aux caractéristiques d'émission et d'inertie des surfaces ( $Q_G$ ). L'équilibre est réalisé quand les pertes compensent les gains. Cependant, en milieu urbain cet équilibre est rompu et se traduit souvent par un bilan positif. Avant de présenter les raisons liées à ce déséquilibre, il est nécessaire de préciser les différentes sources de chaleur déterminantes de l'environnement thermique extérieur.

La définition thermique du bilan en milieu urbain dépend de trois principaux types de source d'énergie :

- la biosphère
- les sources anthropiques

- le rayonnement solaire.

*La biosphère* : Elle concerne la production ou la consommation de l'énergie par les êtres vivants et leur milieu naturel ; notamment la population, la végétation, les étendues d'eau, etc. L'estimation de cette énergie implique la connaissance de la consommation et de la production de chaleur des êtres vivants, en fonction du temps, de leur nombre (population, végétation...), et de leurs conditions biologiques.

*Energie anthropique* : Sa formation résulte de l'action humaine (transport, industrie, etc.). La quantité de chaleur de source anthropique est dans certains cas non négligeable. Cette source inclut le chauffage, les industries et le transport.

*L'énergie solaire* : Elle constitue une source importante de chaleur, qui se transmet sous forme directe, diffusée par le ciel, et indirecte réfléchiée par le milieu (parois, sol) (cf. §2.2.2).

La perturbation du bilan énergétique en milieu urbain est due généralement à l'augmentation de la chaleur produite et à l'atténuation des pertes thermiques. Une part importante de chaleur urbaine est de *source anthropique*, c'est-à-dire venant de : la combustion, le métabolisme, la circulation, etc. Dans les situations nocturnes, elle constitue la principale source de chaleur de la ville. Le statut socio-économique de la ville, la densité de population, etc. sont autant de facteurs qui peuvent influencer l'environnement thermique du milieu urbain.

La *chaleur latente* est liée essentiellement à la présence de végétation, d'eau et d'humidité. A cause de leur rareté, ces derniers n'arrivent pas à jouer un rôle satisfaisant en terme de refroidissement de la ville. La quantité de chaleur consommée par évaporation et évapotranspiration n'est pas négligeable. Notons les principales raisons induisant la réduction de la chaleur latente :

- L'augmentation de l'imperméabilité des surfaces et cela par le captage et la canalisation des eaux pluviales.
- La substitution de surfaces végétales par d'autres minérales, qui augmente l'inertie thermique et par delà les émissions de chaleur.

*Les échanges convectifs* dans la ville sont généralement altérés par rapport à une situation de rase campagne. En effet les constructions augmentent la rugosité urbaine qui participe à l'atténuation de la force du vent.

### **2.2.5 Le bilan radiatif**

Les échanges radiatifs constituent un des moyens de transfert de l'énergie. L'expression générale du bilan radiatif est:

$$Q^* = K\downarrow (1 - \alpha_{CLO}) - L\uparrow + L\downarrow \quad (2.28)$$

$$K\uparrow = K\downarrow \alpha_{CLO} \quad (2.29)$$

- $K\downarrow$  Flux solaire global reçu par le sol,
- $K\uparrow$  Flux solaire global réfléchi par le sol ,
- $\alpha_{CLO}$  albédo
- $L\uparrow$  Flux de grandes longueurs d'onde émis par le sol,
- $L\downarrow$  Flux de grandes longueurs d'onde émis par l'atmosphère et absorbés par le sol.

Les termes du bilan radiatif ( $Q^*$ ) sont changeants selon les conditions de jour ou de nuit. Le bilan radiatif de nuit n'inclura que les émissions de grande longueur d'onde ( $L\uparrow$ ,  $L\downarrow$ ). Celui du jour inclura une source d'énergie non négligeable de caractérisation thermique de l'environnement extérieur : le solaire. Ceci implique une dissymétrie des bilans énergétiques diurnes (cf. fig. 2.13).

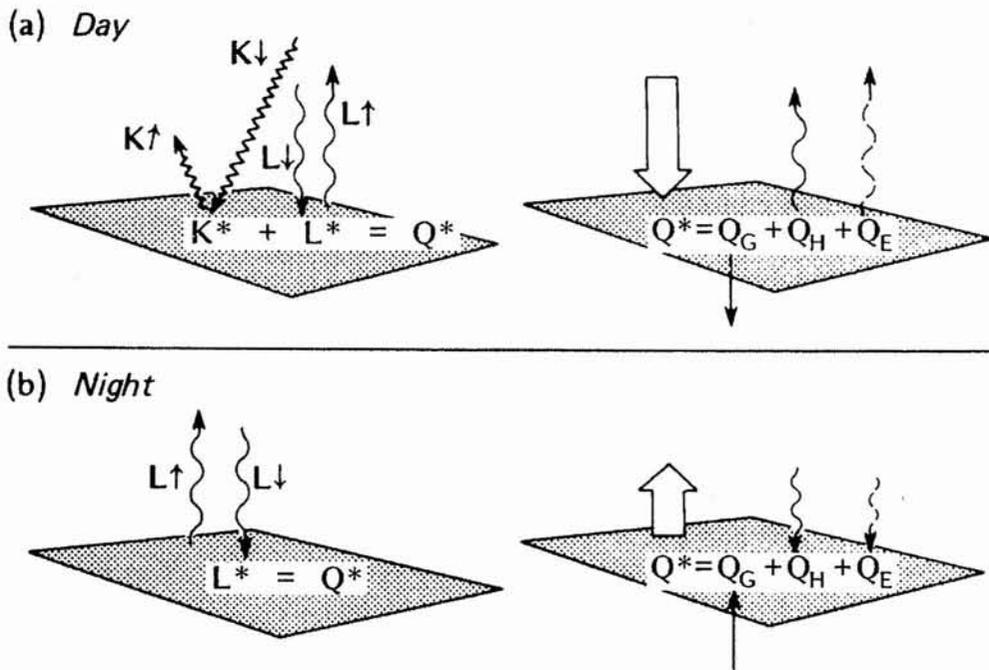


Figure 2.12 Les différences de bilans radiatifs et énergétiques entre le jour et la nuit (Oke 1987)

Le bilan radiatif de grande longueur d'onde ( $L^*$ ) est généralement négatif dans les conditions nocturnes (les pertes sont plus importantes que les apports), même en conditions de ciel nuageuses. Il participe de ce fait au refroidissement

de surface. Les bilans radiatif ( $Q^*$ ) et énergétique ( $Q$ ) en absence de rayonnements solaires (la nuit) sont de ce fait négatifs.

La question d'échelle est primordiale à la définition des termes intervenant dans les bilans radiatifs urbains.

#### *A l'échelle de la canopée urbaine*

Les grandeurs intervenant au niveau de la canopée urbaine considèrent les manifestations physiques agissant à l'échelle du toit et recouvrant l'échelle du fragment urbain.

L'albédo correspond à la notion de réflectivité (cf. § 2.2.1.2.) appliquée aux flux de rayonnement solaire dont la bande spectrale est comprise entre 0.3 et 5  $\mu\text{m}$  (Perrin de Brichambaut et al. 1982).

L'albédo ici, exprime le coefficient de réflexion de toute une zone urbaine par rapport à l'échelle de la canopée, qu'on peut nommer albédo urbain (cf. §2.2.3.). Il ne peut être confondu avec l'albédo d'un matériau ou d'une paroi. Il constitue la réflectivité d'un ensemble de parois et de toitures comportant différentes textures, hauteurs et orientations.

L'albédo urbain observé varie de 0.1 à 0.3, et la valeur la plus rencontrée est 0.15 (Oke 1987). Les valeurs les plus faibles correspondent aux surfaces d'eau et de forêt et les plus hautes à celles des milieux désertiques, ou semi-désertiques. L'albédo est d'autant plus faible que le milieu urbain est dense et vice versa. Ainsi l'albédo urbain, dans les zones périphériques urbaines ou rurales, est plus élevé que celui d'une zone urbaine plus dense. Ce phénomène peut s'expliquer, par l'effet de piégeage des rayonnements solaires dans les rues et les espaces étroits (cf. §2.2.6 p.80).

Les rayonnements de courtes longueurs d'onde ( $K$ ) (cf. fig.2.13) sont généralement plus faibles de 10 à 20% que ceux incidents sur l'environnement immédiat à la ville. Ils sont affaiblis en présence de masques et d'aérosols (nuages, poussière, polluants ...).

Les rayonnements de grande longueur d'onde ( $L$ ) dépendent de la température des surfaces. En milieu urbain, cette dernière est essentiellement caractéristique de la température des toits. Les rayonnements de grande longueur d'onde (GLO) sont plus importants en milieu urbain, cela à cause de la dominance des surfaces minérales par rapport au milieu végétal.

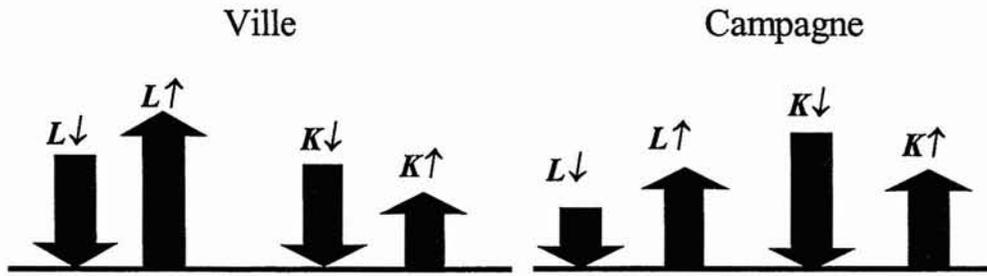


Figure 2.13. Schéma résumant les différences des grandeurs radiatives entre ville et campagne.

### A l'échelle de l'espace urbain

A l'échelle de l'espace, la compréhension des différents phénomènes thermiques ne peut se faire qu'à partir d'une analyse du bilan thermique qui serait caractéristique de la micro-échelle urbaine. La spécificité première de ce type de bilan est d'intégrer de façon plus précise la géométrie du lieu ainsi que les particularités physiques de chaque surface.

Chaque élément de surface ( $i$ ) reçoit une certaine énergie radiative ( $Q_i\downarrow$ ) qui est relative aux composantes suivantes :

- $S_i\downarrow$  rayonnement solaire direct reçu par un élément ( $i$ ) de surface,
- $D_i\downarrow$  partie du rayonnement solaire diffus reçue par ( $i$ ),
- $L_{is}\downarrow$  partie du rayonnement de GLO du ciel reçue par ( $i$ ),
- $R_{ji}\downarrow$  partie du rayonnement solaire réfléchi par les différentes surfaces environnantes.
- $L_{ji}\downarrow$  partie du rayonnement thermique reçue sur ( $i$ ) par les différentes surfaces environnantes ( $j$ ).

L'expression du flux net incident sur ( $i$ ) est :

$$Q_i\downarrow = (S_i\downarrow + D_i\downarrow) + L_{is}\downarrow + (R_{ji}\downarrow + L_{ji}\downarrow) \quad (2.30)$$

avec

$$D_i\downarrow = D F_{iciel} \quad (2.31)$$

$$R_{ji}\downarrow = \alpha_j (D_j\downarrow + S_j\downarrow) F_{ji} \quad (2.32)$$

$$L_{ji}\downarrow = \varepsilon_j T_j^4 F_{ji} \quad (2.33)$$

$$L_{is}\downarrow = L_s\downarrow F_{is} \quad (2.34)$$

$D$  flux diffus de CLO (supposé de valeur homogène sur la voûte céleste).

- $D_{j\downarrow}$  flux diffus de CLO incident sur ( $j$ ).
- $S_{j\downarrow}$  flux direct de CLO incident sur ( $j$ )
- $L_{s\downarrow}$  flux de GLO émis par la voûte du ciel
- $F_{ij}$  facteur de forme sous lequel la surface ( $i$ ) voit la surface ( $j$ ),
- $F_{is}$  facteur de forme sous lequel la surface ( $i$ ) voit le ciel,
- $\alpha_j$  albédo de la surface ( $j$ ),
- $\varepsilon_j$  émissivité de la surface d'indice ( $j$ ),
- $T_j$  température de la surface d'indice ( $j$ ).

L'albédo et l'émissivité des surfaces, dépendent de la nature du matériau, contrairement à l'albédo urbain vu plus haut. Les facteurs de vue du ciel et de vue des surfaces dépendent de la morphologie du cadre bâti qui définit pour les surfaces les parties vues du ciel ou de l'environnement minéral. Les apports solaires en milieu urbain sont liés quant à eux, aux tracés et aux formes urbaines. Ces derniers déterminent le type d'*exposition* et la *durée* d'ensoleillement des façades et des espaces urbains. La caractérisation des apports solaires en milieu urbain dépendra de la *géométrie* des constructions, de leur *hauteur*, de leur *densité*, et des *matériaux*. La géométrie du lieu contribue également à la diminution des pertes de chaleur par rayonnement, par effet de piège solaire. Plus particulièrement dans cette échelle d'observation, le piégeage solaire est défini par les échanges radiatifs dont les facteurs de vue jouent un rôle important (cf. §2.2.6 p. 80).

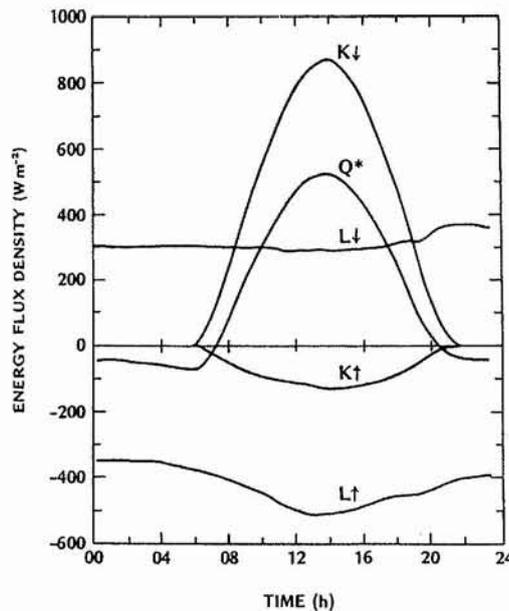


Figure 2.14 Bilan radiatif du 30 juillet à Matador 50°N à 20 cm au-dessus d'un sol d'herbe naturelle (Oke 1987).

L'énergie partant de (*i*) vers son environnement constitué de surface (*j*) et du ciel s'exprime par  $\Phi_i \uparrow$  :

$$Q_i \uparrow = R_i \uparrow + L_i \uparrow \quad (2.35)$$

$$R_i \uparrow = \alpha_i (D_i \uparrow + S_i \uparrow) F_{i\ env} \quad (2.36)$$

$$L_i \uparrow = \varepsilon_j \cdot T_i^4 F_{i\ env} \quad (2.37)$$

$S_i \uparrow$  rayonnement solaire réfléchi par la surface (*i*),  
 $D_i \uparrow$  partie du rayonnement solaire réfléchi par (*i*),  
 $L_i \uparrow$  partie du rayonnement thermique émise par (*i*) vers son environnement,  
 $R_i \uparrow$  partie du rayonnement solaire réfléchi par (*i*) vers son environnement,

Le potentiel d'évacuation de la chaleur par une surface réside dans sa capacité à émettre et à réfléchir. Les gains thermiques dépendent de la part des surfaces vue par une surface (*i*). Plus une surface voit un environnement minéral, plus elle reçoit de l'énergie émise et réfléchi par ce dernier.

$$Q_i \downarrow + Q_i \uparrow = Q^* \quad (2.38)$$

Le bilan radiatif est caractéristique à un instant *t*. Cette spécificité n'est pas seulement due aux variations des apports solaires dans le temps. Mais, elle est également due aux variations des émissions en GLO dépendantes des températures de surface qui s'expriment par le bilan thermique de surface.

Le bilan thermique d'une surface introduit, en plus des apports radiatifs, les échanges convectifs et conductifs exprimés de façon variable par rapport au temps *t*. En effet, l'inertie du matériau et sa conductivité font que la surface ne restitue pas de manière spontanée, à l'environnement, l'énergie qu'elle reçoit.

$$Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} = \mu_i C_{pi} \partial T_{si} / \partial t \quad (2.39)$$

$\mu_i$  masse volumique du matériau (Kg/m<sup>3</sup>)  
 $C_{pi}$  Capacité calorifique massique (J/KgK)

### 2.2.6 Ilot de chaleur

Quand on parle d'environnement climatique urbain, l'effet d'îlot de chaleur est le phénomène microclimatique le plus cité dans la littérature. Le milieu construit apporte des modifications à la température de l'air par rapport à celle

mesurée par les stations météorologiques locales situées dans un site dégagé proche de la ville. L'îlot de chaleur est un phénomène microclimatique caractérisé essentiellement par des écarts positifs de températures de l'air observés entre le centre ville et l'espace rural environnant (cf. fig. 2.15). Par extension, l'îlot de froid est le terme utilisé pour désigner le phénomène d'écart négatif entre la ville et la campagne. Les facteurs modifiant les températures des villes sont variés :

- importance des surfaces minérales qui implique des différences d'albédo par rapport à l'espace rural et une grande émission infrarouge,
- configuration de l'habitat,
- modification du régime d'évaporation,
- énergie thermique dissipée par les activités humaines, etc.

L'albédo désigne ici le taux de réflexion moyen au niveau d'un tissu, ou albédo urbain.

Les particularités de l'environnement urbain caractéristique de l'îlot de chaleur sont :

- une température plus élevée,
- des taux de pollution de l'air élevé,
- un air plus stagnant,
- la formation d'un dôme d'air pollué et surchauffé, englobant centre urbain et banlieue.

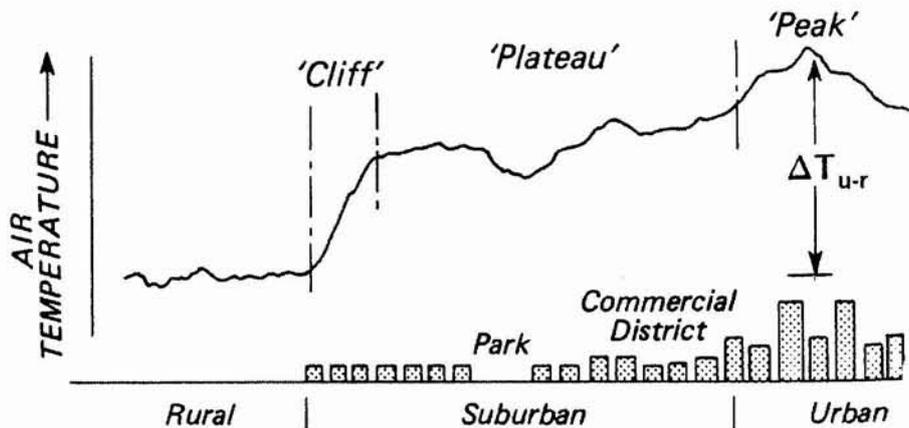


Figure 2.15 Schéma de variation de la température de l'air de la ville comparée à celle de rase campagne (Oke 1987).

Les particularités de l'environnement urbain caractéristique de l'îlot de froid sont :

- une température moins élevée,
- une accessibilité solaire très faible,
- un mouvement d'air plus important ou plus fréquent.

Les différences de comportement climatique entre ville et campagne s'effectuent sur différents niveaux :

- le *piégeage solaire* : l'albédo est généralement plus faible dans les zones urbanisées, (plus fort dans le cas de tissus à toits terrasses blancs). Ce phénomène serait dû à l'effet de piégeage des rayonnements solaires. Il se définit par les conditions géométriques de rue qui font que la part de l'énergie sortant d'une rue est moins importante que celle entrant. En effet, une grande partie de l'énergie incidente sur une face est distribuée à celle non affectée par le rayonnement solaire, et seulement une faible partie est restituée au ciel. Cette distribution constitue les multiréflexions. L'albédo urbain est donc un coefficient qui exprime le rapport entre les flux entrants d'une rue ou d'un quartier et les flux sortants.

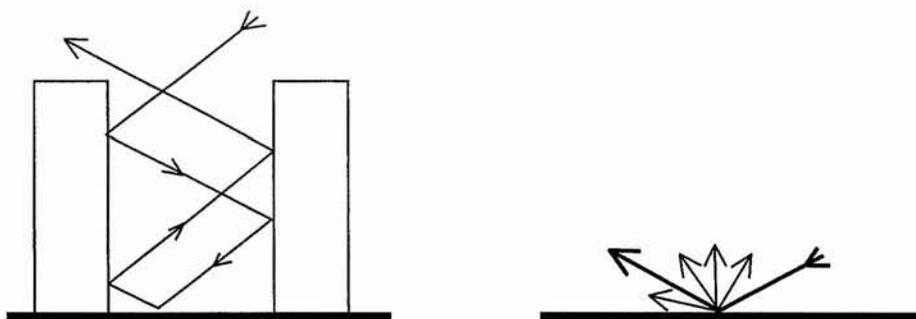


Figure 2.16. Piégeage du rayonnement

- la capacité d'échauffement, de stockage et de diffusion de chaleur par les matériaux urbains est importante. Les bâtiments, les rues s'échauffent plus que la terre cultivée. Cette dernière étant humide ou recouverte de végétaux, consomme une bonne part de l'énergie incidente dans les processus d'évaporation et de condensation.

- la réduction de l'évaporation, due à l'imperméabilisation du sol et à la réduction d'espaces verts. Ceci induit une diminution de consommation de chaleur latente par évaporation.

- l'augmentation de la rugosité de surface entraînant une baisse sensible des vitesses des vents. Ce qui induit le piégeage de chaleur et des polluants dans l'espace urbain étroit.

Le tableau ci-dessous (cf. tableau 2.2) résume les différents effets climatiques dus au milieu urbain.

Dans le phénomène d'îlot de chaleur, l'échelle urbaine considérée est celle de la ville ou de quartier, les modifications de la température de l'air observées au centre de l'agglomération étant considérées comme représentatives de l'action de l'ensemble du cadre urbain.

Il est également important de connaître aussi les modifications de la température de l'air apportées par les constructions, au niveau des espaces urbains. Cette échelle urbaine constituent d'ailleurs le cadre d'intervention des architectes et des urbanistes.

Variable	Effets	Magnitude
Rayonnement U.V.	Plus faible	25-90 %
Rayonnement Solaire	Faible	1-25 %
Rayonnement I.R.	Plus importante	5-40 %
Visibilité	Réduite	
Evaporation	Plus faible	50%
Chaleur sensible	Plus importante	50%
Turbulence	Plus importante	10-50 %
Vitesse du vent	Plus faible	5-30 % à 10m
Température de l'air	Plus chaude	1-3°C annuelle moyenne, plus de 12°C dans des cas occasionnels
Humidité	Jour : plus faible, nuit : plus importante	
Nuage	Nuages plus épais, plus de nuage sous le vent	
Brouillard	Plus ou moins faible ou important suivant les villes	
Précipitation	Moins de neige (transformée en pluie), plus de pluie pour les parties de la ville exposées au vent.	

Tableau 2.2 La nature des effets microclimatiques de la ville (ville de latitude moyenne avec une population de 1 million environ d'après Oke ) (WMO 1996)

## 2.3 Les différentes études de caractérisation climatique de la ville

Les travaux entrepris sur les relations entre le bâti et les conditions thermiques urbaines s'orientent principalement vers :

- l'estimation des échanges thermiques entre les bâtiments et leur environnement immédiat,
- la constitution des différents moyens propres à la démarche architecturale pour la maîtrise des ambiances de la ville.

Seulement certains de ces travaux tenteront de donner quelques indications nécessaires à l'amélioration des conditions climatiques extérieures. Ces indications prennent deux formes fondamentales :

- prescriptions d'ordre général, telles que présentées ci-dessous :

*Pour les conditions chaudes, il s'agit de:*

- diminuer les apports radiatifs (solaires et thermiques), soit par les obstructions ou en diminuant les températures de surface (matériaux, obstructions de surface par des végétaux ou des écoulements d'eau, etc.),
- diminuer la température de l'air, par l'augmentation de l'évapotranspiration (végétation, fontaine, etc.),
- augmenter les échanges convectifs, favoriser les mouvements d'air par la création de zones de dépression.

*Pour les conditions froides, il s'agit de:*

- augmenter les apports radiatifs (solaires et thermiques),
- briser les vents, diminution des mouvements d'air.

- prescriptions d'ordre précis. T. Oke (Oke 1988) établit que les proportions de rue appropriées avoisinent  $H/W=0.5$  (H : hauteur, W : largeur de rue). Ces indications tiennent compte de la protection du vent, de l'accessibilité du rayonnement solaire et de la dispersion des polluants pour une ville anglo-saxonne moyenne située en latitude  $40^\circ$  nord.

Dans la maîtrise des ambiances externes, les apports radiatifs jouent un rôle prépondérant. Toutefois, ils impliquent des indications contradictoires pour les ambiances chaudes et froides. Ceci rend les prescriptions difficilement interprétables en climat tempéré ou variable.

Les études des configurations spatiales du point de vue fonctionnel et perceptif du milieu urbain, permettent de distinguer des zones à maîtriser en priorité. Ces zones se caractérisent par une forte tendance de séjour (places, cours, jardins, parcs, etc.) ou de passage de l'utilisateur (trottoirs, etc.) ou encore, des zones de grande sensibilité en terme de perception thermique qui sont les zones de transition ; tels que seuils d'entrée, terrasses, etc.

Lors de notre recherche bibliographique, nous avons pu distinguer deux méthodes d'investigation concernant l'étude microclimatique des espaces urbains :

- les mesures
- les simulations numériques

### 2.3.1 Les mesures

Plusieurs techniques d'observation peuvent être répertoriées : mesures effectuées in situ dans un espace donné, mesures effectuées sur des maquettes réduites d'un site et la télédétection.

A différentes échelles, les observations des situations climatiques sont confrontées aux difficultés des mesures. Ces difficultés sont relatives aux échelles de résolution auxquelles s'intéressent les climatologues. La télédétection reste l'outil principal de mesure et d'observation des effets d'îlot de chaleur urbain, et convient difficilement aux échelles de l'espace urbain (en grande longueur d'onde), et cela à cause de la couche atmosphérique qui perturbe les signaux émis. Elle est donc utilisée principalement dans la bande solaire. Toutes ces difficultés s'ajoutent à celles de la lourdeur et du coût excessif des mesures par télédétection. Ceci explique la rareté d'utilisation de l'imagerie aérienne pour la validation des modèles de calcul de température de surface et d'albédo urbain. Les seules effectuées se rapportent au modèle de A.Iino et A.Hoyano (1996). Les premières mesures in situ repertoriés, concernant l'analyse microclimatique urbaine, ont été effectuées par M. Nunez et T. Oke (1976, 1977) dans et au-dessus d'une rue canyon isolée. D'autres mesures ont suivi dans des sites plus ou moins complexes (Miller-Chagas 1980) (Sacré *s.d.*) avec des moyens plus ou moins sophistiqués (Groupe ABC 1997). La mesure effectuée sur des modèles réduits de fragments urbains (Aida 1982) tente de substituer celle menée par voie aérienne ou par satellite. Nous ne présenterons pas ici tous les travaux effectués, nous ne dresserons que les principales remarques et observations qu'il nous semble intéressant de mettre en relief.

#### 2.3.1.1 Les mesures in situ

Les enquêtes in situ correspondent aux campagnes de mesure effectuées au voisinage des bâtiments et dont l'objectif était d'étudier l'incidence des configurations de l'environnement urbain (minéral, végétal, l'eau...) sur les apports énergétiques et le microclimat.

Le choix des sites étudiés était représentatif à deux niveaux :

- représentatif du point de vue des caractéristiques de l'environnement urbain à dominante végétale, humide ou minérale.
- représentatif du point de vue de la diversité des configurations étudiées.

Les campagnes de mesures s'effectuaient aussi bien sur des points fixes (Miller-Chagas 1980) que mobiles en respectant un parcours donné (Groupe ABC 1997). Très peu de ces mesures ont été utilisées pour la validation de modèles numériques. Notons l'exemple le plus représentatif de D. L. Verseghy et al. (1989), où les auteurs ont tenté d'esquisser les différentes erreurs de calcul que peuvent induire les hypothèses simplificatrices inhérentes aux

modèles physiques, exemple : le fait de considérer la diffusion de l'énergie solaire isotrope ou bien, d'envisager une réflexion diffuse des matériaux urbains, etc.

Les résultats généralement attendus par ces campagnes de mesures sont :

- une meilleure compréhension des phénomènes microclimatiques urbains,
- une meilleure connaissance des rôles joués par les éléments végétaux ou autres (fontaine, plan d'eau, etc.) dans la caractérisation microclimatique urbaine (Sacré s.d.) (Groupe ABC 1997),
- une tentative de typologie des espaces urbains du point de vue microclimatique (Miller-Chagas 1980) (Groupe ABC 1997),
- une compréhension des rapports entre le microclimat local et la qualité des ambiances et du confort hygrométrique (Alvares Dominges et al. 1992),
- une validation ou une meilleure mise au point des modèles physiques représentatifs des phénomènes physiques (Verseghy et al. 1989) (Noilhan 1980),
- une mise au point des indices de confort hygrométrique adaptés à des conditions climatiques extérieures (Blazejczyk 1999),
- une mise au point des mesures et des données. Croisement de données satellitaires avec celles mesurées in situ (Iino et al. 1996), ...

Les effets mis en exergue par ces travaux dépendent de :

- l'état du ciel et de l'air,
- l'exposition des points observés par rapport à l'ensoleillement,
- la position des points de mesure par rapport aux éléments urbains (bâti, végétaux, plans d'eau, etc.),
- la configuration de l'espace étudié (étroit, large ou intermédiaire)
- la nature des revêtements...

Les mesures in situ conviennent plus à l'échelle d'étude spécifique à celle du piéton et de l'utilisateur, néanmoins elles présentent quelques inconvénients :

- les grandeurs mesurées regroupent plusieurs effets locaux qui ne peuvent être isolés,
- faible fiabilité des mesures,
- difficulté de recouvrement de tous les points du site,
- problème d'exploitation et d'interprétation des données numériques,
- gestion lourde des données,...

Suivant la nature du capteur (le capteur mobile ou fixe), les mesures induisent des difficultés d'interprétation qui ne sont pas à négliger. Les mesures effectuées avec des capteurs mobiles (chariots) présentent une meilleure flexibilité de choix de points de mesure, mais l'inconvénient réside dans la

non-répétitivité de ces mesures. Nous pouvons observer également, l'absence de mesures effectuées en des positions différentes et aux mêmes instants, qui rend la comparaison des situations climatiques difficiles à analyser (Sacré s.d.). Les mesures effectuées avec des capteurs fixes permettent de mieux gérer les variations des conditions diurnes, mais présentent des difficultés de recouvrement de la zone à étudier. Souvent, les données numériques sont interpolées sur une partie du site (Miller-Chagas 1980).

### 2.3.1.2 Les modèles réduits

Les maquettes sont essentiellement utilisées pour la validation d'un modèle numérique, et tentent de remplacer les mesures in-situ trop onéreuses. Elles sont également utilisées pour la construction d'un modèle mathématique empirique relationnel entre les formes urbaines et les facteurs physiques (flux, albédo, etc.) (Oke 1981). Les configurations modélisées dans leur majorité sont construites toutes à base de rues de type canyon.

### 2.3.1.3 La télédétection

Avant de discuter de la pertinence de la télédétection, il est important de la définir. En effet les mesures à plates-formes satellitaires ne sont pas les seules mesures spécifiques à la télédétection

Qu'est-ce que la télédétection ? Quelles sont les différentes techniques utilisées dans cette dernière ?

"La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide des plates-formes aéroportées, spatiales terrestres ou maritimes" (Bonn et al. 1993)

"L'objet de la télédétection est de fournir des informations sur les paysages sous la forme de données images en utilisant le rayonnement électromagnétique comme véhicule de ces informations" (Robin 1995 )

La définition officielle par le COMITAS (Commission Ministérielle de la Terminologie de la Télédétection Aérospatiale) (Robin 1995 ) :

"La télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci".

La télédétection utilise les plates-formes satellitaires et aériennes (avion, ballon, etc.).

Les domaines du spectre électromagnétique les plus utilisés en imagerie sont :

- le visible ; rayonnement solaire réfléchi par les surfaces terrestres (0,38 à 0,78  $\mu\text{m}$ ),

- le proche infrarouge ; rayonnement solaire réfléchi par les surfaces terrestres (0,9  $\mu\text{m}$ ). Il est utilisé principalement dans l'étude de la végétation et la télédétection de l'eau.
- le moyen infrarouge ; à la fois émis et réfléchi par les surfaces terrestres (3  $\mu\text{m}$ ). Il est utilisé principalement dans la télédétection de l'eau dans les plantes, de la neige et de la glace, et l'évaluation de l'humidité du sol.
- l'infrarouge dit thermique (émis entre 8 et 12  $\mu\text{m}$ ) est utilisé en météorologie et en climatologie.

Le type et la qualité des images dépendent des types de capteurs utilisés et de la complexité du paysage. Il est important de noter le sens du terme paysage que les chercheurs en télédétection désignent par l'interrelation entre l'atmosphère, la biosphère, et la sociosphère (Robin 1995).

L'information obtenue par les capteurs dépend de la résolution spectrale, radiométrique, spatiale et temporelle du capteur, et du nombre de classes de paysage ou d'utilisation du sol, de leur taille, de leur arrangement, et de leur variabilité temporelle. Des contraintes de l'atmosphère peuvent altérer l'information émanant du "paysage" avant d'être reçue par le capteur.

#### *Les plates-formes satellitaires :*

Nous présentons ici les différents types de capteurs satellitaires avec leur résolution spatiale et temporelle.

Images	Résolution spatiale	Résolution temporelle
GOES satellite géostationnaire USA.	8 Km	30 mn.
NOAA-AVHRR (visible et IR thermique) USA.	1 Km	12h
LANDSAT thematic mapper TM (visible et IR thermique) USA.	30 m dans le visible, 120 m dans l'infrarouge	16 jours.
SPOT HRV (visible et proche infrarouge) France.	10m	26 jours

Tableau 2.3 Les différents types d'images satellitaires et leurs résolutions spatiales et temporelles

Nous pouvons remarquer que plus la résolution temporelle est grande, plus la résolution spatiale est faible et vice versa. Il est difficile d'obtenir une bonne résolution dans les deux niveaux ; spatiale et temporelle, notamment dans le spectre de l'infrarouge thermique.

Le AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) semble plus approprié à l'observation des variations diurnes, mais présente une résolution trop grande pour l'étude des espaces urbains.

Pour ce qui est des systèmes radars, leur caractéristique est de pouvoir enregistrer des images indépendamment des conditions météo (*SAR, ERS-SAR, RADARSAT, SIRC*). Ils sont très sensibles à la morphologie des surfaces.

La télédétection satellitaire semble ne pas encore convenir aux préoccupations d'ambiances thermiques des espaces urbains. Elle est actuellement plus appropriée à l'observation des phénomènes d'îlot de chaleur, car elle présente :

- une faible résolution spatiale, dans la plupart des cas
- une faible résolution temporelle, pour une résolution spatiale plus précise,
- des résultats influencés par l'état des couches limites atmosphériques de la ville qui rendent difficile l'estimation des conditions thermiques proche du sol urbain,
- des mesures plutôt caractéristiques de l'échelle de la canopée urbaine que celle des espaces publics ou des usagers. Notamment les effets observés sont majoritairement liés aux effets de toiture, et de pollution atmosphérique.

#### *Les plates-formes aériennes :*

Il existe des plates-formes aériennes qui sont munies de capteurs multi-spectraux et qui ont une efficacité meilleure dans le visible. Pour ce qui est de l'infrarouge thermique, la résolution spatiale peut atteindre 5m. L'image exige une coordination des données mesurées dans les bandes spectrales infrarouges et visibles.

Il est intéressant d'étudier le microclimat urbain à partir des imageurs thermographiques aéroportés, mais cela se révèle extrêmement coûteux.

### **2.3.2 Les modèles physiques**

Les modèles physiques développés dans le but de cerner les phénomènes microclimatiques à l'échelle de la rue, dépendent d'un certain nombre d'hypothèses qui peuvent se définir en trois grandes catégories :

- des hypothèses d'ordre de bilan, exemple de la prise en considération du régime permanent ou transitoire, etc.
- le développement du type d'interprétation mathématique, algorithmique et de résolution numérique : différentiel ou de *force-restore* (Johnson et al. 1991), couplage de modèle de calcul numérique thermique avec un modèle aérodynamique,
- les hypothèses liées aux comportements physiques des environnements. Exemple des matériaux considérés comme des corps noirs et opérant des réflexions diffuses, etc.

Les modèles microclimatiques se développent autour de trois facteurs fondamentaux :

- les données physiques,
- les représentations géométriques du site,
- les représentations numériques des phénomènes microclimatiques qui sont principalement les expressions de bilan de paroi, de mouvement d'air et de dissipation de la chaleur dans l'air.

La majorité des modèles développés par les climatologues urbains abordent des échelles spatiales plus importantes. A ce niveau là, apparaissent les modèles statistiques qui tentent d'apporter des réponses plus interactives à l'influence du mode d'occupation du sol sur les températures de l'air (Sevensson 1999). Les modèles physiques caractéristiques de cette échelle, cernent principalement les phénomènes climatiques se produisant à l'échelle de la canopée, c'est-à-dire celle des toits.

Les modèles basés sur les bilans thermiques appliqués aux surfaces opèrent principalement sur des rues de type canyon de longueur infinie. Seulement quelques modèles introduiront les aspects tridimensionnels de la ville et la caractérisation géométrique des flux solaires incidents (Terjung et al. 1980).

Les travaux sur le couplage thermo-aéroulque sont en cours de développement et n'ont fait l'objet que de très peu de publications : (Mills 1993), (Pignolet-Tardan 1996) et (Sini et al. 1996).

Il est important de remarquer que notre travail s'est confronté à un corpus scientifique représentatif de l'échelle de la rue, qui est spécialisé en l'étude de la rue de type canyon.

## **2.4 Le confort thermique en milieu extérieur**

Les différences de perception du confort hygrométrique entre le milieu extérieur et intérieur dépendent de deux principaux facteurs :

- facteurs physiques liés :
  - aux caractéristiques radiatives solaires et thermiques jouant un rôle plus important en milieu urbain,
  - aux pertes par convection plus importantes dues aux vents.
- facteurs subjectifs et objectifs liés au sujet de par :
  - sa réaction physiologique et psychologique aux manifestations climatiques extérieures,
  - son comportement et son mode d'occupation de l'espace extérieur.

L'étude des échanges radiatifs entre éléments de l'urbain et la personne constitue le domaine de développement principal de la recherche sur la physiologie du confort en milieu extérieur. La reformulation du rayonnement dans les bilans physiologiques, constitue l'un des principaux objectifs,

permettant la réadaptation des outils de mesure du confort intérieur, aux conditions externes. Les échanges radiatifs jouent un rôle primordial dans la définition du confort et la perception subjective, dans l'espace urbain. Ces derniers points laissent un certain nombre de questions en suspens que nous tenterons de présenter dans cette partie d'état de l'art. Nous présenterons en premier lieu des généralités concernant le confort climatique et hygrothermique, ainsi que les différents outils d'évaluation de ce dernier. Dans la deuxième partie, nous centrerons l'état de l'art sur le développement d'indices appliqués en milieu extérieur.

### 2.4.1 Généralités

Bien que nous ne nous intéressions qu'aux phénomènes constitutifs des ambiances thermiques extérieures, les paramètres climatiques sont un ensemble de manifestations de phénomènes atmosphériques qui influent également sur d'autres paramètres de confort : visuel, sonore, mécanique, olfactif, respiratoire. Ces phénomènes sont liés à différentes manifestations climatiques qui sont : le soleil, la pluie, la pression atmosphérique, le vent, l'humidité, la température, etc. Ces manifestations peuvent intervenir de manière non-indépendante.

Elément d'ambiance	Facteurs climatiques
visuel	Rayonnement solaire
acoustique	Bruits d'impact de pluie, grêle... Bruit du souffle de vent à travers les obstacles (les feuillages, les coins de rues...), Bruit du tonnerre
mécanique	Le vent, Etat du sol (neige, verglas, etc.)
Olfactif et respiratoire	La source majeure est la pureté de l'air (sa teneur en gaz et en poussières...), qui est influencée par la température de l'air, l'humidité etc.
Champs électriques et ionisation de l'atmosphère	Temps orageux.
hygrothermie	Température, humidité, vent, rayonnement de GLO et de CLO.

Tableau 2.4 Présentation synthétique des influences des différentes manifestations climatiques sur les ambiances urbaines d'après H. Pénicaud (1978).

Les différences notables entre le milieu extérieur et intérieur sont dues au degré de variabilité de ces facteurs dans le temps et dans l'espace, et des conditions relatives du sujet. Ces paramètres sont non seulement liés aux conditions microclimatologiques et météorologiques, mais dépendent également des réactions et des comportements du sujet. Ces réactions peuvent être à caractère individuel ou social par rapport aux manifestations climatiques.

La sensation thermique n'agit pas de manière isolée, toutes les dimensions sensibles s'entremêlent construisant une perception qui va au-delà de la

sensation du froid et du chaud. En milieu extérieur, il est important de considérer les autres sensations (tactiles, olfactives, etc.), car, elles s'entremêlent de manière complexe avec les sensations purement thermiques. En effet, ces dernières ne peuvent se détacher de manière évidente des autres sensations chez l'individu. L'interdépendance du confort physiologique avec les aspects culturels et psychologiques de l'individu, est également à considérer par rapport à la perception visuelle, sonore, tactile et olfactive.

Des recherches ont tenté de définir une plage de confort thermique qui correspondrait à une appréciation positive par un taux acceptable de personnes. Cette mesure a pour vocation la situation des conditions thermiques agréables à l'individu en vue d'une conception thermique d'une ambiance. Ce qui donna lieu à la normalisation à partir de la construction d'indice et de zone de confort. Ces derniers, ayant pour objectif la caractérisation des qualités thermiques recherchées, ne permettent pas un recouvrement intégral de la perception hygrométrique des personnes, à cause des raisons évoquées plus haut.

Les rayonnements solaires constituent l'une des expériences sensibles les plus intéressantes, car ils mettent en relation la perception thermique et visuelle. Par la lumière, ils révèlent les formes, les textures et les couleurs. Par le mécanisme de l'ombre et de la lumière, ils transforment l'espace. Au même moment, ils sont des sources de chaleur, non sans influence, aussi bien sur l'homme que sur les formes.

Le soleil introduit le caractère fusionnel de la perception visuelle et thermique du lieu. La spécificité visuelle de l'ombre introduit la sensation thermique de l'ambiance. Les qualificatifs d'ombragés sont souvent synonymes de fraîcheurs ou même de froid dans les climats chauds. Dans ces climats, l'ombre est également synonyme de sérénité, de calme, de repos et d'intimité. Dans d'autres climats, des phénomènes inverses peuvent être observés. En effet, l'ombre devient synonyme de froideur et d'insécurité. L'observation des constructions vernaculaires peut révéler, dans certaines situations, un paysage sensible qui fait intervenir aussi bien l'esthétique visuelle et thermique du lieu. Le développement des espaces urbains et architecturaux de la Casbah d'Alger révèle ces aspects là (Tiraoui 1996). Notons l'exemple des successions d'espaces de rues ombragés et au soleil qui marquent une halte rafraîchissante à la montée exténuante menant vers les habitations. Ces espaces d'ombres marquent également l'intimité signalant la présence d'entrées ou de dessertes de groupe d'habitation qui rendent la halte très brève.

Les mêmes expériences de multisensorialité peuvent être observées pour les autres manifestations climatiques tels que le vent, la pluie, etc. Les aspects subjectifs de cette multisensorialité sont perçus différemment suivant le rôle que le climat joue dans l'imaginaire collectif et son interaction avec la perception culturelle et individuelle.

L'approche des ambiances thermiques extérieures peut être fondamentalement différente de celles de l'intérieur. L'ambiance intérieure recherchée se caractérise souvent par un besoin de contrôle rigoureux des environnements thermiques. En extérieur, par la réaction vestimentaire de l'individu, ce dernier se trouve dans une situation thermique moins vulnérable que celle en intérieur. Ceci rend la stimulation des sens thermiques par la variation des conditions ambiantes, une investigation non anodine. Cette variation peut être une source d'appréciation du lieu. L'homogénéité des conditions thermiques peut être une source de non-appréciation de l'inertie perceptive due à la stabilité de la situation. Contrairement à une situation thermique uniforme, l'espace devient source de vitalité et de découverte. Ces conditions stimulantes sont à rechercher et à mettre en œuvre en milieu urbain, tout en respectant les limites de l'appréciable et du supportable.

#### 2.4.2 Le confort hygrothermique

Le confort hygrothermique se définit par les réponses physiques et physiologiques de régulation des sensations de chaleur et de froid et du degré de stimulation des mécanismes thermorégulateurs. Y. Houdas (1973) définit une ambiance thermique confortable comme une ambiance pour laquelle l'organisme peu maintenir constante sa température corporelle sans mettre en jeu de manière perceptible ses mécanismes instinctifs régulateurs de lutte contre le froid et le chaud.

Le confort est défini donc de *manière objective* par le degré de manifestation des mécanismes de régulation thermique en l'absence de perturbation dans le système d'échange physiologique entre l'homme et son environnement, qui est nommé *neutralité thermique*. De *manière subjective*, il est qualifié par l'absence de gêne ou par la sensation de bien-être. Le maintien de l'équilibre thermique entre le corps humain et son environnement est l'un des besoins primordiaux pour la santé et la sensation de bien-être. Les conditions sous lesquelles cet équilibre est achevé, dépendent des effets combinés d'un certain nombre de paramètres dont certains concernent l'individu et d'autres l'environnement. Les conditions de neutralité sont réalisées dans une ambiance pour laquelle les mécanismes de thermorégulation sont sollicités de façon minime. Les conditions de neutralité thermique à elles seules ne suffisent pas au confort, l'aspect sensoriel psychologique est également important.

La formule de base qui décrit les échanges thermiques du corps avec l'environnement est :

$$M \pm R \pm C - E = Q \tag{2.40}$$

- M* la production métabolique
- R* les échanges radiatifs du corps avec son environnement
- C* les échanges convectifs du corps avec son environnement
- E* les pertes par évapotranspiration
- Q* le changement de la quantité de chaleur du corps.

Trois principaux types de paramètres physiques interviennent sur les échanges :  
*Les paramètres d'ambiances* : température de l'air, le rayonnement, hygrométrie, vitesse de l'air.

*Les paramètres relatifs au sujet* : la vêtue et son isolement.

*Les paramètres physiologiques* : le métabolisme, température moyenne de la peau, l'évacuation de chaleur par sudation.

Nous pouvons distinguer deux principaux types d'interaction thermique :

- interactions physiques : déterminant les échanges entre le corps et l'environnement. Ces derniers s'effectuent par la convection avec l'air, et à travers les échanges par rayonnement avec les surfaces avoisinantes.
- interactions physiologiques : qui font appel aux mécanismes thermorégulateurs. Tous les modes d'échange thermique sont dominés par des mécanismes physiologiques capables de réguler le taux de production et de déperdition de chaleur en maintenant l'équilibre. Ces mécanismes de régulations sont l'évaporation, la sudation et la respiration.

Facteurs climatiques hygrothermiques	Type d'échanges thermiques
Température de l'air et de surface	Echanges convectifs naturelles
Température radiante	Echanges radiatifs
Rayonnement solaire	Echanges radiatifs.
Humidité	Echanges de chaleur latente
Vitesse de l'air	Echanges convectifs forcées

Tableau 2.5 Présentation synoptique des différents types d'échange thermique du corps avec son environnement qu'impliquent les facteurs climatiques.

Les conditions physiologiques du confort d'après P.O. Fanger (McInthyre 1980) sont :

- de réaliser une condition d'homéothermie centrale, c'est-à-dire production interne de chaleur pour compenser les échanges avec l'environnement.

$$H - E_{is} - E_{sw} - E_{res} - C_{res} = R + C \quad (2.41)$$

- H* chaleur produite par corps
- E<sub>is</sub>* perte par diffusion de vapeur à travers la peau
- E<sub>sw</sub>* perte due à la sudation,
- E<sub>res</sub>* perte par évaporation due à la respiration
- C* perte par convection

$C_{res}$  perte par respiration

$R$  perte radiative

Les grandeurs sont exprimées en  $W/m^2$

- de respecter un taux de sudation minimum tolérable,

- d'atteindre une température de la peau appréciable (éviter les sensations extrêmes).

Ainsi Givoni (1969) distingue deux types de facteurs : - primaires et - secondaires :

Facteurs primaires	Facteurs secondaires
Métabolisme	Température de vêtement
Température de l'air	Mouvement d'air sous le vêtement
Température radiante moyenne	Taux de sudation
Energie solaire directe ou réfléchi	Humidité de la peau et du vêtement
Mouvement d'air	Efficacité de rafraîchissement de la sudation.
Pression de vapeur d'eau	
Type de vêtement et de matière	

Tableau 2.6 Les facteurs intervenants sur le confort physiologique thermique

#### 2.4.2.1 Echanges avec l'environnement

Une personne située dans un environnement donné peut subir des gains ou des pertes d'énergie selon que l'environnement est plus froid ou plus chaud que la surface de son corps. Ces derniers dépendent également des conditions de rayonnement et de convection extérieures.

##### *Rayonnement*

Par les échanges radiatifs nous entendons : échanges radiatifs du corps avec son environnement et cela en GLO et CLO. Les échanges dans la première bande spectrale supposent l'implication de la propre émission de chaleur du corps et celle des surfaces environnantes. Le corps peut également subir les effets du rayonnement solaire direct ou réfléchi de son environnement extérieur ou intérieur.

##### *Convection*

L'échange entre le corps et l'air avoisinant peut se faire en convection libre (naturelle) ou en convection forcée (cf. §2.2.13). La définition du comportement macroscopique des échanges convectifs est très complexe, notamment en présence de vêtue. Deux types d'échanges convectifs peuvent se distinguer, ceux se produisant : - entre la tenue vestimentaire et la peau, - et ceux entre la peau et l'air extérieur. Un autre type d'échange qui agit de façon indirecte est celui s'effectuant entre le vêtement et l'air extérieur. Les échanges convectifs autour du corps sont généralement exprimés sous forme de facteur d'échange qui tente de les représenter.

Les deux mécanismes d'échange présentés ci-dessus dépendent du type de vêtement porté par le sujet. La vêtue détermine les surfaces du corps exposées aux agressions extérieures, et le type d'interaction entre le vêtement et la surface externe du sujet. La réaction vestimentaire et physiologique du sujet, le déplacement de ce dernier, la complexité physique de l'espace urbain, impliquent une difficulté d'expression des paramètres physiques du confort. Ceci impose une simplification de formulation de ces types d'interaction que nous détaillerons plus loin.

#### 2.4.2.2 Mécanismes thermorégulateurs

Il existe trois mécanismes permettant le maintien de la température corporelle.

##### *Pertes par respiration*

Le corps dissipe de la chaleur par ce mode, à la fois sous forme sensible (réchauffement de l'air respiré) et latente (humidification de celui-ci).

##### *Pertes par diffusion d'humidité à travers la peau*

Ces pertes ne mettant pas en jeu les glandes sudoripares, sont permanentes et doivent être distinguées de l'évacuation de la chaleur par transpiration. Cette dernière se produit à la surface de la peau et est commandée par la thermorégulation du corps. Les pertes thermiques par diffusion de l'humidité ne dépendent que de l'écart entre la pression saturante de vapeur d'eau au fond des pores de la peau et la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air. Elles ne sont pas négligeables par rapport aux pertes par rayonnement, mais elles sont minimales par rapport aux pertes par sudation.

##### *Pertes thermiques par sudation*

Ce mode d'évacuation de la chaleur est le plus puissant de tous. Il est plus sollicité dans les milieux chauds. La résistance du corps au froid est liée davantage aux réactions métaboliques (production de chaleur) ou à des réactions par la tenue vestimentaire isolante.

Le contrôle du confort en milieu extérieur est plus complexe qu'en milieu intérieur. Ce dernier présente, une inertie plus grande par rapport aux conditions thermiques, définie par son isolation spatiale et thermique. L'amélioration des conditions extérieures est tributaire du choix du matériau, des formes d'aménagement. Les dispositifs techniques coûteux seront de faible efficacité devant les variations aléatoires des conditions climatiques extérieures.

Bien que les paramètres d'équilibre physiologique aient fait l'objet d'études poussées, la sensation de froid et de chaud se révèle plus complexe. Cette dernière dépend plus de l'appréciation subjective du sujet. Plusieurs indices ont

été développés afin de prendre en compte les aspects psychologiques et physiologiques du confort hygrothermique.

### 2.4.3 Indices

L'indice thermique a été élaboré afin d'exprimer les effets combinés de certains paramètres sur les réponses sensibles et physiologiques du corps. Les variations de ces expressions ont donné forme à plusieurs indices. Leur définition dépend de l'approche du problème du confort, de l'unité de base, de l'importance attribuée à chaque facteur et de l'interdépendance mutuelle des paramètres dans les conditions d'application.

La plupart de ces indices a été déterminée à partir d'études de réactions d'individus récoltées ou à la base de réactions métaboliques et physiologiques. Ces indices ont surtout été extraits à partir d'un environnement intérieur contrôlé (en laboratoire). Les types de manifestations subies sont créés à partir d'un certain nombre de variations de conditions notamment : les conditions de l'usager : l'habillement, l'activité,... et les conditions climatiques : vitesse du vent, et rayonnements solaires. L'indice est le résultat de l'analyse statistique d'expérimentations effectuées sur des individus. Chaque indice s'applique de manière plus rigoureuse aux conditions physiques analysées lors des expérimentations. Le coût en temps et en effort pour recouvrir toutes les combinaisons des variables du confort ( $T_{air}$ ,  $T_{mr}$ ,  $v$ ,  $h_r$ ,  $P_a$ , isolation et type de vêtement, Production métabolique) est prohibitif.

Un certain nombre de travaux ont utilisé et extrapolé quelques uns de ces indices en milieu extérieurs. Ils seront abordés plus loin. En premier lieu, nous présenterons les indices les plus caractéristiques de la mesure du confort thermique. L'état de l'art est basé sur trois analyses importantes : celle de B. Givoni (1969), de D. A. McInthyre (1980) et de J. B. Hoffman (1994).

Deux types majeurs d'indice peuvent être distingués :

- *indices de confort thermique* : dont l'objectif est de décrire et de prédire les sensations thermiques. Ils permettent d'établir également si la situation thermique est confortable ou pas.

- *indices de stress thermique* : sont utilisés dans des situations thermiques plus extrêmes. L'objectif de ces indices est de combiner les variables de l'environnement avec ceux du corps pour exprimer le degré de perturbation physiologique et psychologique du sujet. Rappelons que le stress définit un ensemble de perturbations physiologiques ou psychiques provoqué par une agression quelconque sur l'organisme. Les agressions sont réalisées ici par les conditions thermiques extrêmes. Les types de stress thermique peuvent être :

- élévation ou diminution de la température du corps,
- perte de connaissance, convulsion ou coma
- dilatation vasculaire,

- déshydratation et déficit en sels minéraux,
- protubérance,
- ...

#### 2.4.3.1 Indices de confort thermique

##### *a. Température effective ET (effective temperature)*

C'est un indice qui a été développé par le laboratoire de recherche *American Society of Heating and Air Conditioning Engineers* (ASHVE) par Hougten, Yaglou et Miller entre 1923-1925.

Elle est définie comme la température d'une atmosphère immobile et saturée d'humidité qui procure la même sensation thermique que celle étudiée. Cet indice combine l'effet du bulbe sec, de l'humidité et du mouvement d'air pour exprimer les sensations de froid et de chaleur. La température rayonnante n'a pas été prise en compte : la température de l'air est prise égale à celle des parois. Les expériences ont été réalisées dans des conditions de passages et non de séjour.

Vernon et Warner introduisirent la température globe à la place de la température du bulbe sec, ce qui définit une version corrigée de l'ET appelée : *corrected effective temperature* (1932).

##### *b. Température opérative sèche (Operative Temperature)*

Elle est définie comme la température d'une ambiance dont les parois sont à la même température que l'air, et dans laquelle le corps a les mêmes pertes par rayonnement et convection que dans l'ambiance étudiée. Elle peut se définir de façon équivalente comme la moyenne entre la température de l'air ambiant et la température moyenne radiante, dans les proportions respectives d'échanges par convection et rayonnement. L'humidité n'est pas prise en compte.

##### *c. Température résultante de Missenard RT (Resultant Temperature)*

Le concept a été introduit pour la première fois en 1931 et formulé à partir de 1948, par Missenard. La température résultante est un indice de confort thermique qui combine la température d'air supposée égale à celle des parois, l'hygrométrie sous forme de température du bulbe humide, la vitesse de l'air.

La température résultante est la température d'une ambiance uniforme saturée d'humidité avec air calme qui procure la même sensation thermique que celle étudiée. Il s'agit de la même définition que la température effective sauf qu'elle a été paramétrée pour des conditions d'exposition aussi bien de séjour que de passage : température d'équivalence de passage et de séjour.

##### *d. Température opérative humide*

Elle se définit comme la température équivalente à celle d'une ambiance saturée d'humidité et présentant des parois de même température que celle de l'air ambiant, où le corps subit les mêmes échanges calorifiques par

rayonnement, convection et évaporation que dans l'ambiance étudiée. Elle dépend de la température et de la mouillure cutanée et de façon plus complexe de l'activité et de la vêtue. Elle servira à introduire la nouvelle température effective (ET\*).

*e. La nouvelle température effective ET\**

Elle a été définie par Gagge et al. en 1971, sur la base d'une formulation mathématique du comportement thermique du corps humain, tout en introduisant la mouillure cutanée. Elle a été étendue pour recouvrir plusieurs niveaux d'activité et de vêtue, et est devenue la température effective standard (SET).

*f. Température effective standardisée SET (Standard Effective Temperature)*

SET est un indice résultant d'une expression de transfert thermique, et se distingue de la première estimation de la température équivalente (ET) basée sur des estimations subjectives. Il est défini comme la température d'un environnement de condition uniforme (- température d'air égale à la température moyenne radiante, - air stagnant, - humidité relative de 50%), pour laquelle, un individu présentant des conditions de vêtue standardisé, aura la même perte de chaleur et la même température de peau, que dans un environnement réel et vêtu de manière spécifique.

C'est la version standardisée de l'ET\* qui a été établie par Gagge, qui définit pour chaque ambiance l'adaptation vestimentaire adéquate permettant d'établir des zones de confort pour des personnes vêtues selon les hypothèses préétablies. Cependant, cet indice est confronté au problème de la mouillure cutanée et de la perméabilité du vêtement à l'humidité qui ne peuvent être standardisées.

*g. Zones de confort*

Parallèlement aux indices synthétiques de température, une autre méthode d'évaluation consiste en la définition de zones sur le diagramme psychrométrique ou sur le diagramme température sèche – température humide, procurant un confort satisfaisant.

Les premiers travaux sont ceux de Yaglou publiés en 1929 par l'ASHVE (*American Society of Heating and Ventilating Engineers*), basés sur des essais en laboratoire d'une durée de 3 heures. Ils ont été suivis des travaux de Kosh en 1963, qui définissent des limites en indiquant des lignes d'iso-confort.

Après la mise au point de la nouvelle température effective (ET\*) et les essais de Nevins et Rohles, l'ASHRAE (*American Society of Heating and Refrigerating and Air conditioning Engineers*) publia en 1972 sur le même diagramme l'enveloppe de confort de Rohles.

Ultérieurement, la révision de la norme ASHRAE 55 pris en compte une double zone de confort pour distinguer les tenues d'hiver et d'été.

*h. Equation du confort de Fanger*

P.O. Fanger aborde la question du confort par l'expression du bilan thermique du corps plutôt que par la variation des conditions d'environnement. Son objectif est de présenter une méthode de prévision des sensations thermiques et du degré d'inconfort et de spécifier les conditions thermiques acceptables pour le confort.

Il met en place les trois conditions de confort thermique du corps (cf. §2.4.2) que nous rappelons :

- le bilan thermique nul,
- taux de sudation minimum
- température appréciable de la peau.

P.O. Fanger définit la température cutanée et l'évaporation régulatrice dans des conditions de neutralité thermique en fonction du métabolisme. Cette étude effectuée à partir d'expérimentation, lui a permis de définir les conditions optimales de confort thermique.

*i. Le PMV (Predicted Mean Vote) et le PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)*

Les équations de confort de P.O. Fanger permettent de déterminer si les conditions optimums sont respectées. Mais, ces formulations ne peuvent pas estimer le degré de satisfaction ou de non-satisfaction du sujet par rapport à une ambiance donnée.

Le PMV a pour objectif de calculer le vote de confort moyen de la population défini sur une échelle allant de -3 (très froid) à +3 (très chaud).

Le PPD, pourcentage prévisible d'insatisfaits, constitue quant à lui, le pourcentage de personnes non satisfaites par une ambiance donnée.

L'hypothèse principale des expressions du PMV et PPD, est que l'expression de la sensation thermique, est proportionnelle aux efforts des mécanismes régulateurs à fournir. Ces expressions ont été déterminées à partir de l'analyse de la variation moyenne de la sensation thermique exprimée par un groupe de personne.

*k. L'indice PMV\**

Gagge introduisit un critère de confort basé sur la mouillure cutanée, censé remédier aux lacunes du comportement du PMV par rapport aux ambiances humides. Il remplaça la température sèche par la nouvelle température équivalente  $ET^*$ , qui permet au PMV\* d'acquérir une meilleure sensibilité dans un environnement humide.

Seuls l'équation de confort de Fanger, le SET et le PMV prennent en compte les six variables dans leur intégralité :  $T_{air}$ ,  $T_{mrt}$ ,  $v$ ,  $P_a$ , le métabolisme et les conditions de vêture.

#### 2.4.3.2 Indices de stress thermique

##### *a. Taux de sudation prévu pour 4 heures d'exposition PS4R (Predicted Four-hour Sweat Rate)*

Il a été développé en 1947, au *Royal Naval Research Establishment* en Grande Bretagne, par Mc Ardle. Cet indice exprime la quantité de sudation d'un individu exposé à un environnement spécifique pendant 4 heures d'exposition. Il prend en compte le niveau métabolique du sujet, son activité et sa tenue en plus des conditions climatiques. Le TSP4 est empirique et n'a donc pas d'expression analytique. Il est présenté sous forme de diagramme qui exprimerait le degré de perturbation du corps plutôt qu'une prédiction de la qualité de sudation. Cet indice a été mesuré sur un groupe de personne, qui le rend difficilement extrapolable à d'autres groupes.

##### *b. Indice de Contrainte Calorifique I.C.C. (Heat Stress Index)*

Cet indice calculé par H.S. Belding et T.F. Hatch à l'université de Pittsburgh en 1955. Il est basé sur une formulation théorique de la contrainte thermique, pour un sujet soumis à un environnement donné et dépendant d'une chaleur métabolique variant avec l'individu, l'activité, le degré d'évaporation et de l'ambiance. L'expression du modèle d'échange thermique suppose une température de peau constante à 35°C et un taux de sudation nécessaire à la régulation égal à la production métabolique dont sont soustraits les pertes par rayonnement et par convection. Le I.C.C. est exprimé par le rapport entre le taux de sudation calculé et le taux de sudation maximum. Si le taux de sudation dans une situation donnée dépasse le taux tolérable, cela implique que le corps ne pourra maintenir sa température interne.

##### *c. Indice de Contrainte Thermique I.C.T. (Index of Thermal Stress)*

L'I.T.S. a été introduit par Givoni en 1963. C'est un modèle décrivant les mécanismes d'échange de chaleur entre le corps et l'environnement. Il considère le taux de sudation comme grandeur représentative du stress thermique. Il intègre le rayonnement solaire en plus des températures radiantes que nous présenterons de manière détaillée plus loin. Il est basé sur l'hypothèse que le taux de sudation produit par le corps est adapté au maintien de l'équilibre entre la production de chaleur métabolique et les échanges avec l'environnement. Cette hypothèse étant applicable dans un environnement où les conditions d'équilibre peuvent être maintenues.

Pour la plupart, ces indices ont été établis pour des conditions expérimentales contrôlées, obtenues en laboratoire sur des sujets définis (du point de vue de la posture, de la vêtue, de l'activité) et limitées (par rapport au nombre, aux tranches d'âge, sexe, poids, etc.).

Mais un certain nombre d'extrapolations de ces indices ainsi que des zones de confort ont pu être établis sur des situations extérieures (de posture, de vêtue,

et site) particulières. Cette extrapolation avait pour objectif de définir les situations de gênes éventuelles et d'être en mesure de les éviter.

Avant d'aborder la question de l'adaptabilité de ces indices à l'environnement climatique extérieur, il est nécessaire d'aborder la question du rayonnement, qui est le paramètre le plus discuté dans l'estimation du confort microclimatique urbain.

#### **2.4.4 Le rayonnement et le confort thermique**

Les aspects radiatifs constituent l'objet principal de notre travail. Nous ne traitons que des rapports entre milieux bâtis et radiatifs de la ville, mais ils jouent un rôle important dans la définition des ambiances thermiques.

L'étude des conditions de confort a révélé quatre facteurs d'inconfort :

- l'asymétrie de rayonnement,
- la température du plancher,
- le gradient vertical de température d'air,
- la sensation de courant d'air.

Deux facteurs sur quatre sont liés aux rayonnements thermiques. Ces facteurs ont surtout été analysés en milieu intérieur. Les réactions précises en milieu extérieur n'ont pas fait l'objet d'études plus poussées.

Nous essayerons de présenter dans la partie qui va suivre, l'influence du rayonnement sur la perception du confort ainsi que son expression, son interprétation et son éventuelle mesure.

Le corps humain peut être soumis à deux grands types de rayonnements : le rayonnement infrarouge thermique et le rayonnement solaire. Chacun d'eux induit des conditions d'inconfort qui lui sont propres, que nous distinguerons dans les deux parties qui vont suivre.

##### **2.4.4.1 Rayonnement de grande longueur d'onde**

Les échanges radiatifs en grande longueur d'onde sont exprimés dans les différents calculs d'indice rencontrés plus haut, soit par la prise en compte de la température de globe substituant la température de l'air, soit par des calculs plus complexes qui tentent de considérer la complexité des situations humaines (posture, vêtue, etc.), et thermiques des surfaces (température de surface, angle de vue, etc.).

Avant d'aborder la formulation mathématique des échanges de grandes longueurs d'onde quelques définitions s'imposent.

La température radiante est la température d'un corps noir qui effectuerait les mêmes échanges radiatifs qu'une surface donnée. Le milieu est considéré transparent.

La Température radiante moyenne  $T_{mrt}$  (MRT Mean Radiant Temperature), est la température d'une enceinte hémisphérique noire et uniforme située à un point donné, et qui effectue les mêmes échanges avec un environnement réel. Cette définition est indépendante de la température de la sphère testée où :

$$E_{4\pi} = \sigma \cdot T_{mrt}^4 \quad (2.42)$$

et l'environnement pouvant être assimilé à une enceinte constituée de  $i$  surfaces noires de température  $T_i$  où :

$$T_{mrt}^4 = \sum_i F_{xi} \cdot T_i^4 ; \quad (2.43)$$

La  $T_{mrt}$  se réfère toujours à une surface équivalente sphérique.

La température radiante effective se réfère à un corps particulier, testé dans un environnement et orientation particulière. Elle est la température d'une enceinte uniforme où une surface donnée exerce les mêmes échanges radiatifs qu'elle pourrait exercer avec un environnement réel.

$$T_{mrtx} = \left( \sum F_{xi} \cdot T_i^4 \right)^{1/4} \quad (2.44)$$

$x$  se référant à la surface considérée.

La température moyenne radiante, est une combinaison des températures des surfaces environnantes, pondérées par les angles solides sous lesquels le corps voit ces surfaces.

L'échange thermique par rayonnement infrarouge entre la personne et les objets environnants obéit à la loi de Stefan-Boltzmann, et s'écrit sous la forme :

$$R = \varepsilon \cdot f_{cl} \cdot f_{eff} \cdot h_r \cdot (T_{cl}^4 - T_{mrt}^4) \quad (2.45)$$

$f_{eff}$  facteur de surface de rayonnement effectif (dépend de la posture de l'individu).

$f_{cl}$  facteur de surface du vêtement

$h_r$  coefficient d'échange radiatif

	Valeur de $f_{eff}$	
	Fanger (1972)	Guibert et Taylor (1952)
Assis	0.70	0.70
Debout	0.72	0.78
Intermédiaire		0.72
Facteur de surface de la vêtue	$f_{cl} = 1 + 0.15I_{cl}$	

Tableau 2.7 Variation du  $f_{eff}$  suivant la posture de l'individu (McInthyre 1980).

Le facteur  $f_{eff}$  a été déterminé de manière photographique par Fanger (1972) et Gambert et Taylor (1952). Fanger après avoir étudié 20 sujets a adopté un  $f_{eff}= 0.71$ , considéré comme valeur la plus proche aussi bien pour des postures debouts et assises.

Pour le calcul de l'Indice de Contrainte Calorifique (I.C.C.), une formule simplifiée exprimant les échanges radiatifs en grandes longueurs d'onde a été établie :

$$R = 22 (T_{mrt} - T_s) \quad (2.46)$$

L'intégration de la température radiante dans les échanges convectifs naturels (C) se fait par le remplacement de la température de l'air ( $T_{air}$ ) par celle du globe ( $T_g$ ), dans l'expression suivante :

$$C = 2v^{0.5} (T_{air} - T_s) \quad (2.47)$$

Pour la plupart des estimations des échanges radiatifs en milieu intérieur, les calculs des facteurs de forme entre le corps humain et les surfaces environnantes, ont été simplifiés et le corps a été modélisé comme un élément sphérique. Cette simplification se trouve inadaptée pour des rayonnements dirigés ou contrastés vers laquelle la personne est orientée : ex. un radiateur, le soleil, etc. On utilise à ce moment là le facteur de surface projeté.

Quand une surface est confrontée à un flux énergétique dirigé, la quantité de flux interceptée dépend de la surface projetée  $A_p$  ( $m^2$ ) normale au flux.

$$A_p = f_p \cdot A_r = f_p \cdot f_{cl} \cdot f_{eff} \cdot A_{Du} \quad (2.48)$$

$f_p$  facteur de surface projetée qui dépend de la posture de la personne et de son orientation par rapport aux flux.

$f_p$  a été mesuré par Underwood et Ward (1966) et Fanger (1972) en utilisant la technique photographique. Une expression analytique peut être utilisée :

$$f_p = 0.00335 \cdot \sin \beta + 2.33 \cdot \cos \beta \cdot (0.0213 \cdot \cos^2 \alpha + 0.0091 \cdot \sin^2 \alpha)^{1/2} \quad (2.49)$$

$A_{Du}$  surface du corps calculée suivant l'expression de Du Bois.

$A_r$  surface radiative effective du corps

Les échanges radiatives du corps peuvent être très hétérogènes sur toute la surface de ce dernier; le corps peut subir des pertes radiatives et des gains sur des parties différentes. L'effet de ces échanges sur la température de la peau n'est pas très bien connu.

L'apport quantitatif radiant est estimé à travers la  $T_{mrt}$ . Le calcul de la température moyenne radiante est très complexe, et est souvent extrapolé à partir de la température de globe. Cette difficulté d'estimation de la  $T_{mrt}$  est due

à la complexité du calcul des facteurs de forme entre la surface du corps (nu ou vêtu) et les différentes surfaces l'environnant.

De manière expérimentale, la  $T_{mrt}$  d'un environnement donné est calculée à travers la mesure de la température radiante par un thermomètre inséré dans une sphère en cuivre noir de 10-15 cm de diamètre (cf. fig. 2.17).

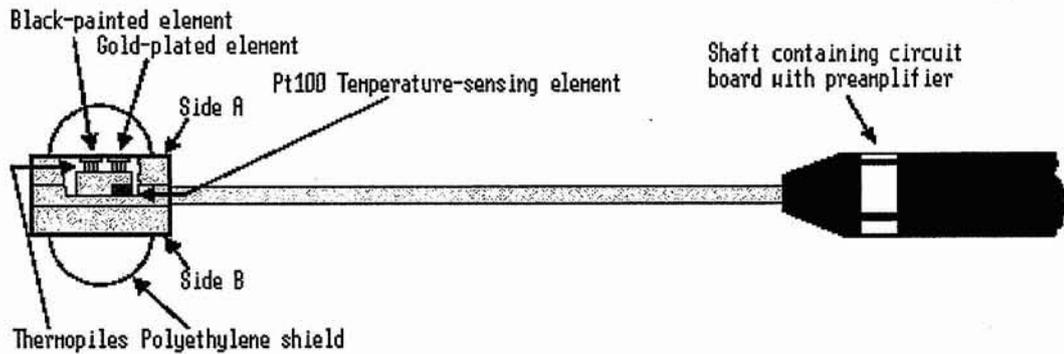


Figure 2.17 Appareil de mesure de la température moyenne radiante, et d'estimation des asymétries radiantes (Innova)

La formule d'estimation de la température moyenne radiante à partir de ce type d'instrument est :

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{h_{cg}}{h_r}(T_g - T_{air})}, \text{ avec :} \quad (2.50)$$

- $T_g$  température de globe
- $T_{air}$  température de l'air
- $h_{cg}$  coefficient de transfert convectif pour une sphère
- $h_r$  coefficient d'échange radiatif de la sphère

Le calcul de la température moyenne radiante, de manière analytique, peut s'effectuer à partir de l'estimation des températures radiantes des six surfaces environnant l'individu :

Personne assise :

$$t_{mrt} = \frac{0.18(t_{r\_dessus} + t_{r\_dessous}) + 0.22(t_{r\_droite} + t_{r\_gauche}) + 0.3(t_{r\_devant} + t_{r\_derrière})}{2(0.18 + 0.22 + 0.3)} \quad (2.51)$$

Personne debout :

$$t_{mrt} = \frac{0.08(t_{r\_dessus} + t_{r\_dessous}) + 0.23(t_{r\_droite} + t_{r\_gauche}) + 0.35(t_{r\_devant} + t_{r\_derrière})}{2(0.08 + 0.23 + 0.35)} \quad (2.52)$$

Il est clair que ces estimations (expérimentales ou analytiques) ne peuvent être représentatives de la complexité de la géométrie du corps, de la grande variation des températures de surface autour du corps. Ajoutons à cela la non-homogénéité géométrique et thermique de l'environnement.

Ces simplifications permettent une estimation synthétique de la  $T_{mrt}$  afin de pouvoir introduire les effets de rayonnement de surface dans les estimations du confort.

#### 2.4.4.2 Rayonnement solaire

Les rayonnements ont aussi bien un effet thermique que biologique sur l'homme. De manière biologique, le corps est affecté par les ultraviolets qui accentuent l'accumulation des pigments de mélanine dans les couches supérieures de la peau. De manière thermique, les rayonnements augmentent la température de la peau ou du vêtement et au-delà de celle du corps. Les effets du rayonnement solaire dépendent :

- de la posture de la personne par rapport au soleil ; une personne allongée reçoit plus d'ensoleillement qu'une personne debout,
- du vêtement, qui intercepte les rayonnements et qui les dissipe sous forme de chaleur, soit vers le corps, soit vers l'environnement, par émission (matériau, couleur), par convection ou conduction.
- de la réflexion de son environnement,
- de la vitesse de l'air relative, résultant aussi bien des mouvements d'air ou de la personne, qui participe à la dissipation de la chaleur à la surface du vêtement ou à celle de la peau. Une personne au repos est plus sujette aux rayonnements solaires qu'une personne en mouvement. Le mouvement favorise les déperditions de chaleur par convection.

Une étude expérimentale effectuée par Givoni (1969) a estimé que la quantité de rayonnement direct incident sur une personne légèrement vêtue portant un chapeau dans une position debout était de 70% de celle incidente sur un sujet assis le dos tourné au soleil. Ceci est valable pour les mois d'été à des latitudes comprises entre 35° nord et 35° sud et pour des heures comprises entre 9h et 15h. Par contre, la quantité de rayonnement réfléchi est de 50% inférieure pour un sujet assis par rapport à un sujet debout.

Les échanges de chaleur radiante, dues aux rayonnements solaires et utilisés dans l'estimation de l'indice de contrainte thermique (I.C.T.), se présentent comme suit :

$$R = I_N \cdot K_{pe} \cdot K_{cl} \cdot [1 - a \cdot (v^{0.2} - 0.88)] \quad (2.53)$$

$R$	charge calorifique du rayonnement solaire ( $Wm^{-2}$ )
$I_N$	rayonnement solaire normal incident ( $Wm^{-2}$ )
$K_{pe}$	coefficient dépendant de la position et du site
$K_{cl}$ et $a$	coefficients dépendant de la tenue vestimentaire
$v$	vitesse de l'air (m/s)

Position	Site	$K_{pe}$
Assis le dos tourné au soleil	Désertique	0,386
	Forêt	0,379
Debout le dos tourné au soleil	Désertique	0,306
	Forêt	0,266

Tableau 2.8 Valeurs du coefficient  $K_{pe}$  suivant les postures et le site (Givoni 1969)

Les effets du rayonnement solaire ne sont pas négligeables. Les gains thermiques solaires sont beaucoup plus importants que ceux résultants des rayonnements de surface. Leur régulation dans les ambiances chaudes extérieures devient nécessaire. La protection par l'ombre peut occasionner une diminution très importante des apports radiatifs solaires sur l'individu, mais peut se révéler insuffisante si l'individu est entouré de surfaces très chaudes.

Les espaces ombragés doivent être restreints pour des conditions climatiques d'hiver. En effet, les rayonnements solaires peuvent combler les insatisfactions dues au vent et à la température ambiante froide.

#### 2.4.4.3 Les effets du rayonnement sur le confort hygrothermique

Deux types d'influence sont à considérer quand il s'agit de rayonnement :

- influence du rayonnement solaire,
- influence thermique des surfaces environnant le sujet.

Très peu de travaux concerneront le premier point. Notons cependant les études expérimentales réalisées par K. Blazejczk et al. (1999) en Pologne. Plusieurs mesures ont été effectuées durant les mois de juillet 1996 et juillet 1997 sur de jeunes sujets (étudiants) exposés aux rayonnements solaires pendant 120-130 mn.

Deux principales situations de vêtue ont été analysées :

- sujets habillés,
- sujets demi-nus.

Une augmentation de la température de la peau a été observée pouvant atteindre 4-5°C de plus que la température normale. La température de la peau en dessous du vêtement est restée inchangée. Parallèlement à l'augmentation des pertes par sudation, une diminution de la production métabolique a été observée chez les sujets.

Les effets des variations de la température radiante par rapport à celle de l'air sur les réponses sensibles et physiologiques ne sont pas négligeables.

Une étude a été effectuée par Humphreys et al. (McIntyre 1980) sur des sujets portant des vêtements de régulation thermique de la Marine. Une augmentation moyenne de 22°C de la température radiante augmente la température rectale de 0,6°C et le rythme cardiaque de 15 battements /min. Une même étude a été effectuée sur des sujets peu vêtus par Macpherson (McIntyre 1980). L'élévation de la température radiante de 1°C augmente le taux de sudation de

11 g/h et la température rectale de 0,065°C. Ces résultats ont été moyennés sous différentes conditions de température d'air, de pression de vapeur et de vitesse de l'air. Houghten a testé sur des personnes vêtues en tenue d'hiver la variation de la température radiante, qu'il estime équivalente à un changement de 0,5°C de la température effective et de 0,75°C de la température de l'air pour une variation de la  $T_{mrt}$  égale à 1°C.

L'influence de la température radiante sur la perception du confort est plus marquée pour des températures d'air élevées.

#### *Asymétrie de rayonnement*

L'asymétrie de rayonnement est due à des différences remarquables des températures rayonnantes qui entourent l'individu. Dans un environnement intérieur, les types d'asymétrie observés sont liés aux oppositions : - plancher plafond, - paroi / vitrage. En milieu extérieur, les asymétries peuvent être observées entre surfaces à l'ombre et surfaces au soleil, entre rayonnement de surface et celui du ciel.

L'inconfort ne dépend pas seulement de la température ambiante mais également du degré de variation des températures radiantes autour de l'individu, par exemple : une paroi vitrée froide, un feu de cheminée, etc. qui sont indépendants de la température ambiante. Les références ISO7730 exigent une asymétrie inférieure à 10°C pour les parois vitrées et inférieure à 5°C pour le plafond.

McIntyre (1980) formule les conditions de confort liées à l'asymétrie radiante par l'expression suivante (cas de fenêtre) :

$$T_{mrt} - T_{s\_ext} + F_{pf} (T_{s\_ext} - T_f) < 8 \quad (2.54)$$

$F_{pf}$  facteur de forme entre une surface plane se trouvant au point testé et la fenêtre.

$T_{s\_ext}$  température de la surface externe de la paroi (°C)

$T_f$  température de la fenêtre (°C)

Cette expression englobe aussi bien l'inconfort dû aux différences de températures radiantes, qu'au mouvement d'air que ces différences peuvent occasionner.

Ainsi, une distance minimum a pu être établie par rapport à la paroi vitrée. L'asymétrie est exprimée par le vecteur de température radiante. Nous pouvons définir ce dernier, comme la différence moyenne entre les températures radiantes d'une pièce, pondérée par le facteur de forme d'une surface plane se trouvant à un point ( $p$ ) de la pièce.

Ce vecteur se formule comme suit :

$$T_v = F_{pc} (T_c - T_v) \quad (\text{McIntyre 1980}) \quad (2.55)$$

- $T_v$  vecteur de température radiante
- $T_c$  température des surfaces de la pièce non chauffée
- $T_u$  température de la surface chauffée
- $F_{pc}$  facteur de forme entre la surface se trouvant au point P et la pièce.

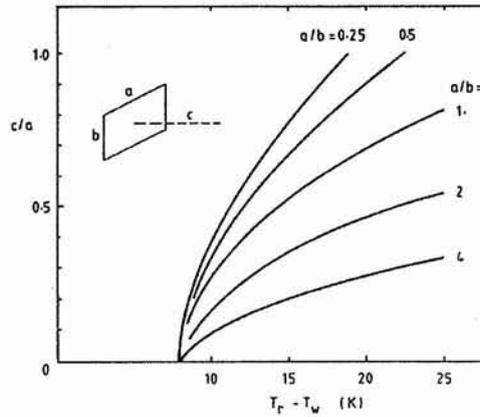


Figure 2.18. Le diagramme ci-contre exprime les distances confortables minimum  $c$  entre une fenêtre de taille  $(a \times b)$  en fonction de la différence entre température radiante de la pièce et la température de la fenêtre.

Cette asymétrie est mesurable en intérieur en comparant les températures radiantes opposées de chaque côté d'une sphère dotée d'une surface plane noire (cf. fig.2.18 : Appareil de mesure de la  $T_{mrt}$ ).

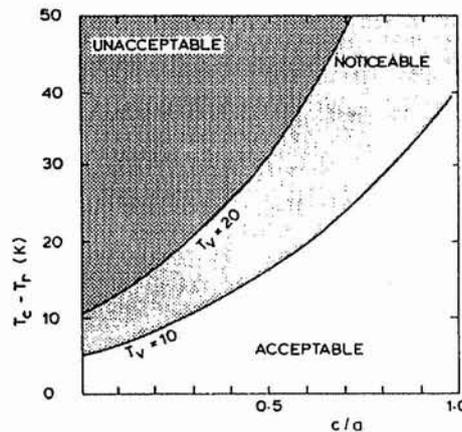


Figure 2.19 Le diagramme ci-contre exprime l'élévation de température tolérable pour un panneau de taille  $(a \times a)$  se trouvant à une distance  $c$  au-dessus du sujet

Bien que ces recommandations aient été établies pour un environnement intérieur, elles expriment la sensibilité du sujet par rapport aux variations des températures radiantes. Celles-ci ne sont pas absentes en milieu extérieur. Si en milieu intérieur les variations des températures radiantes sont très faibles (sauf en présence de parois vitrées ou chauffées), en milieu extérieur, les conditions

peuvent varier avec les différents types de paroi de façade (conductance, albédo), avec leur condition d'ensoleillement (orientation, etc.), et leurs conditions internes (chauffage, climatisation), etc. Cette complexité urbaine, est loin d'atteindre l'homogénéité de l'environnement intérieur.

Les sources d'inconfort cités plus haut, que nous avons tenté d'expliquer à partir du contexte de l'espace d'habitation peuvent donc s'interpréter de manière analogue en milieu extérieur c'est-à-dire :

- asymétrie du rayonnement,
- température de surface,
- gradient vertical et horizontal des températures,
- sensation de courant d'air et effets mécaniques du vent,
- rayonnement solaire incident,

...

Très peu de recherche ont tenté de mettre en exergue ces aspects en milieu extérieur.

#### **2.4.5 Indices de confort en milieu extérieur**

L'étude et le développement des zones de confort en milieu extérieur dépendent de la prise en compte de deux facteurs importants qui sont les rayonnements solaires et infrarouges de l'environnement urbain. Le vent est introduit en tant que facteur d'échange convectif forcé. Nous retiendrons quelques auteurs qui ont tenté d'interpréter le facteur rayonnement dans l'écriture du bilan thermique du corps humain et également dans la définition de nouvelles interprétations des indices de confort développés en milieu intérieur. Les facteurs de rayonnement, ne sont pas seulement introduits dans les expressions d'échange radiatif du corps avec son environnement. Ils apparaissent également dans les échanges convectifs purs que peuvent induire les différences de températures importantes dues à l'influence solaire.

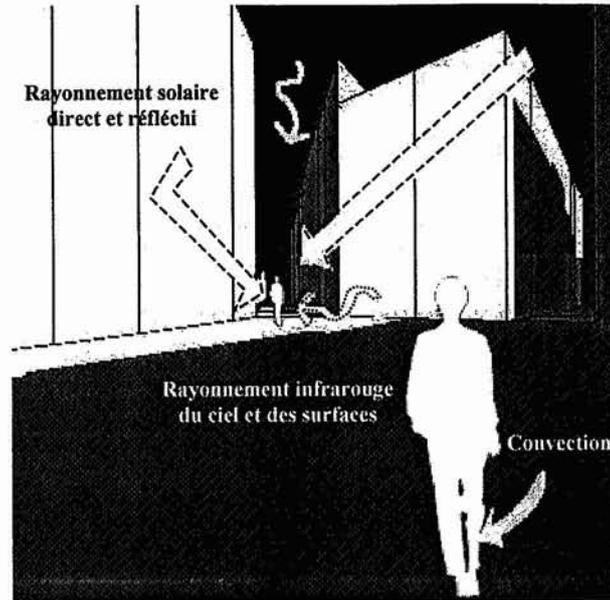


Figure 2.20 Les échanges thermiques de l'individu avec son environnement extérieur.

Nous introduisons les différents travaux, concernant la prise en compte des facteurs solaires et thermiques dans l'estimation du confort, par ceux de H. Pénicaud. En effet, il est un des rares auteurs à avoir consacré une partie de leurs publications, au confort thermique extérieur.

*H. Pénicaud (1978) :*

La différence dans l'expression du confort en milieu extérieur réside pour l'auteur dans la définition d'une température radiante moyenne, prenant en considération le rayonnement solaire, celui du ciel et des surfaces environnantes, et dans la définition de la température moyenne de la surface externe du sujet.

Le terme radiatif introduit dans le bilan thermique corporel est :

$$R^* = R_{GLO} + R_{CLO} \quad (2.56)$$

Les grandeurs sont exprimées en (Kcal/h)

avec :

$$R_{GLO} = -A_{eff} \varepsilon_{corps} \sigma [T_{cl}^4 - T_{mrt}^4] \quad (2.57)$$

et,

$$R_{CLO} = \frac{\rho}{A_{Du}} \left[ A_p I + D_i + A_{eff} \sum_i \alpha_i I_i F_i \right] \quad (2.58)$$

$A_{eff}$  surface radiante effective du corps habillé égale à  $0.7 f_{cl} A_{Du}$

$R_{CLO}$  échanges radiatifs de courtes longueurs d'onde

$R_{GLO}$  échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde

$D_i$  rayonnement solaire incident sur  $i$   
 $\alpha_i$  réflectivité de la surface d'indice  $i$   
 $F_i$  facteur d'angle entre la personne et la surface d'indice  $i$   
 $\rho$  absorptivité du corps habillé

Les conditions du ciel peuvent être considérées comme isotropes :

$$D_i = \frac{F_{ciel}}{0.5} D \quad (2.59)$$

ou comme non isotropes :

$$D_i = \int_{ciel} A_p(\alpha, \beta) D(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (2.60)$$

$D$  rayonnement solaire diffus  
 $F_{ciel}$  facteur d'angle entre le ciel et la surface d'indice  $i$

La température moyenne quant à elle se définit par l'équation suivante :

$$\sigma T_{mrt}^4 = \sum_i [\varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) L_i] F_i + \frac{F_{ciel}}{0.5} L \downarrow \quad (2.61)$$

$L \downarrow$  rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde.

La température du vêtement dépend de la résolution de la relation suivante :

$$T_{cl} = 35.7 - 0.032 \frac{M}{A_{Du}} (1 - n) - 0.18 I_{cl} \left[ 3.4 \cdot 10^{-8} f_{cl} (T_{cl}^4 - T_{mrt}^4) - \frac{R_{CLO}}{A_{Du}} + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \right] \quad (2.62)$$

$n$  rendement métabolique  
 $M$  production métabolique

*S. Alvares Domingues et al. (1992) :*

Des améliorations ont été effectuées sur le bilan thermique du sujet de P.O. Fanger, et cela afin d'étudier le confort thermique dans les espaces de l'Exposition de Séville en 1992. Le bilan de confort est considéré comme nul pour un taux de sudation acceptable. Cette hypothèse est adaptée pour un climat principalement chaud.

Deux expressions radiatives sont introduites dans les équations de bilan thermique du corps. Elles correspondent aux apports radiatifs dans les bandes spectrales solaires et infrarouges.

*Rayonnement de courte longueur d'onde :*

$$\Delta R_{CLO} = \frac{\rho_{sk} \tau_{cl} \phi}{f_{cl}} \quad (2.63)$$

$\Delta R_{CLO}$  flux solaire absorbé par la peau exprimé par son rapport aux flux solaires incidents ( $\phi$ ).

$\tau_{cl}$  transmittivité du vêtement  
 $\rho_{sk}$  absorptivité de la peau

Rayonnement de grande longueur d'onde :

$$\Delta R_{GLO} = h_r f_{cl} (T_{cl} - T_{mrt}) \quad (2.64)$$

Cette expression représente le flux radiatif de grandes longueurs d'onde perdu à la surface extérieure de l'individu. Elle dépend de la température du vêtement ( $T_{cl}$ ) et de la température moyenne radiante ( $T_{mrt}$ ).

La température moyenne radiante est définie par :

$$T_{mrt} = \frac{\rho_{cl} \phi}{h_r} + (\sum F_{si} T_i^4)^{0.25} \quad (2.65)$$

$\rho_{cl}$  absorptivité du vêtement

*L. Serres (1997) :*

Ce travail tente d'intégrer les effets du rayonnement solaire aussi bien sur les échanges radiatifs que convectifs. La situation analysée est celle d'un individu se trouvant dans un espace intérieur exposé aux rayonnements solaires à travers une baie vitrée.

L'auteur définit les nouvelles expressions de température de vêtement ( $T_{cl}^*$ ) de rayonnement infrarouge ( $R^*$ ) de l'environnement et les échanges convectifs ( $C^*$ ) comme suit :

$$T_{cl}^* = T_{sk} - 0.155 I_{cl} (R^* + C^* + \phi) \quad (2.66)$$

$$R^* = f_{eff} f_{cl} \varepsilon \sigma (T_{cl}^4 - T_{mrt}^4) \quad (2.67)$$

$$C^* = 2.38 f_{cl} (T_{cl}^* - T_a)^{1.25} \quad (2.68)$$

L'expression de la température moyenne radiante reste inchangée. L'augmentation du PMV provoquée par la prise en compte des phénomènes solaires est définie comme suit :

$$\underbrace{\Delta PMV}_{\text{Augmentation du PMV}} = A' \left[ \underbrace{\phi - F_{eff} f_{cl} \varepsilon \sigma (T_{cl}^{*4} - T_{cl}^4)}_{\text{Augmentation des pertes radiatives}} - \underbrace{2.38 f_{cl} [(T_{cl}^* - T_a)^{1.25} - (T_{cl} - T_a)^{1.25}]}_{\text{Augmentation des pertes convectives}} \right] \quad (2.69)$$

La prise en compte de la convection forcée due à la ventilation transforme l'équation d'augmentation du PMV en ce qui suit :

$$\underbrace{\Delta PMV}_{\text{Augmentation du PMV}} = A' \left[ 1 - \underbrace{\frac{coef2}{1+coef1+coef2}}_{\text{Augmentation des pertes radiatives}} - \underbrace{\frac{coef1}{1+coef1+coef2}}_{\text{Augmentation des pertes convectives}} \right] \phi \quad (2.70)$$

avec,

$A'$  coefficient empirique défini par :  $A' = 0.303 e^{(-0.036M)} + 0.028$

$$coef1 = 1.875 f_{cl} \sqrt{v} I_{cl} \quad (2.71)$$

$$coef2 = 0.62 F_{eff} f_{cl} \varepsilon \sigma \bar{T}^3 I_{cl} \quad (2.72)$$

$$\bar{T} = \frac{T_{cl} + T_{mrt}}{2} \quad (2.73)$$

La prise en compte du rayonnement solaire dans l'expression du PMV bouleverse selon l'auteur l'échelle établie par Fanger (-3 à +3). Pour un individu présentant des caractéristiques métaboliques standards et un flux incident moyen de  $40(\text{Wm}^{-2})$ , le PMV augmente de 1.18.

*Matzarakis et al. (1998) :*

Les auteurs définissent une nouvelle température équivalente PET (*Physiologically Equivalent Temperature*) qui correspond à la température d'une enceinte fictive induisant les mêmes échanges thermiques avec l'individu que dans des conditions extérieures urbaines soumises aux rayonnements solaires. PET est un indice standardisé pour une production métabolique de 80 (W) et une résistance thermique du vêtement de 0.9.

L'expression de la densité de flux moyenne absorbée par le corps ( $S_{str}$ ) est :

$$S_{str} = \sum_i^6 W_i (\rho_{CLOK} I_i + \rho_{GLO} L_i) \quad (2.74)$$

$\rho_{CLO}$  coefficient d'absorption des rayonnements de courtes longueurs d'onde.

$\rho_{GLO}$  coefficient d'absorption des rayonnements de grandes longueurs d'onde.

$W_i$  est le facteur de pondération des flux mesurés par rapport à six directions : nord, sud, est, ouest, au-dessus et au-dessous de l'individu. La température moyenne radiante est définie par :

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\frac{S_{str}}{\alpha_{GLO} \sigma}} - 273.2 \quad (2.75)$$

$\alpha_{GLO}$  coefficient de réflexion des rayonnements de grandes longueurs d'onde.

*J.Pickup et al. (1999) :*

Un indice de confort extérieur OUT\_SET\* constitue l'objectif de cette recherche. Cet indice est une version étendue aux conditions urbaines du SET\* (*New Standard Effective Temperature*). Il se définit de la même manière, c'est-à-dire la température d'une enceinte fermée présentant la même température de peau et mouillure cutanée.

$$R_{cLO} = A_p (1 - \alpha_{cl}) I + f_{eff} (1 - \alpha_{cl}) (D + (I + D) \alpha_{sol}) \quad (2.76)$$

$$R_{gLO} = f_{eff} \sigma \left( \frac{\epsilon_{ciel}}{2} T_{air}^4 + \frac{\epsilon_{sol}}{2} T_{air}^4 - \epsilon_{corps} T_{corps}^4 \right) \quad (2.77)$$

$$Out\_T_{mrt} = \left[ \left( \frac{\epsilon_{ciel}}{2} + \frac{\epsilon_{sol}}{2} \right) T_{ciel}^4 + \frac{A_p (1 - \alpha_{cl})}{f_{eff} \sigma} I \downarrow + \frac{(1 - \alpha_{cl}) (D + (D + I) \alpha_{sol})}{\sigma} \right]^{0.25} \quad (2.78)$$

- $\alpha_{sol}$  réflectivité solaire du sol
- $\epsilon_{ciel}$  émissivité du ciel
- $\epsilon_{sol}$  émissivité du sol
- $\epsilon_{corps}$  émissivité du corps
- $T_{corps}$  température du corps

Le rayonnement est introduit principalement dans le bilan de confort de Fanger (cf. §2.4.3.1.h) et cela en prenant donc en considération le rayonnement solaire et infrarouge. Le rayonnement est défini généralement par trois facteurs :

- la température moyenne radiante ; qui se trouve exprimée soit de manière complexe et cela par la relation entre température de surfaces et facteurs de forme entre le corps et ces dernières, ou exprimée de manière plus simplifiée à partir d'un facteur d'incidence moyen du rayonnement,
- le rayonnement absorbé par la peau et le vêtement à travers le phénomène de conduction, et cela en considérant un facteur d'incidence solaire,
- les échanges convectifs dus aux différences de températures entre vêtement et surfaces environnantes et entre vêtement et la peau.

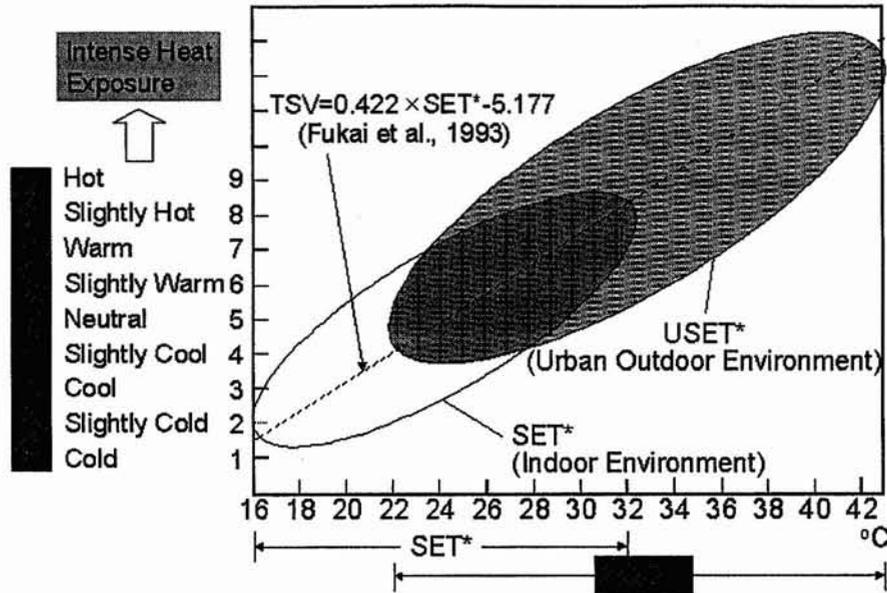


Figure 2.21 Comparaison du USET\* (SET\* développé en extérieur) au SET\* appliqué au Japon. Etude réalisée par Saitoh Laboratory Energy Systems and Environment Laboratory, Université de Tohoku (<http://www.mech.tohoku.ac.jp/>).

La remarque la plus importante à faire, est que la modification du bilan de confort, par l'introduction des phénomènes de rayonnement, ne constitue pas une démarche de redéfinition du confort suffisante pour les conditions extérieures. L'absence des facteurs subjectifs liés à la perception dans la définition des indices de confort, rend leur interprétation difficilement envisageable. Même s'il est possible de définir, si une ambiance thermique extérieure induit une sollicitation des mécanismes de régulations minimum, cela ne veut en aucun cas dire, que la personne est dans une situation de bien-être. Seules des campagnes d'enquête sur des personnes sollicitées par des manifestations climatiques ou similaires peuvent répondre à ce type de questionnement.

## 2.5 Conclusion

Dans le cadre de l'introduction des enjeux climatiques environnementaux actuels, nous avons présenté, de manière synoptique et synthétique les différents types d'introduction des phénomènes microclimatiques dans la conception urbaine. Le climat aujourd'hui n'est plus seulement considéré par ces aspects de réduction de la consommation d'énergie et d'augmentation du confort intérieur. Les enjeux environnementaux remettent effectivement la problématique de la qualité de l'espace urbain en avant et cela aussi bien dans le cadre de la recherche que dans celui des politiques d'action urbaine. Ils soulignent également l'interdépendance de ces deux domaines (la recherche et

la pratique urbaine), bien que cette dernière pose le problème des tensions existantes entre les experts et les élus. Ces tensions sont dues à la difficulté de compréhension et de prise de décision des élus sur des aspects environnementaux physiques de la ville.

Avant d'aborder la question de la recherche climatique, il nous a paru nécessaire de définir le climat urbain et ses spécificités. La recherche microclimatique au niveau des trois échelles : méso, canopée, espace urbain, évolue de manière plus poussée, sur les deux premières échelles. Deux types de développement ont été répertoriés : les mesures et les simulations. Les mesures révèlent les problèmes de maîtrise spatiale des données physiques et de leur interprétation comme moyen d'information des conditions climatiques urbaines. La simulation, quant à elle, sous l'égide de la question de l'interprétation fidèle de la réalité physique de la ville, tente de mettre en œuvre une modélisation tridimensionnelle de l'espace urbain sur le plan géométrique et un couplage de plusieurs phénomènes (convectifs, radiatifs et d'évapotranspiration) sur le plan de la modélisation physique.

Par notre travail, nous posons la question de la mise en œuvre d'un système de modélisation/simulation, en vue de la compréhension et la mise en exergue de facteurs transversaux. Ces derniers mettent en relation les facteurs géométriques et physiques du climat. Très peu de travaux prétendent aborder ces questions. Les climatologues développent souvent leur recherche dans le cadre d'une investigation purement physique et rarement transversale intéressant les milieux de la pratique urbaine. L'étude la plus représentative de nos cadres d'investigation, est le développement de répertoire des effets du vent en rapport avec la forme du bâtiment. Ce répertoire a été effectué par le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) (Gandemer et al. 1976). Les recommandations ressorties de manière générale se distinguent suivant les conditions de forme, de direction et de vitesse du vent.

Bien que nous n'étudions que les phénomènes physiques radiatifs, la perception est un facteur à considérer dans la définition des ambiances urbaines.

Cependant, le confort en milieu extérieur est plus complexe et plus difficilement maîtrisable, qu'en milieu intérieur. En effet, la détermination du confort dépend de plusieurs niveaux d'interprétation qui sont d'ordre spatial, thermique, corporel, individuel et culturel (cf. fig.2.22). Cette complexité explique sans doute la rareté des travaux sur le confort en milieu extérieur et notamment ceux tentant de prendre en considération les aspects subjectifs de la perception thermique des ambiances.

Toujours dans le cadre de la recherche transversale, ce qui nous semble intéressant, c'est de définir les effets de la forme urbaine sur les phénomènes climatiques, ainsi que leur implication dans la détermination de l'ambiance et du confort dans l'espace urbain. Il est évident que ce type d'investigation

demande une définition plus cernée de la perception du confort en milieu extérieur. Il faut également mettre en évidence, les relations entre les phénomènes climatiques thermiques, le confort thermique et les caractéristiques de l'espace.

Pour cela, il faudra mettre en œuvre une investigation permettant de croiser les aspects formels de l'espace, thermiques du climat, et corporels psycho-culturels et sociaux du sujet.

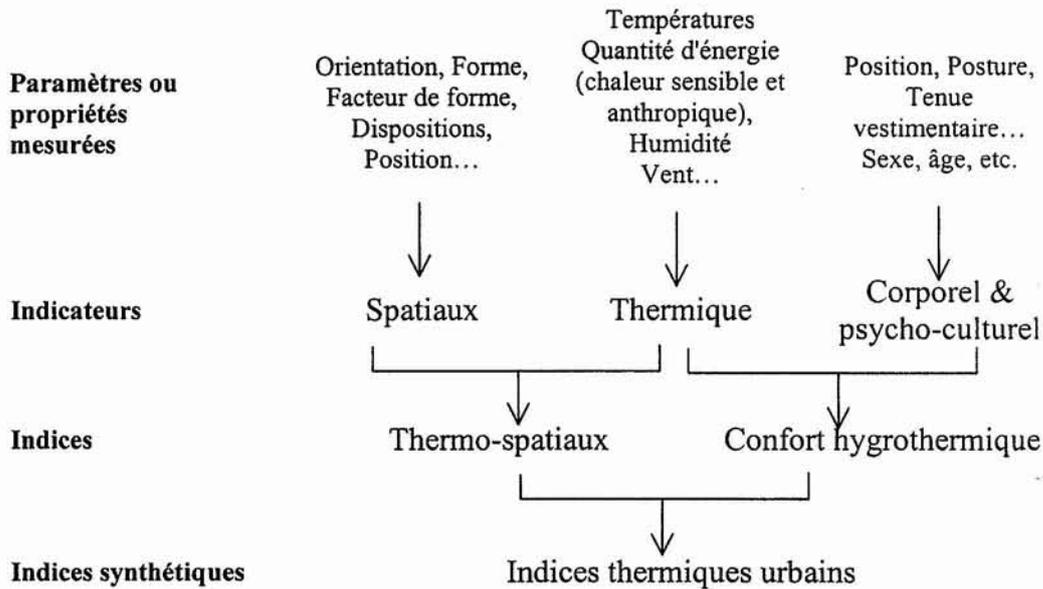


Figure 2.22 Modélisation des indices de confort extérieur

Cependant, avant de pouvoir croiser ces trois champs, il est important de cerner les relations existantes entre le spatial et le thermique, parallèlement à celles entre le thermique et le psycho-culturel.

Le corpus actuel répondant à cette problématique d'interface entre les aspects physiques du climat et la forme urbaine reste très peu développé. Il nous semble important d'orienter notre investigation vers ce type d'interrogation, parallèlement aux études effectuées sur le confort thermique extérieur. La mise en forme de notre proposition de recherche sera présentée lors des prochains chapitres. Nous aborderons en premier lieu, notre approche en vue de la modélisation des interactions entre forme et phénomènes.

## Nomenclature du chapitre

$A_r$	surface radiative effective du corps ( $m^2$ ),
$A_{Du}$	surface du corps calculée suivant l'expression de Du Bois ( $m^2$ )
$A_{eff}$	surface radiante effective du corps habillé égale à $0.7 f_{cl} A_{Du}$ ( $m^2$ )
$A_p$	surface du corps habillé projetée sur un plan perpendiculaire aux flux incidents ( $m^2$ )
$C$	pertes par convection ( $Wm^{-2}$ )
$C_{res}$	pertes par respiration ( $Wm^{-2}$ )
$C^*$	nouvelle expression des échanges convectifs
$C_p$	capacité calorifique ( $J/KgK$ )
$CLO$	courtes longueurs d'onde
$e$	pression de vapeur d'eau (Pa)
$D_{(\alpha,\beta)}$	rayonnement diffus dans la direction $(\alpha,\beta)$ du soleil ( $Wm^{-2}$ )
$D$	rayonnement solaire diffus ( $Wm^{-2}$ )
$D_p$	rayonnement diffus reçu effectivement ( $Wm^{-2}$ )
$E$	pertes par évaporation ( $Wm^{-2}$ )
$E_{is}$	perte par diffusion de vapeur à travers la peau ( $Wm^{-2}$ )
$E_{sw}$	perte due à la sudation ( $Wm^{-2}$ )
$E_{res}$	pertes par évaporation due à la respiration ( $Wm^{-2}$ )
$ET$	température effective ( $^{\circ}C$ )
$ET^*$	nouvelle température effective ( $^{\circ}C$ )
$F$	efficacité de refroidissement de la sueur (sans dimension).
$F_{si}$	facteur de forme entre le corps et la surface d'indice $i$ (sans dimension)
$F_{ciel}$	facteur d'angle entre le corps et le ciel (sans dimension)
$F_{pf}$	facteur de forme entre une surface plane se trouvant au point testé et la fenêtre.
$f_{cl}$	facteur de surface de vêture, est égal au rapport de la surface extérieure de la personne vêtue sur la surface du corps nu
$f_{eff}$	facteur de surface effective de rayonnement
$f_p$	facteur de surface projetée
$g$	accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ )
$GLO$	grandes longueurs d'onde
$h_{cg}$	coefficient de transfert convectif pour une sphère ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )
$h_r$	coefficient d'échange radiatif ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )
$h$	coefficient d'échange convectif ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )
$I$	rayonnement direct de courte longueur d'onde reçu sur une surface perpendiculaire aux rayons ( $Wm^{-2}$ )
$I_N$	flux solaire normal incident ( $Wm^{-2}$ )
$I_{cl}$	résistance thermique du vêtement (sans dimension)
$L\downarrow, L$	rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde ( $Wm^{-2}$ )

$L_i$ et $L_i\downarrow$	rayonnement de grandes longueurs d'onde reçu par la surface d'indice i ( $Wm^{-2}$ )
$L_i\uparrow$	rayonnement de grandes longueurs d'onde émise par la surface d'indice i ( $Wm^{-2}$ )
$L^*$	bilan radiatif de grandes longueurs d'onde ( $Wm^{-2}$ )
$K\downarrow$	flux de courtes longueurs d'onde reçu par une surface ( $Wm^{-2}$ )
$K\uparrow$	rayonnement de courtes longueurs d'onde émise par la surface d'indice i ( $Wm^{-2}$ )
$K^*$	bilan radiatif de courtes longueurs d'onde ( $Wm^{-2}$ )
$K_{cl}$ et $a$	coefficients dépendant de la tenue vestimentaire
$K_{pe}$	coefficient dépendant de la position et du site
M	métabolisme, la chaleur produite par le corps ( $Wm^{-2}$ )
n	rendement métabolique
PET	<i>Physiologically Equivalent Temperature</i> ( $^{\circ}C$ )
Q	changement de la quantité de chaleur du corps ( $Wm^{-2}$ )
$Q_{conv}$	chaleur transmise par convection radiatif ( $Wm^{-2}$ )
$Q_{cond}$	chaleur transmise par conduction radiatif ( $Wm^{-2}$ )
$Q_E$	chaleur latente nécessaire à l'évaporation ou à la condensation ( $Wm^{-2}$ )
$Q_G$	chaleur transmise par conduction radiatif ( $Wm^{-2}$ )
$Q_H$	chaleur transmise par mouvement d'air radiatif ( $Wm^{-2}$ )
$Q_{rad}, Q^*$	bilan radiatif ( $Wm^{-2}$ )
$Q$	bilan énergétique ( $Wm^{-2}$ )
R	pertes radiatives ( $Wm^{-2}$ )
$R^*$	nouvelles expression des échanges par rayonnement
$R\downarrow$	rayonnement de grandes longueurs d'onde réfléchi ( $Wm^{-2}$ )
$R_{i\_env}$	rayonnement solaire réfléchi par la surface d'indice i ( $Wm^{-2}$ )
$R_{env\_i}$	rayonnement solaire réfléchi par l'environnement et reçu par la surface d'indice i ( $Wm^{-2}$ )
RT	température résultante de Missenard ( $^{\circ}C$ )
S	taux de sudation requis ou équivalent ( $Wm^{-2}$ )
$S\downarrow$	rayonnement solaire direct incident ( $Wm^{-2}$ )
$S_{str}$	densité de flux moyenne absorbée par le corps ( $Wm^{-2}$ )
$S_1, S_2$	surfaces des éléments 1 et 2.
SET	température effective standard ( $^{\circ}C$ )
SET*	nouvelle température effective standardisée ( $^{\circ}C$ )
$T_{air}$	température de l'air ( $^{\circ}C$ ou K)
$T_s$	température équivalente du ciel ( $^{\circ}C$ ou K)
$T_c$	température des surfaces de la pièce non chauffée ( $^{\circ}C$ )
$T_{cl}$	température moyenne de surface de la personne vêtue ( $^{\circ}C$ )
$T_{cl}^*$	nouvelle expression de la température du vêtement ( $^{\circ}C$ )
$T_{corps}$	température du corps ( $^{\circ}C$ )
$T_f$	température de la fenêtre ( $^{\circ}C$ )
$T_g$	température de globe ( $^{\circ}C$ ou K)

$T_i$	température de la surface d'indice $i$ (°C ou K)
$T_{mrt}$	température moyenne rayonnante de l'ambiance (°C ou K)
$t_{mrt}$	température radiante moyenne (°C)
$T_s$	température de la peau (°C ou K)
$T_{s\_ext}$	température de la surface externe de la paroi (°C)
$T_u$	température de la surface chauffée (°C)
$T_v$	vecteur de température radiante
$v, vm$	vitesse (moyenne) de l'air (m/s)
$W_i$	facteur de pondération des flux mesurés
$W$	énergie métabolique transformée en travail mécanique ( $Wm^{-2}$ )
$\alpha$	angle azimut mesuré sur un plan horizontal par rapport à la direction entre le corps et le flux (degrés°)
$\alpha_{cl}$	réflectivité du vêtement (sans dimension)
$\alpha_{CLOi}$	coefficient de réflexion de courtes longueurs d'onde de la surface d'indice $i$ (sans dimension)
$\alpha_{GLOi}$	coefficient de réflexion de grandes longueurs d'onde de la surface d'indice $i$ (sans dimension)
$\alpha_{sol}$	réflectivité solaire du sol (sans dimension)
$\beta$	hauteur angulaire mesurée par rapport à une surface horizontale et la source (degrés°).
$\delta$	coefficient de dilatation volumique ( $K^{-1}$ )
$\Delta R_{CLO}$	échanges radiatifs de courtes longueurs d'onde
$\Delta R_{GLO}$	échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde
$\varepsilon$	émissivité de la peau (sans dimension)
$\varepsilon_{ciel}$	émissivité du ciel
$\varepsilon_{sol}$	émissivité du sol
$\varepsilon_{corps}$	émissivité du corps
$\varepsilon_i$	émissivité de la surface d'indice $i$ (sans dimension)
$\phi$	flux solaire incident ( $W/m^2$ )
$E_{12}$	flux émis par $S_1$ et qui atteint $S_2$ (W)
$E_1$	flux total émis par $S_1$ (W)
$\phi_{12}$	densité de flux émis par $S_1$ et qui atteint $S_2$ ( $Wm^{-2}$ )
$\phi_1$	densité de flux émis par $S_1$ ( $Wm^{-2}$ )
$\mu$	masse volumique ( $Kg/m^3$ )
$\lambda$	conductivité thermique ( $W/mK$ )
$\theta 1$ et $\theta 2$	angles entre normales
$\rho_{CLO}$	coefficient d'absorption solaire du corps habillé (sans dimension)
$\rho_{GLO}$	coefficient d'absorption thermique du corps habillé (sans dimension)
$\rho_{sk}$	absorptivité de la peau
$\rho_{cl}$	absorptivité du vêtement

$\tau_{cl}$	transmittivité du vêtement
$\tau$	transmittivité
$\nu$	viscosité (Kg/ms)

*Coordonnées solaires*

$\gamma$	angle entre normale du plan récepteur avec celui du méridien
$\alpha$	azimut
$h$	hauteur
$i$	angle entre le plan formé par la normale et le plan récepteur
$\varphi$	latitude du lieu
$\delta$	déclinaison solaire
$AH$	angle horaire

## Références bibliographiques du chapitre

- [Innova] <http://www.innova.dk/>
- [ 1992] Maisons solaires, maison d'aujourd'hui. A la recherche des ambiances, Avignon : Les Presses de Provence 1992, 36p.
- [Aida 1982] Masaru Aida  
Urban albedo as a function of the urban structure. Part1: a model experiment/ Boundary-Layer Meteorology vol.23 405-413p.
- [Aida et al. 1982] Masaru Aida, Kiyoshi Gotoh  
Urban albedo as a function of the urban structure. Part 2: A two dimensional numerical simulation / Boundary-Layer Meteorology vol.23 415-424p.
- [Alberti 1965] L. B. Alberti  
Ten books on architecture. London : Alec Tiranti 1965 344p.
- [Alvarez Dominguez et al. 1992] S. Alvarez Dominguez, J. Cejudo Lopez, J. J. Guerra Macho et al.  
Control climatico en espacios abiertos. Proyecto Expo'92 / Sevilla : Universidad de Sevilla 1992 195p.
- [Arnfield et al. 1994] A.J. Arnfield, G. Mills  
An analysis of the circulation characteristics and energy budget of a dry asymmetric, east-west urban canyon. I. Circulation characteristics / International Journal of Climatology vol.14 119-134p.
- [Auriault 1979] J.-P. Auriault  
Construire avec le climat, Paris : Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie 1979
- [Bardet 1943] G. Bardet  
Le facteur soleil en urbanisme / Technique et architecture vol. 7-8
- [Blazejczyk, Tokma, Bortkiewicz et al. 1999] K. Blazejczyk, H. Tokma, A. Bortkiewicz et al.  
Solar radiation and thermal physiology in man, in : Proceedings of the International Congress of Biometeorology & International Conference on urban climatology, Sydney 8-12 Nov. Australia [CD-ROM]. Sydney: Macquarie University, 6p.
- [Bonn et al. 1993] F. Bonn, G Rochon  
Précis de télédétection. Volume 1 : Principes et méthodes, Québec : Presse universitaire du Québec 1993 485p.
- [Chandler 1976] T.J. Chandler  
Urban climatology and its relevance to urban design / World Meteorological Organization. Technical note n°.149 61p.

- [CSTB 1997] Règles TH-K. Règles de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction. Document technique Unifié (DTU), Th\_k97 CSTB, 207p.
- [Duport, Trotignon ] L. Duport, R. Trotignon  
Indicateurs et tableaux de bord de l'environnement urbain. Réflexion méthodologique et proposition de cahier des charges / s.l., s.d. ADEME 10p.
- [Escourrou 1991] G. Escourrou  
Le climat et la ville, Paris : Nathan 1991 190p.
- [Gandemer, Guyot 1976] J. Gandemer, A. Guyot  
Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti, Paris : Ministère de l'Équipement Direction de l'Aménagement Foncier et de l'Urbanisme 1976 130p.
- [Givoni 1978] B. Givoni  
L'homme, l'architecture et le climat. Paris : Moniteur 460p
- [Groupe ABC 1997] Groupe ABC  
Morphologie végétale et microclimats urbains. Vol.2. Les mesures / Marseille : Ecole d'Architecture de Marseille Luminy 1997 169p.
- [Groupe ABC 1997] Groupe ABC  
Morphologie végétale et microclimats urbains. Vol.1. Le contexte, analyse urbaine / Marseille : Ecole d'Architecture de Marseille Luminy 1997 42p.
- [Hernot et al. 1984] D. Hernot, G. Porcher  
Thermique appliquée aux bâtiments. Paris : Chaud Froid Plomberie 1984 168p.
- [Houdas 1973] Y Houdas  
Neutralité thermique. Confort thermique, in : Chauffage électrique et mieux être, Paris 29-30 nov. vol.1-2 26p.
- [Hoffmann 1994] J. B. Hoffmann  
Ambiances climatisées et confort thermique,[s.l.] : COSTIC 1994 120p.
- [Ibn Khaldûn 1997] Ibn Khaldûn  
Discours sur l'histoire universelle, trad. V. Monteil, Thesaurus Sindbad 1997 1132p.
- [Johnson, Oke, Lyons et al. 1991] G. T. Johnson, T. R. Oke, T. J. et al. Lyons et al.  
Simulation of surface urban heat islands under ideal conditions at night. Part 1: Theory and tests against field data / Boundary-Layer Meteorology vol.56 pp.275-294.

- [Matzarakis et al. 1998] A. Matzarakis, H. Mayer  
Investigations of urban climate's thermal component in Freiburg, Germany, in: 2nd Symposium on urban environment, 2-6 Nov. Albuquerque, New Mexico / Boston Ma (USA) : American Meteorological Society 1998 140-143 p.
- [Mayer 1998] H. Mayer  
Human-Biometeorological assessment of urban microclimates according to the German VDI-Guideline 3787 part II, in: 2nd Symposium on urban environment, 2-6 Nov. Albuquerque, New Mexico / Boston Ma (USA) : American Meteorological Society 1998 136-139 pp.
- [McIntyre 1980] D.A. McIntyre  
Indoor climate. London : Applied Science Publishers 1980, 443p.
- [Miguet 1995] F. Miguet  
Ciel : Modèles permettant de simuler l'éclairage naturel (voûte céleste et soleil) / Nantes : Laboratoire CERMA 1995 38 p.
- [Miller-Chagas et al. 1980] Ph. Miller-Chagas, P. Paul  
Configurations urbaines : Apports énergétiques et microclimats. Etude des espaces extérieurs de trois ensembles à Strasbourg Contrat de recherche Plan Construction ARIAS, Strasbourg : 1980 182p.
- [Mills 1993] G.M. Mills  
Simulation of the energy budget of an urban canyon. I. A model structure and sensitivity test / Atmospheric Environment. Serie B vol.27 n°2 pp.157-170.
- [Mills 1993] G.M. Mills  
Simulation of the energy budget of an urban canyon. II. Comparison of model results with measurements / Atmospheric Environment. Serie b vol.27 n°2 pp.171-181.
- [Mirabaud, Parent 1962] L. Mirabaud, C. Parent  
Etude d'architecture spatiale à forte concentration / Architecture d'Aujourd'hui vol.102 62p.
- [Noilhan 1980] J. Noilhan  
Contribution à l'étude du microclimat au voisinage d'un bâtiment / Nantes : C.S.T.B. 1980 160p.
- [Nunez, Oke 1976] M. Nunez, T. R. Oke  
Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere. II. Within an urban canyon / Boundary-Layer Meteorology vol.10
- [Nunez, Oke 1977] M. Nunez, T. R. Oke  
The energy balance of an urban canyon / Journal of Applied Meteorology vol.16, n° 1 11-19p.

- [Oke 1981] T.R. Oke  
Canyon geometry and the nocturnal urban heat island. Comparison of scale model and field observations / Journal of Climatology vol.1 237-254p.
- [Oke 1982] T. R. Oke  
The energetic basis of the urban heat island / Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society vol.108 1-24p.
- [Oke 1987] T.R. Oke  
Boundary layer climates. London : Routledge 1987 435p.
- [Oke 1988] T. R. Oke  
Street design and urban canopy layer climate / Energy and Building vol.11103-113p.
- [Palladio 1997] A. Palladio  
Les quatre livres de l'architecture. Paris : Flammarion 1997
- [Péneau 1987] J.-P. Péneau  
Ajustement climatique des formes urbaines, Nantes : Laboratoire CERMA
- [Pénicaud 1978] H. Pénicaud  
Microclimats urbains étudiés sous l'angle du confort à l'extérieur du bâtiment/ Plan Construction R.A.U.C. 1978 non. Pag.
- [Perrin de Brichambaut et al. 1974] C. Perrin de Brichambaut, G. Lamboley  
Le rayonnement solaire au sol et ses mesures / Cahiers AFEDES vol.n°1
- [Perrin de Brichambaut et al. 1982] C. Perrin de Brichambaut, C. Vauge  
Le gisement solaire, Paris : Technique et Documentation 1982 222p.
- [Pickup et al. 1999] J. Pickup, R. De Dear  
An outdoor thermal comfort index (OUT\_SET\*). Part I - The model and its assumptions, in: Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, 8-12 Nov. Sydney [CD-ROM], Sydney : Macquarie University, 6p.
- [Pignolet-Tardan 1996] F. Pignolet-Tardan  
Milieu thermique et conception urbaine en climat tropical humide. Modélisation thermo-aéraulique globale. / Lyon : Université de Lyon 1996 246p. Thèse génie civil
- [Rapoport 1972] Amos Rapoport  
Pour une anthropologie de la maison, Paris : Dunod 1972 207p.
- [Robin 1995] M. Robin  
La télédétection, Paris : Nathan 1995 318p.

- [Sacadura 1982] J.-F. Sacadura  
Initiation aux transferts thermiques, Paris :  
Technique et Documentation 1982 445p.
- [Sacré ] C. Sacré  
Le confort dans les espaces extérieurs. Analyse  
microclimatique / Nantes: CSTB 138p.
- [Serres 1997] L. Serres  
Etude de l'impact d'une perturbation thermique  
locale de type tache solaire. Influence sur le  
confort thermique / Toulouse : Institut National  
des Sciences Appliquées 1997  
Thèse de doctorat Génie Civil
- [Sevensson 1999] M. Sevensson  
A GIS based empirical method to illustrate and  
simulate temperature variations in an urban  
area, in: Proceedings of the International  
Congress of Biometeorology & International  
Conference on urban climatology, Sydney 8-12  
Nov. Australia. [CD-ROM]. Sydney : Macquarie  
University, 6p.
- [Sini et al. 1996] J.-F. Sini, S. Anquetin, P. Mestayer  
Pollutant dispersion and thermal effects in urban  
street canyons / Atmospheric Environment vol.30  
n°15 pp.2659-2677.
- [Terjung, O'Rourke 1980] Werner H. Terjung, Patricia O'Rourke  
Influences of physical structures on urban energy  
budgets / Influences of physical structures on  
urban energy budgets vol.19 421-439p.
- [Tiraoui 1996] L. Tiraoui  
L'ambiance du patio entre l'air et le soleil.  
L'influence des proportions du patio sur les  
ambiances thermo-aérauliques. / Nantes :  
Université de Nantes et Ecole d'Architecture de  
Nantes 1996 122p.  
DEA Ambiances Architecturales et Urbaines
- [Verseghy, Munro 1989] D.L. Verseghy, D.S. Munro  
Sensitivity studies on the calculation of the  
radiation balance of urban surfaces: I. Short wave  
radiation / vol.46 pp. 309-331p.
- [Verseghy, Munro 1989] D. L. Verseghy, D. S. Munro  
Sensitivity studies on the calculation of the  
radiation balance of urban surface. II. Longwave  
radiation / Boundary-Layer Meteorology vol.48 1-  
18p.
- [Vitruve 1995] Vitruve, trad. C. Perault  
Les dix livres de l'architecture, Paris : Bibliothèque  
de l'image 1995 329p.
- [World Meteorological  
Organization 1996] World Meteorological Organization  
Climate and urban development, Geneva : World  
Meteorological Organization 1996 9p.



**Chapitre 3**  
**Construction de la méthode d'analyse des**  
**impacts radiatifs thermiques**



Dans le précédent chapitre, ont été présentés les différents facteurs qui sont susceptibles d'intervenir au niveau du microclimat urbain. Nous avons pu décrire également les différents facteurs intervenant sur les échanges radiatifs (cf. §2.2.1.2). Nous pouvons rappeler que ces facteurs sont :

- les caractéristiques physiques des matériaux,
- les positions des parois par rapport à la course solaire (latitude, orientation) qui définissent l'énergie incidente,
- et leurs positions relatives définissant les échanges par rayonnement.

Les intensités d'échange sont ainsi modulées par les variations de flux atteignant une surface, par la température de cette dernière et celle du bâti environnant, sa capacité d'absorption et de réflexion des flux.

Dans cette partie, nous tenterons de matérialiser le raisonnement que nous avons adopté, pour répondre aux questionnements relatifs à la mise en relief des dimensions d'ordre transversal entre les phénomènes physiques radiatifs et les formes urbaines et architecturales.

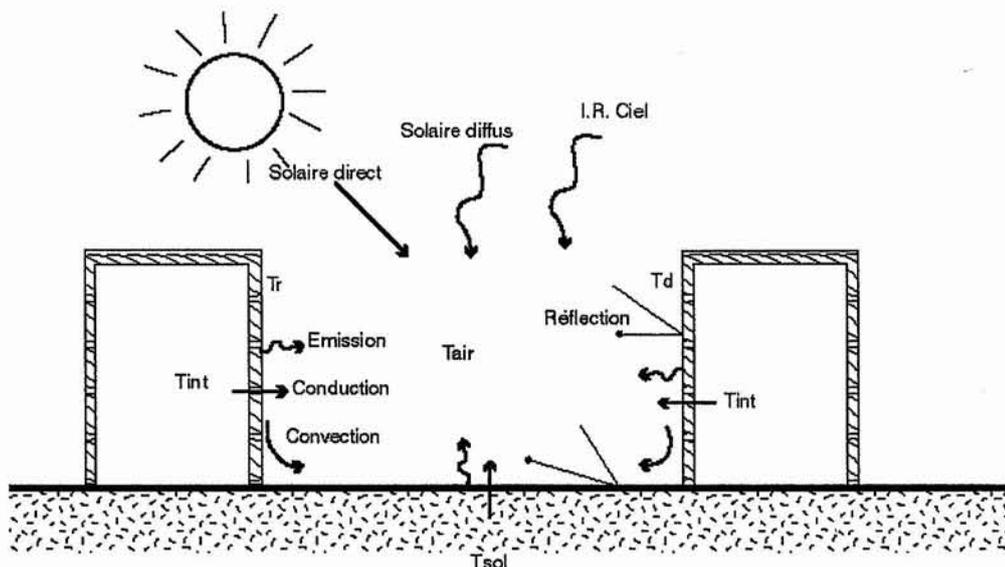


Figure 3.1 Schéma des différents modes de transfert de chaleur entre parois et avec leur environnement.

Dans le cadre de l'étude des relations entre forme et phénomène, nous fondons nos interprétations de ces interactions, sur ce que nous considérons comme *influence* : une action à partir de laquelle un facteur exerce un impact sur un autre. Par l'action, nous entendons les échanges thermiques qui sont au centre des interactions climatiques urbaines. Les facteurs physiques et formels sont les sujets d'action : acteurs.

L'*influence* peut être définie également, en tant qu'impact ou plus spécifiquement, résultat d'action. En effet, Elle peut être exprimée par le changement de conditions radiatives et thermiques qu'induit un phénomène sur un milieu minéral. Le modèle que nous développons, tente de définir les actions d'influence, et également les descripteurs de changement de condition qui nous permettent de les évaluer.

Suivant le projet de définition des acteurs d'influence, auquel nous nous référons, ces derniers peuvent être présentés de manière différente. Si nous devons poser les questions dans une optique purement physique, les acteurs seraient les températures, les quantités d'énergie échangées, etc. Ainsi, les questions relatives à la compréhension des impacts pourraient se formuler comme suit : les multiréflexions en grande longueur d'onde agissent-elles plus sur les températures que les réflexions de courtes longueurs d'onde ? Le ciel exerce-t-il plus d'influence en infrarouge thermique qu'en solaire ? Etc.

Ici, nous avons pris position par rapport à des acteurs identifiables par le concepteur, qui sont constitutifs du milieu physique de l'urbain : les surfaces minérales (le sol et les bâtiments...), le soleil et le ciel.

Les questions qui se posent sont donc : quel rôle joue chacun de ces acteurs dans la caractérisation thermique des espaces urbains ? Comment interviennent-ils ?

L'étude des impacts impose la définition du bilan thermique d'une paroi faisant intervenir les échanges radiatifs, convectifs et conductifs. Dans cette recherche nous n'introduirons pas la chaleur latente, nous supposons l'espace urbain complètement minéral.

Parallèlement aux recherches sur l'impact des formes d'un bâtiment sur l'écoulement du vent, nous tentons de cerner les effets radiatifs de l'ensoleillement sur les conditions thermiques du milieu urbain et cela à travers la construction d'un modèle explicatif qui sera présenté de manière plus exhaustive dans ce chapitre. En premier lieu seront abordés les principes d'études des influences et le modèle en découlant. En second lieu, nous tenterons de mettre en exergue l'intégration numérique du modèle dans le logiciel de simulation Solene.

### 3.1 Modélisation des influences thermiques entre deux surfaces

Avant d'aborder la situation complexe qui est celle de la ville, nous essaierons de comprendre, en premier lieu, celle de l'influence mutuelle de deux éléments de surface.

Le principe de l'étude est basé sur la comparaison de deux états. Le premier est celui d'une paroi isolée puis comparée à un nouvel état qui est lié à la présence d'une autre paroi.

La paroi dont le changement de conditions thermiques est observé est appelée paroi *réceptrice* ( $r$ ) et celle qui la perturbe thermiquement est appelée *distributrice* ( $d$ ). Il est clair que, dans la réalité, cette distinction n'est pas aussi évidente. Les échanges thermiques ont la caractéristique d'influencer et de subir l'impact de l'environnement urbain : une paroi influence et est influencée quelle que soit sa condition thermique. Cependant, ces appellations permettent de désigner la paroi réceptrice qui exprime celle dont les changements sont observés par rapport à celle qui influe sur l'autre : la distributrice.

En fait les surfaces ( $r$ ) et ( $d$ ) ne sont pas complètement seules, elles font partie d'un *environnement* qui émet, réfléchit et reçoit de l'énergie. Cependant, le contenu physique sous-entendu, dans notre étude, par le terme *environnement* signifie tous les éléments physiques entourant ( $r$ ) et ( $d$ ), sauf le ciel. Cette définition constitue un moyen pour isoler le comportement physique de ces deux surfaces. Nous verrons que le terme environnement regroupe des éléments différents, suivant le projet d'analyse que nous nous sommes fixé. Cependant, quelle que soit la situation, notre recherche se basera sur l'écriture simplifiée de bilans thermiques.

En effet, afin d'étudier l'influence d'une face ( $d$ ) sur une autre ( $r$ ), il nous sera nécessaire d'écrire le bilan thermique sur la paroi ( $r$ ) isolée et de le comparer avec un bilan incluant la présence d'une deuxième paroi ( $d$ ).

L'étude de l'influence des formes urbaines sur les phénomènes radiatifs impose une écriture des bilans d'énergie en incluant les transferts radiatifs (infrarouge, et solaire), convectifs et conductifs. Le bilan représente la somme des apports et des pertes d'énergie par un élément de paroi :

$$\Phi_{rad} + \Phi_{convec} + \Phi_{cond} = 0 \quad \text{en régime stationnaire} \quad (3.1)$$

$$\Phi_{rad} + \Phi_{convec} + \Phi_{cond} = \mu C_p \partial x / \partial t \quad \text{en régime in stationnaire} \quad (3.2)$$

$\Phi_{conv}$	flux convectif ( $W/m^2$ )
$\Phi_{cond}$	flux conductif ( $W/m^2$ )
$\Phi_{rad}$	flux radiatif ( $W/m^2$ )
$\mu$	masse volumique du matériau ( $Kg/m^3$ )
$x$	épaisseur de la paroi (m)

$C_p$  capacité calorifique (J/Kg°K)

- Dans les flux radiatifs sont inclus :

- les apports solaires directs,
- l'apport diffus du ciel. Cet apport, en condition de ciel clair, ne dépend pas des facteurs de vue du ciel mais de la position du soleil sur la voûte céleste. L'apport devient uniforme pour des conditions de ciel nuageux.
- l'émission infrarouge du ciel. Celle ci peut être considérée uniforme.
- l'émission infrarouge de l'environnement. Cette émission comprend l'apport des autres parois et peut comprendre aussi l'émission des polluants quand l'air n'est pas supposé complètement transparent. Dans le modèle présenté, nous ne prendrons pas en considération ce dernier effet.

Les échanges radiatifs sont régis par les facteurs de formes qui impliquent des matériaux Lambertiens supposés gris opérant des réflexions diffuses. Les vitres ne peuvent pas répondre à cette hypothèse.

- Les flux convectifs dépendent :

- de la vitesse de l'air au niveau de la paroi, elle dépend des conditions de vent, rugosité de la paroi et de la turbulence.
- de la différence de température entre paroi et air.

- Les flux conductifs dépendent de la conductibilité thermique du matériau, de son épaisseur et des conditions thermiques internes. Le facteur regroupant les deux premiers facteurs est appelé conductance.

Si nous posons  $T_r$  la température de la paroi ( $r$ ) en dehors de l'influence de la paroi ( $d$ ) et  $T'_r$  sa température sous l'influence de ( $d$ ), la variation de température correspondante sera notée  $\Delta T_r = T'_r - T_r$  et exprimera l'impact thermique de ( $d$ ) sur ( $r$ ).

Les développements qui vont suivre permettront de décrire l'estimation de  $\Delta T_r$ . Nous écrivons en régime stationnaire le bilan thermique de la surface ( $r$ ) sous deux conditions :

1. Bilan d'énergie de la paroi ( $r$ ) ne subissant aucune influence de la paroi ( $d$ ), avec :

$$S_r = S_{env} \text{ et}$$

$$\Phi_{cond} + \Phi_{conv} + \Phi_{rad} = 0$$

$$\Psi_{rs} + F_{r\_env} = 1$$

(3.3) et (3.4)

$F_{r\_env}$  facteur de forme entre ( $r$ ) et ( $env$ )  
 $S_r S_{env}$  surfaces de ( $r$ ) et ( $env$ ) ( $m^2$ )

*env* environnement des surfaces (*d*) et (*r*)  
*ψ<sub>rs</sub>* facteur de vue du ciel de la paroi (*r*)

le bilan s'écrit comme suit :

$$\left[ (1-\alpha_r)\Phi_r - \varepsilon_r \cdot \sigma \cdot T_r'^4 \right] + \psi_{r,s} \cdot (L_s \downarrow + D_s \downarrow) + F_{r,env} \cdot \left[ \alpha_{env} \cdot (1-\alpha_r) \cdot \Phi_{env} + \varepsilon_{env} \cdot \sigma \cdot T_{env}'^4 \right] + h e_r \cdot (T_{air} - T_r) + c_r \cdot (T_{int} - T_r) = 0 \quad (3.5)$$

*D<sub>s</sub>↓* flux solaire diffus incident  
*L<sub>s</sub>↓* émission I.R. du ciel (W/m<sup>2</sup>)  
*T<sub>air</sub>* température de l'air (K)  
*T<sub>int</sub>* température intérieure de (*r*) (K)  
*T<sub>r</sub>* température de surface externe (*r*) (K)  
*T<sub>env</sub>* température de l'environnement (K)  
*c<sub>r</sub>* coefficient d'échange intérieur de (*r*) :  $c = \frac{1}{\frac{x}{\lambda} + \frac{1}{h_{int}}}$   
(W/mK)  
*h e<sub>r</sub>* coefficient d'échange convectif extérieur de (*r*) (W/m<sup>2</sup>K)  
*Φ<sub>r</sub>* flux incidents sur (*r*) (W/m<sup>2</sup>)  
*Φ<sub>d</sub>* flux incidents sur (*d*) (W/m<sup>2</sup>)  
*Φ<sub>env</sub>* flux incidents sur (*env*) (W/m<sup>2</sup>)  
*α<sub>r</sub>, α<sub>env</sub>* albédo ou réflectivité de (*r*) et (*env*)  
*ε<sub>r</sub>, ε<sub>env</sub>* émissivité de (*r*) et (*env*)  
*λ* conductibilité thermique du matériau (W/mK)  
*σ* coefficient de Stefan-Boltzmann

2. Bilan thermique de la paroi (*r*) subissant l'influence de la paroi (*d*) avec,

$$S_r = S_d \text{ et}$$

$$\Phi_{cond} + \Phi_{conv} + \Phi_{rad} = 0$$

$$\Psi'_{r,s} + F'_{r,env} + F'_{r,d} = 1$$

(3.6) et (3.7)

*S<sub>d</sub>* surfaces de (*r*) et (*d*) (m<sup>2</sup>)  
*F'\_{r,env}* facteur de forme entre (*r*) et (*env*)  
*ψ'\_{rs}* facteur de vue du ciel de la paroi (*r*) en présence de (*d*)

Le bilan de (*r*) en présence de (*d*) serait :

$$\left[ (1-\alpha_r)\Phi_r' - \varepsilon_r \cdot \sigma \cdot T_r'^4 \right] + \psi'_{r,s} \cdot (L_s \downarrow + D_s \downarrow) + h e_r \cdot (T_{air} - T_r') + c_r \cdot (T_{int} - T_r') + F'_{r,env} \cdot \left[ \alpha_{env} \cdot (1-\alpha_r) \cdot \Phi_{env} + \varepsilon_{env} \cdot \sigma \cdot T_{env}'^4 \right] + F'_{r,d} \cdot \left[ \alpha_d \cdot (1-\alpha_r) \cdot \Phi_d + \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot T_d'^4 \right] = 0 \quad (3.8)$$

*T'<sub>r</sub>* température de (*r*) en présence de (*d*) (K)  
*T'<sub>d</sub>* température de (*d*) (K)  
*ε<sub>d</sub>* émissivité de (*d*)

$\alpha_d$	albédo ou réflectivité de ( $d$ )
$\Phi_d$	flux incidents sur ( $d$ ) ( $W/m^2$ )

3. Comparaison des cas (1) et (2) : l'application des différences de bilan entre les équations (3.5) et (3. 8), nous permet de définir l'influence :

$$(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r + \varepsilon_r \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_r'^4) + h e_r \cdot (T_r - T_r') + c_r \cdot (T_r - T_r') + (\psi'_{rs} - \psi_{rs})(L_s \downarrow + D_s \downarrow) + (F'_{r,env} - F_{r,env})[\alpha_{env} \cdot (1-\alpha_r)\Phi_{env} + \varepsilon_{env} \cdot \sigma \cdot T_{env}^4] + F_{r,d} \cdot [\alpha_d \cdot (1-\alpha_r)\Phi_d + \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot T_d^4] = 0 \quad (3.9)$$

en linéarisant par l'expression :

$$T_r^4 - T_r'^4 = 4T_m^3 \cdot (T_r - T_r') \quad (3.10)$$

avec  $T_m = (T_r + T_r')/2$  nous obtenons :

$$(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r + (\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4T_m^3 + h e_r + c_r)(T_r - T_r') + (\psi'_{rs} - \psi_{rs})(L_s \downarrow + D_s \downarrow) + (F'_{r,env} - F_{r,env})[\alpha_{env} \cdot (1-\alpha_r)\Phi_{env} + \varepsilon_{env} \cdot \sigma \cdot T_{env}^4] + F_{r,d} \cdot [\alpha_d \cdot (1-\alpha_r)\Phi_d + \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot T_d^4] = 0 \quad (3.12)$$

avec,  
 $\Delta\Phi_r = \Phi'_r - \Phi_r$  (3.13)

Les coefficients d'échange convectif externe sont considérés ici, inchangés pour les cas 1 et 2 (en présence et en absence de  $d$ ). Cela est lié à deux hypothèses :

- prendre en compte des conditions de vent faibles ; ( $d$ ) influe très faiblement sur les écoulements d'air,
- considérer que l'impact thermique d'un élément de surface sur un autre, induit des variations sur les échanges convectifs peu sensibles sur ce dernier.

Ces hypothèses sont cependant à reconsidérer. La prise en compte des impacts convectifs naturels et forcés doivent faire l'objet d'investigations poussées, parallèlement aux impacts radiatifs thermiques. Ceci sera discuté au chapitre 6 et soulèvera en conclusion, de nouvelles perspectives de recherche.

Les conditions d'échange interne aux bâtiment sont considérées à partir des conditions de paroi définis suivant les matériaux utilisés et les conditions d'échanges convectifs internes. Ces derniers sont intégrés dans le calcul du bilan en régime permanent. Les températures de l'air intérieures et extérieures sont considérées constantes.

La mise en exergue des impacts radiatifs thermiques, fait apparaître l'expression des influences suivantes :

$$(T'_r - T_r) = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r + (\psi'_{ra} - \psi_{ra})(L_r \downarrow + D_r \downarrow) + (F'_{r_{env}} - F_{r_{env}})[\alpha_{env}(1-\alpha_r)\Phi_{env} + \varepsilon_{env}\sigma T_{env}^4] + F_{r_d}[\alpha_d(1-\alpha_r)\Phi_d + \varepsilon_d\sigma T_d^4]}{(\varepsilon_r\sigma A_r T_m^3 + h_{e_r} + c_r)} \quad (3.14)$$

Par l'expression précédente (3.14), l'impact de (*d*) sur (*r*) se définit par :

- l'influence directe de la surface (*d*) par son émission infrarouge et ses réflexions dans la bande solaire,
- l'influence indirecte due à :
  - l'obstruction par (*d*) du ciel,
  - l'obstruction par (*d*) du soleil,
  - l'obstruction par (*d*) de l'environnement.

Ainsi nous pouvons noter que :

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r\sigma A_r T_m^3 + h_{e_r} + c_r)} + \frac{(\psi'_{ra} - \psi_{ra})(L_r \downarrow + D_r \downarrow)}{(\varepsilon_r\sigma A_r T_m^3 + h_{e_r} + c_r)} + \frac{(F'_{r_{env}} - F_{r_{env}})[\alpha_{env}(1-\alpha_r)\Phi_{env} + \varepsilon_{env}\sigma T_{env}^4]}{(\varepsilon_r\sigma A_r T_m^3 + h_{e_r} + c_r)} + \frac{F_{r_d}[\alpha_d(1-\alpha_r)\Phi_d + \varepsilon_d\sigma T_d^4]}{(\varepsilon_r\sigma A_r T_m^3 + h_{e_r} + c_r)} \quad (3.15)$$

soit,

$$\Delta T_r = \Delta T_{r_{\Phi_r}} + \Delta T_{r_{ciel}} + \Delta T_{r_{env}} + \Delta T_{r_d} \quad (3.16)$$

ou

$$Inf\_total = Inf_{flux\_direct} + Inf_{ciel} + Inf_{env} + Inf_d \quad (3.17)$$

En sachant que les expressions suivantes  $Inf_{flux\_direct}$ ,  $Inf_{ciel}$ ,  $Inf_{env}$ , sont des pertes thermiques de (*r*) dues aux obstructions respectives par (*d*) : du soleil, du ciel et de l'environnement.

### 3.1.1 Deux axes de recherche

Deux projets d'analyse peuvent être proposés à partir de la relation résultante des situations de (*d*) et de (*r*) (cf. équation 3.17) :

- une analyse simplifiée appliquée à deux surfaces élémentaires ou à des géométries simples qui permet d'examiner les influences et cela pour tout type de condition.
- une analyse appliquée à des situations géométriques et physiques complexes où il s'agit de comprendre et de distinguer les éléments les plus influents dans les situations thermiques d'un espace donné.

Ces deux axes d'investigation, même si le premier ne recouvre pas des situations urbaines complexes, restent complémentaires. La première analyse peut aider à mieux cerner les différentes influences radiatives thermiques. Nous verrons ceci, de manière plus poussée au chapitre 5. Au chapitre 4, nous présenterons une analyse appliquée à une géométrie complexe. Les deux axes

ici adoptés tentent de recouvrir les différents questionnements relatifs à l'influence radiative thermique. L'analyse de cas simplifiés physiquement et géométriquement, permettent en effet d'extraire les relations d'influence fondamentales. Par leur comparaison à une situation urbaine complexe, il sera possible de définir les spécificités d'influence caractéristiques de l'espace étudié.

### 3.1.1.1 Développement des influences

Il s'agit ici d'isoler les facteurs d'influence caractéristiques d'une surface, par rapport à son exposition et à sa position. Ceci permet de déterminer comment ces facteurs interviennent dans les échanges thermiques entre deux surfaces.

La comparaison de deux situations : ( $r$ ) étant seule, puis en présence d'une autre surface ( $d$ ) implique plusieurs cas d'influence, selon que ( $r$ ) change de situation d'ensoleillement en présence de ( $d$ ), ou que ( $d$ ) ait des situations d'ensoleillement différentes. Ainsi :

- ( $r$ ) et ( $d$ ) peuvent être au soleil ou à l'ombre,
- ( $d$ ) peut obstruer seulement l'environnement minéral. ( $d$ ) peut être un élément de cet environnement dont les caractéristiques ont été changées. Nous ne parlerons pas d'obstruction mais de changement de condition de surface.
- ( $d$ ) n'obstruant que le ciel,
- ( $d$ ) obstruant le ciel et le soleil.
- ( $d$ ) n'obstruant que le sol.
- ( $d$ ) obstruant simultanément plusieurs types de milieu.

( $d$ ) peut être considérée suffisamment petite pour n'opérer qu'un seul type d'obstruction à la fois : obstruction du ciel ou du sol.

Quatre cas peuvent être répertoriés, selon que ( $d$ ) obstrue l'environnement, le ciel, le soleil ou tous simultanément.

Cas 1 : si ( $d$ ) est un élément appartenant à l'environnement minéral ou n'obstruant que ce dernier.

Ce cas mène vers la comparaison de l'influence de ( $d$ ) par rapport à l'environnement auquel il appartient. Du point de vue théorique cette situation exprime l'observation de l'influence des caractéristiques physiques de ( $d$ ) sur ( $r$ ).

$$\psi'_{r,s} - \psi_{r,s} = 0, \text{ soit } F'_{r,env} - F_{r,env} = -F_{r,d}$$

$$\Delta T_r = \frac{F_{r,d} \cdot [\alpha_d \cdot (1 - \alpha_r) \Phi_d + \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot T_d^4] - [\alpha_{env} \cdot (1 - \alpha_r) \Phi_{env} + \varepsilon_{env} \cdot \sigma \cdot T_{env}^4]}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h e_r + c_r)} \quad (3.18)$$

Cas 2 : si (d) n'obstrue que le ciel.  
 (r) ne changeant pas de situation  $\Delta\Phi_r = 0$

Cette situation nous permet de comparer l'influence du ciel par rapport à celle d'une surface.

a.1. Pour (d) au soleil.

Les gains de (r) par rapport à sa situation de départ sont définis par les flux solaires nets et infrarouges incidents sur (r) et provenant de (d) quand ce dernier est ensoleillé.

a.2. Pour (d) à l'ombre.

Les gains sont les flux solaires diffus et infrarouges provenant de (d) et incidents sur (r), quand (d) est à l'ombre.

Les pertes sont les apports solaires diffus et infrarouges du ciel.

$$F'_{r\_env} - F_{r\_env} = 0, \text{ soit } \psi'_{r\_s} - \psi_{r\_s} = -F_{r\_d}$$

$$\Delta T_r = \frac{F_{r\_d} \cdot [\alpha_d \cdot (1 - \alpha_r) \cdot \Phi_d + \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot T_d^4 - (L_s \downarrow + D_s \downarrow)]}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h e_r + c_r)} \quad (3.19)$$

Cas 3 : si (d) obstrue le ciel et le soleil  
 (r) changeant de situation d'ensoleillement ; au soleil en l'absence de (d), puis à l'ombre en présence de (d).

Il s'agit de comparer l'influence de (d) par rapport à l'obstruction simultanée du ciel et du soleil.

b.1. Pour (d) au soleil.

Cette situation est difficilement envisageable, car toute surface faisant obstruction sur une autre, ne peut être qu'à l'ombre. (cf. fig.3.2 ci-contre)

b.2. Pour (d) à l'ombre

Les gains sont les flux solaires diffus et infrarouges provenant de (d) et incidents sur (r). Les pertes sont les flux directs solaires et ceux émis par le ciel.

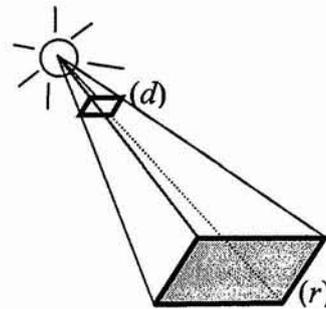


Figure 3.2 Obstruction du soleil par (d) pour (r).

$$\Delta T_r = \frac{(1 - \alpha_r) \Delta \Phi_r}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h e_r + c_r)} + \frac{F_{r\_d} \cdot [\alpha_d \cdot (1 - \alpha_r) \cdot \Phi_d + \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot T_d^4 - (L_s \downarrow + D_s \downarrow)]}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h e_r + c_r)} \quad (3.20)$$

Cas 4 : si ( $d$ ) obstrue le ciel, le soleil et l'environnement  
 ( $r$ ) changeant de situation d'ensoleillement ; au soleil seule puis à l'ombre en présence de ( $d$ ).

Ce cas étant trop complexe, il est nécessaire d'appliquer un traitement numérique spécifique, pouvant résoudre ce type d'impact.

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r + \Delta\psi_{rs}(L_s \downarrow + D_s \downarrow) + \Delta F_{r\_env} [\alpha_{env}(1-\alpha_r)\Phi_{env} + \varepsilon_{env}\sigma T_{env}^4] + F_{r\_d} [\alpha_d(1-\alpha_r)\Phi_d + \varepsilon_d\sigma T_d^4]}{(\varepsilon_r\sigma 4T_m^3 + h_e + c_r)} \quad (3.21)$$

L'analyse d'interaction entre surfaces élémentaires sera présentée de manière plus développée dans le chapitre consacré à l'interprétation physique et spatiale des influences (cf.§5.2 & §5.3). La question posée est liée à l'analyse de géométrie urbaine complexe. L'analyse ne pourra s'effectuer, dans ce dernier cas sans le développement numérique du modèle. Différents développements d'investigation seront nécessaires à la mise au point du modèle. C'est ce que nous abordons dans ce qui va suivre.

### 3.1.2 Modélisation numérique

La construction numérique du modèle d'analyse des influences radiatives thermiques est nécessaire à son application à des formes complexes d'espaces urbains. Au-delà de l'observation des températures de surface, il s'agit de proposer une méthode de compréhension des phénomènes thermiques observés.

L'interprétation numérique des équations d'influences présentées plus haut (cf. équation 3.14) peut être effectuée à travers deux types d'algorithmes de résolution numérique :

- Un système de résolution itératif par la réécriture de l'équation :

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r + (\psi'_{rs} - \psi_{rs})(L_s \downarrow + D_s \downarrow) + (F'_{r\_env} - F_{r\_env}) [\alpha_{env}(1-\alpha_r)\Phi_{env} + \varepsilon_{env}\sigma T_{env}^4] + F_{r\_d} [\alpha_d(1-\alpha_r)\Phi_d + \varepsilon_d\sigma T_d^4]}{(\varepsilon_r\sigma 4T_m^3 + h_e + c_r)} \quad (3.22)$$

en l'équation suivante :

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r + (\psi'_{rs} - \psi_{rs})(L_s \downarrow + D_s \downarrow) + (F'_{r\_env} - F_{r\_env}) [\alpha_{env}(1-\alpha_r)\Phi_{env} + \varepsilon_{env}\sigma T_{env}^4] + F_{r\_d} [\alpha_d(1-\alpha_r)\Phi_d + \varepsilon_d\sigma T_d^4]}{\left( \varepsilon_r\sigma 4 \left( T_r' - \frac{\Delta T_r}{2} \right)^3 + h_e + c_r \right)} \quad (3.23)$$

En sachant que :

$$T_m = (T_r + T_r')/2 = T_r' - \Delta T_r / 2$$

et que  $T_r'$  est la température de surface simulée dans des conditions d'environnement urbain complexe, c'est-à-dire en présence de ( $d$ ).

- Un système non-itératif ou linéaire de résolution de l'équation :

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r + (\psi'_r - \psi_r)(L_r \downarrow + D_r \downarrow) + (F'_{r,env} - F_{r,env})[\alpha_{env}(1-\alpha_r)\Phi_{env} + \varepsilon_{env}\sigma T_{env}^4] + F_{r,d}[\alpha_d(1-\alpha_r)\Phi_d + \varepsilon_d\sigma T_d^4]}{(\varepsilon_r\sigma 4T_m^3 + h_{e,r} + c_r)} \quad (3.24)$$

La résolution dépend de la définition de la température moyenne dite de changement ( $T_m$ ) qui serait représentative des impacts thermiques de ( $d$ ) sur ( $r$ ).

Nous avons opté pour la dernière proposition car même si la première peut apporter une meilleure précision de calcul, elle ne permet pas la décomposition de l'influence globale, comme suit :

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r\sigma 4T_m^3 + h_{e,r} + c_r)} + \frac{(\psi'_r - \psi_r)(L_r \downarrow + D_r \downarrow)}{(\varepsilon_r\sigma 4T_m^3 + h_{e,r} + c_r)} + \frac{(F'_{r,env} - F_{r,env})[\alpha_{env}(1-\alpha_r)\Phi_{env} + \varepsilon_{env}\sigma T_{env}^4]}{(\varepsilon_r\sigma 4T_m^3 + h_{e,r} + c_r)} + \frac{F_{r,d}[\alpha_d(1-\alpha_r)\Phi_d + \varepsilon_d\sigma T_d^4]}{(\varepsilon_r\sigma 4T_m^3 + h_{e,r} + c_r)} \quad (3.25)$$

Ainsi, le deuxième type de résolution permet une analyse plus poussée par la possibilité de distinction et de comparaison des influences des surfaces par rapport à celles de l'obstruction du sol, du ciel, etc.

$$\Delta T_r = \Delta T_{r,\phi_r} + \Delta T_{r,ciel} + \Delta T_{r,env} + \Delta T_{r,d} \quad (3.26)$$

ou

$$Inf\_total = Infl_{flux\_direct} + Infl_{ciel} + Infl_{env} + Infl_d \quad (3.27)$$

Il est clair que la deuxième résolution a des limites, que nous aborderons de manière plus exhaustive dans le chapitre consacré à la discussion du modèle (cf. Chap. 6). En effet, nous isolons des influences, qui dans la réalité, ne se prêtent pas à cette distinction des impacts radiatifs. Cependant, la décomposition est recherchée et constitue la démarche essentielle à la définition et à l'analyse des acteurs d'impacts. Cette approche présente également l'avantage de la rapidité de calcul nécessaire à l'étude de sites géométriques complexes présentant un nombre important de surfaces.

La température moyenne d'évolution sera estimée suivant l'importance de changement de situation thermique de la surface. En effet, par la prise en compte de  $T_m$  comme température moyenne de surface, nous tentons d'approcher la température moyenne d'évolution thermique de surface due à l'influence de son environnement. La température moyenne calculée tente de représenter les conditions thermiques de chaque situation d'influence.  $T_m$  est considérée généralement comme température moyenne de surface, estimée donc de manière différenciée entre le sol et les façades de bâtiment, et entre

zone à l'ombre et ensoleillée. Ceci sera discuté de manière plus exhaustive au chapitre 6.

Deux types d'analyse sont possibles :

*Une étude physique* : qui permet de déterminer les caractéristiques physiques de surface responsables des conditions thermiques d'un espace donné.

Ex. : l'apport de  $(d)$  est-il davantage dû à son émission infrarouge qu'aux flux réfléchis ? les apports de  $(d)$  compensent-ils ceux du ciel et du soleil ?, etc.

*Une étude spatiale* : qui permet de relier les aspects physiques observés aux caractéristiques formelles de l'espace. Elle permet la définition de la zone responsable des conditions thermiques d'une ou de plusieurs surfaces de référence. L'analyse spatiale dépendra de la définition des zones qui exerceront une influence effective sur la surface  $(r)$ , ce qui nous amènera à définir un facteur de forme limite.

Ex. Quelle est la zone regroupant les influences entre parois les plus significatives ? Quelles transformations pouvons nous effectuer dans un espace donné afin de réduire ou d'augmenter ces influences ?

Ces deux types d'analyses seront présentés, de manière illustrée, dans le chapitre 4.

Afin de pouvoir effectuer des analyses physiques sur chaque partie de la scène, il est important d'intégrer ces calculs dans un environnement discrétisé. Le modèle considère les surfaces des éléments  $(r)$  et  $(d)$  égales. La discrétisation doit être la plus homogène possible du point de vue des surfaces analysées.

Soit  $(r_i)$  la surface de référence et  $(d_j)$  la ou les surfaces influentes, d'une scène géométrique donnée.

$$Infl_{d_j\_total} = Infl_{flux\_direct} + Infl_{ciel} + Infl_{env} + Infl_{d_j}$$

Dans une scène discrétisée, l'hypothèse d'obstruction d'un seul type d'environnement à la fois peut être considérée. Selon la situation de  $(d_j)$  par rapport à  $(r_i)$ ,  $(d_j)$  obstruera le ciel ou le sol.

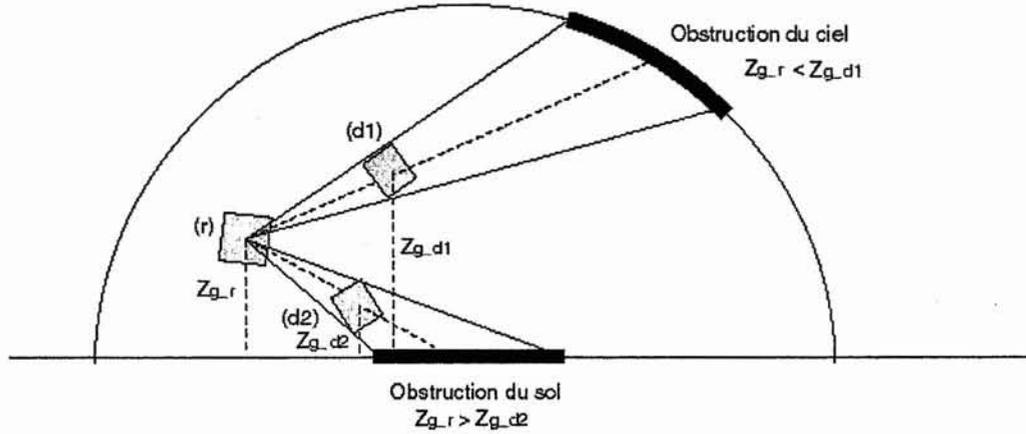


Figure 3.3 Discretisation de la scène et simplification des obstructions.

En sachant que :

$$\psi_{r,s} + F_{r,sol} = 1$$

et

$$\psi'_{r,s} + F'_{r,sol} + F_{r,d_j} = 1$$

(3.28)

correspondent au changement de situation dû à la présence de  $(d_j)$ . Il est possible de considérer une seule obstruction à la fois. Nous obtenons les relations suivantes :

1. Quand  $Z_{g,d_j} \geq Z_{g,r_i}$   $(d_j)$  opère une obstruction du ciel

$$\psi_{r,s} - \psi'_{r,s} = F_{r,d_j}$$

et

$$F_{r,sol} - F'_{r,sol} = 0$$

(3.29)

soit :

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h e_r + c_r)} + F_{r,d_j} \frac{[\alpha_{d_j}(1-\alpha_r)\Phi_{d_j} + \varepsilon_{d_j} \cdot \sigma \cdot T_{d_j}^4] - [\alpha_{sol}(1-\alpha_r)\Phi_{sol} + \varepsilon_{sol} \cdot \sigma \cdot T_{sol}^4]}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h e_r + c_r)}$$

(3.30)

2. Quand  $Z_{g,d_j} < Z_{g,r_i}$   $(d_j)$  opère une obstruction du sol

$$F_{i,sol} - F'_{i,sol} = F_{i,d_j}$$

et

$$\psi_{i,s} - \psi'_{i,s} = 0$$

(3.31) et (3.32)

soit :

$$\Delta T_{r_i} = \frac{\Sigma(1-\alpha_{r_i})\Delta\Phi_{r_i}}{(\varepsilon_{r_i} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_{m_i}^3 + h e_{r_i} + c_{r_i})} + F_{r_i-d_j} \frac{[\alpha_{d_j} \cdot (1-\alpha_{r_i}) \Phi_{d_j} + \varepsilon_{d_j} \cdot \sigma \cdot T_{d_j}^4] - (L_s \downarrow + D_s \downarrow)}{(\varepsilon_{r_i} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_{m_i}^3 + h e_{r_i} + c_{r_i})} \quad (3.33)$$

Il est possible d'observer pour chaque surface de référence ( $r_i$ ), la somme des différentes influences des facettes ( $d_j$ ) de la scène :

- dans le cas d'obstruction du ciel :

$$\Sigma_j \Delta T_{r_i} = \frac{(1-\alpha_{r_i})\Delta\Phi_{r_i}}{(\varepsilon_{r_i} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_{m_i}^3 + h e_{r_i} + c_{r_i})} + \Sigma_j F_{r_i-d_j} \frac{[\alpha_{d_j} \cdot (1-\alpha_{r_i}) \Phi_{d_j} + \varepsilon_{d_j} \cdot \sigma \cdot T_{d_j}^4] - (L_s \downarrow + D_s \downarrow)}{(\varepsilon_{r_i} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_{m_i}^3 + h e_{r_i} + c_{r_i})} \quad (3.34)$$

$$\Delta T_{r_i} = \Delta T_{r_i-\Phi_i} + \Delta T_{r_i-ciel} + \Delta T_{r_i-d_j} \quad (3.35)$$

- dans le cas d'obstruction du sol :

$$\Sigma_j \Delta T_{r_i} = \frac{(1-\alpha_{r_i})\Delta\Phi_{r_i}}{(\varepsilon_{r_i} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_{m_i}^3 + h e_{r_i} + c_{r_i})} + \Sigma_j F_{r_i-d_j} \frac{[\alpha_{d_j} \cdot (1-\alpha_{r_i}) \Phi_{d_j} + \varepsilon_{d_j} \cdot \sigma \cdot T_{d_j}^4] - [\alpha_{sol} \cdot (1-\alpha_{r_i}) \Phi_{sol} + \varepsilon_{sol} \cdot \sigma \cdot T_{sol}^4]}{(\varepsilon_{r_i} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_{m_i}^3 + h e_{r_i} + c_{r_i})} \quad (3.36)$$

$$\Delta T_{r_i} = \Delta T_{r_i-\Phi_i} + \Delta T_{r_i-env} + \Delta T_{r_i-d_j} \quad (3.37)$$

Il est également possible d'analyser par rapport à une surface ( $r_i$ ) de référence l'influence de chaque face ( $d_j$ ), soit :

$$\Delta T_{r_i} = \frac{(1-\alpha_{r_i})\Delta\Phi_{r_i}}{(\varepsilon_{r_i} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_{m_i}^3 + h e_{r_i} + c_{r_i})} + F_{r_i-d_j} \frac{[\alpha_{d_j} \cdot (1-\alpha_{r_i}) \Phi_{d_j} + \varepsilon_{d_j} \cdot \sigma \cdot T_{d_j}^4] - [\alpha_{sol} \cdot (1-\alpha_{r_i}) \Phi_{sol} + \varepsilon_{sol} \cdot \sigma \cdot T_{sol}^4]}{(\varepsilon_{r_i} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_{m_i}^3 + h e_{r_i} + c_{r_i})} \quad (3.38)$$

et,

$$\Delta T_{r_i} = \frac{\Sigma(1-\alpha_{r_i})\Delta\Phi_{r_i}}{(\varepsilon_{r_i} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_{m_i}^3 + h e_{r_i} + c_{r_i})} + F_{r_i-d_j} \frac{[\alpha_{d_j} \cdot (1-\alpha_{r_i}) \Phi_{d_j} + \varepsilon_{d_j} \cdot \sigma \cdot T_{d_j}^4] - (L_s \downarrow + D_s \downarrow)}{(\varepsilon_{r_i} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_{m_i}^3 + h e_{r_i} + c_{r_i})} \quad (3.39)$$

Les influences dues aux obstructions  $Infl_{flux\_direct}$ ,  $Infl_{ciel}$ ,  $Infl_{env}$ , peuvent être ainsi identifiées physiquement et spatialement dans un espace complexe. Il est possible de caractériser le type d'impact correspondant aux géométries et surfaces rencontrées dans un espace donné.

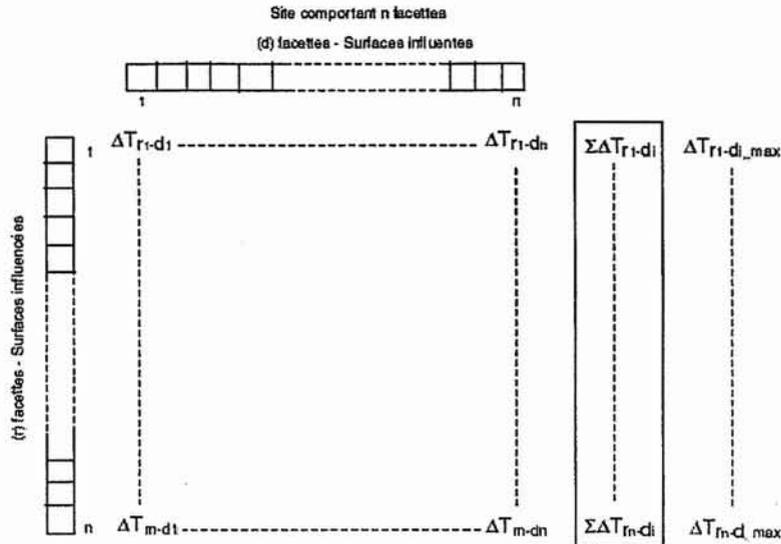


Figure 3.4 Modélisation géométrique des influences entre facettes d'une scène.

Nous pouvons résumer que, par le traitement numérique des influences, l'estimation de ces dernières dépendent des conditions de situation spatiale de la surface ( $r$ ) par rapport à ( $d$ ) et de sa situation physique solaire (à l'ombre et au soleil). Ces estimations permettent également d'évaluer à partir des sommes d'influence de chaque surface de la scène géométrique sur une autre de référence, l'influence de l'environnement urbain sur la température de ( $r$ ). Ce traitement implique la considération des influences de manière monodirectionnelle, dans le sens où ( $d$ ) influence ( $r$ ). La surface ( $r$ ) en présence d'environnement s'auto-influence également par multiréflexion. En effet, ( $r$ ) reçoit une part de sa propre énergie qui est réfléchi par ( $d$ ). Cette influence sera considérée incluse dans celle de l'impact de ( $d$ ) sur ( $r$ ). Cette caractéristique fondamentale du modèle, nous la nommons dissymétrie. Elle fera l'objet de plus de discussion au chapitre 6.

### 3.2 Les principes des études d'influence

Afin d'aller au-delà de l'observation des températures de surface, nous voulions suggérer une méthode qui nous permette de définir les causes de la répartition spatiale des valeurs des températures dans un espace urbain donné. Cette méthode a pour objectif d'estimer les influences de chaque facteur et de pouvoir les comparer et les évaluer par rapport aux situations spatiales rencontrées. Avant d'aborder la partie illustration de notre travail, il est nécessaire de définir le vocabulaire utilisé pour exprimer chaque type d'influence.

### 3.2.1.1 Définition du vocabulaire d'étude des influences

La forme urbaine est étudiée à partir de son impact sur les échanges thermiques radiatifs. Ces échanges se caractérisent principalement par les apports thermiques en infrarouge et en solaire des surfaces, du ciel et du soleil.

L'étude d'*impact* des formes urbaines sur les échanges thermiques est désignée ici par l'analyse du *changement de condition thermique de surface* lié à la comparaison de situation urbaine par rapport à une *situation de référence*.

La situation de référence se définit par opposition à la situation urbaine ou urbanisée. En effet, l'impact microclimatique de l'urbain est souvent spécifié dans la littérature par rapport à une situation de rase campagne. A notre échelle, c'est-à-dire micro-locale, il peut exister deux situations de référence :

- La première situation est définie par la température d'une surface de référence située dans un milieu intégrant le ciel et le soleil. Le sol est considéré comme étant influent thermiquement de façon similaire aux autres surfaces urbaines. Cela permet de définir, l'influence de toutes les surfaces minérales (y compris celle du sol) sur la température de la surface de référence.

- La seconde situation de référence où la surface de référence est considérée dans une situation réelle ou naturelle (de rase campagne), c'est-à-dire comportant l'influence du sol parallèlement à celle du ciel et du soleil. Cette situation comparée à une autre plus complexe (urbanisée), permet de définir l'impact de l'urbanisation sur la température de la surface de référence. Les influences thermiques du sol ne sont considérées que par l'implication des autres constructions dans l'obstruction d'une partie de ce dernier.

L'étude basée donc sur la comparaison d'états ou de situations thermiques, mène vers l'utilisation d'une terminologie dont la définition est nécessaire à la compréhension des impacts.

Le *changement d'état thermique* est défini par la différence de température de surface occasionnée par le *changement d'environnement* par rapport à celui de référence. Cette différence de température constitue pour nous la définition première de l'*influence*. Suivant le type d'influence étudié, d'autres termes plus spécifiques se substitueront au terme influence qui reste général.

Dans ce chapitre seront présentés, les différents termes utilisés et leurs renvois aux types d'influence étudiés.

### Surface de référence

Elle est définie comme la surface urbaine qui est présente dans les deux situations, c'est-à-dire de référence et celle analysée. Elle est généralement appelée ( $r$ ) et constitue la surface dont on analyse les changements subis.

### Impact ou bilan des influences :

Il exprime le bilan de changement de température de la surface de référence dû à la transformation de son environnement radiatif.

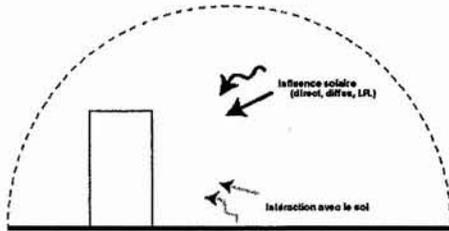


Figure 3.5 Les influences de l'environnement de référence

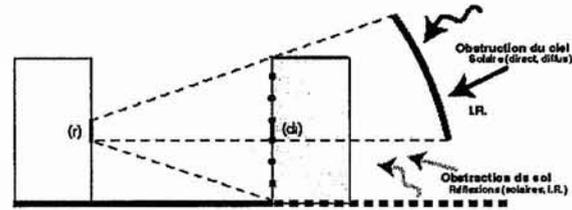


Figure 3.6 Les impacts dus aux apports et aux obstructions

L'impact est défini plus concrètement par la différence de température entre une situation de surface située en rase campagne (situation de référence) et une situation complexe urbaine (situation urbaine étudiée).

La température de surface se trouvant dans une situation de référence peut être appelée température de référence.

Si la valeur de l'impact est négative (souvent exprimé en °C), cela signifie que le bilan des influences est négatif. C'est-à-dire que la température de surface en milieu urbain spécifique et dans un cadre climatique particulier va être inférieure à celle liée à la situation de rase campagne.

Si la valeur de l'impact est positive, cela implique que la situation climatique confrontée à la configuration urbaine analysée participe à l'élévation de la température de surface.

L'impact ou bilan s'exprime par la somme des pertes et des apports qui sont définis ci-dessous.

$$\text{Bilan} = \Sigma \text{apports} + \Sigma \text{pertes}$$

### Les apports

Dans le bilan nous avons pu observer la présence de termes qui sont aussi bien négatifs que positifs. Les termes positifs sont définis comme apports, alors que les termes négatifs comme pertes.

Les apports définissent les influences thermiques des surfaces, observées sur une surface de référence, et cela de par leur émission thermique et leur réflexion des flux.

### Les pertes

Elles se définissent comme changements négatifs de la température de surface de référence due à l'occultation d'une partie de son environnement de référence caractéristique de la température de référence. Les pertes sont déterminées par l'obstruction du ciel, du soleil ou du sol.

### Les contributions

Les contributions sont également des apports, mais seront définies ici comme les influences des surfaces sur la température de référence spécifique de la situation de rase campagne. Les contributions seront utilisées pour désigner l'impact de l'urbanisation du lieu sur les températures de surface. Les contributions prennent en compte le sol en situation de référence. Le sol urbain n'est pris en compte que dans le cas de variation de condition de sol entre la situation de référence et celle analysée.

## 3.2.2 Analyse des influences

Nous avons présenté plus haut deux types d'analyse des influences thermiques qu'il est possible d'effectuer dans un espace urbain donné : analyse physique et analyse spatiale. Ces analyses dépendront de la définition de descripteurs physiques ou spatiaux que nous présentons ici. Les descripteurs déterminés dans cette recherche se définissent comme grandeurs physiques permettant l'estimation et l'évaluation des impacts thermiques radiatifs.

### 3.2.2.1 Analyse Physique

Nous rappelons que l'expression du bilan des influences est :

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r\sigma\cdot 4\cdot T_m^3 + h_e + c_r)} + \frac{(\psi'_{ra} - \psi_{ra})(L_r\downarrow + D_r\downarrow)}{(\varepsilon_r\sigma\cdot 4\cdot T_m^3 + h_e + c_r)} + \frac{(F'_{r\_env} - F_{r\_env})(\alpha_{env}(1-\alpha_r)\Phi_{env} + \varepsilon_{env}\sigma\cdot T_{env}^4)}{(\varepsilon_r\sigma\cdot 4\cdot T_m^3 + h_e + c_r)} + \frac{F_{r\_d}[\alpha_d(1-\alpha_r)\Phi_d + \varepsilon_d\sigma\cdot T_d^4]}{(\varepsilon_r\sigma\cdot 4\cdot T_m^3 + h_e + c_r)} \quad (3.40)$$

soit,

$$\Delta T_r = \Delta T_{r\_d} + \Delta T_{r\_ciel} + \Delta T_{r\_env} + \Delta T_{r\_flux\_direct} \quad (3.41)$$

$$Infl\_total = Infl_{flux\_direct} + Infl_{ciel} + Infl_{env} + Infl_d$$

Ce bilan exprime donc la somme des influences par :

$Infl_d$ ou $\Delta T_{r\_d}$	l'apport de la surface ( $d$ ) de par son émission infrarouge et ses réflexions dans la bande solaire,
$Infl_{ciel}$ ou $\Delta T_{r\_ciel}$	l'obstruction par ( $d$ ) du ciel,
$Infl_{flux\_direct}$ ou $\Delta T_{r\_sol}$	l'obstruction par ( $d$ ) du soleil,
$Infl_{env}$ ou $\Delta T_{r\_env}$	l'obstruction par ( $d$ ) de l'environnement.

Trois types d'indicateur peuvent être définis :

*Les indicateurs d'influence :*

- en terme de température tels que :

$$\Delta T_{r\_total}, \Delta T_{r\_d}, \Delta T_{r\_env}, \Delta T_{r\_ciel}, \Delta T_{r\_soleil}$$

- en terme de flux :

$$\Delta \Phi_{r\_total}, \Delta \Phi_{r\_d}, \Delta \Phi_{r\_env}, \Delta \Phi_{r\_ciel}, \Delta \Phi_{r\_soleil}$$

*Les indicateurs des influences relatives :*

Ils permettent de définir le degré d'influence d'un facteur par rapport à un autre.

- Le rapport de l'influence en CLO de (d) par rapport à son influence totale ou par rapport à son influence par son émission infrarouge :

$$Infl_{d\_flux} = \Delta T_{d\_flux} / \Delta T_{r\_d} \cdot 100 \quad (\%)$$

$$Infl_{d\_flux} = \Delta T_{d\_flux} / \Delta T_{r\_temp} \cdot 100 \quad (\%)$$

- Le rapport entre les apports de (d) et les pertes par obstruction :

Obstruction du ciel

$$Infl_{d\_ciel} = \Delta T_{r\_d} / \Delta T_{r\_ciel} \cdot 100 \quad (\%)$$

Obstruction du ciel et le soleil :

$$Infl_{d\_ciel} = \Delta T_{r\_d} / (\Delta T_{r\_ciel} + \Delta T_{r\_soleil}) \cdot 100 \quad (\%)$$

Toutes les obstructions :

$$Infl_{d\_ciel} = \Delta T_{r\_d} / (\Delta T_{r\_ciel} + \Delta T_{r\_soleil} + \Delta T_{r\_sol}) \cdot 100 \quad (\%)$$

*Les indicateurs de grandeurs physiques limites :*

Ils expriment la valeur limite, à partir de laquelle, une influence en terme de température ne dépasse pas une valeur considérée comme seuil.

Albédo limite :

$$\alpha_{d\_limit} = \frac{\Delta T_{r\_seuil} (h_r + c_r + 4\sigma T_m^3) - \varepsilon \sigma T_d^4}{F_{d\_r} (1 - \alpha_r) \Phi_d} \quad (3.42)$$

$$\alpha_{r\_limit} = \frac{1 - \left[ \frac{\Delta T_{r\_seuil} (h_r + c_r + 4\sigma T_m^3) - \varepsilon \sigma T_d^4}{F_{d\_r}} \right]}{\alpha_d \Phi_d} \quad (3.43)$$

avec  $0 \leq \alpha \leq 1$

Coefficient de transfert convectif limite :

$$h_{r\_limit} = \left[ \frac{F_{d,r} (\alpha_d (1-\alpha_r) \Phi_d + \varepsilon \sigma T_d^4)}{\Delta T_{r\_seuil}} - (c_r + 4\sigma T_m^3) \right] \quad (3.44)$$

### 3.2.2.2 Etude spatiale

Il s'agit, par cette étude, de définir le rapport existant entre facteurs physiques et formels de l'espace, et les ambiances thermiques extérieures.

Cette étude est possible par l'application du modèle d'analyse des influences sur un site discrétisé. Celui-ci nous permet d'observer la répartition des influences (changement de température) dans une configuration urbaine complexe.

Nous avons adopté également, une approche explicative basée sur la définition de descripteurs spatiaux qui nous permettront :

- de situer les influences tout en isolant les facteurs les plus influents sur les ambiances thermiques urbaines,
- de réaliser une étude comparative des ambiances thermiques de plusieurs configurations spatiales.

La définition des descripteurs spatiaux, dépend de ce que nous avons appelé, *les facteurs de forme limites*.

#### ***Le facteur de forme limite***

La valeur du facteur de forme limite se définit quand le facteur de forme induit une élévation de température de la surface ( $r$ ) supérieure ou égale à  $\Delta T_r$  fixée et qui est appelée valeur seuil.

Ceci nous conduit à énoncer que toutes les valeurs de facteur de forme supérieures à  $F_{limit}$  impliquent une élévation de température de ( $r$ ) supérieure au seuil.

L'intérêt d'utilisation du facteur de forme comme descripteur spatial réside dans le fait qu'il est :

- un nombre adimensionnel,
- représentatif des caractéristiques formelles des surfaces (surfaces, disposition ; distance, orientation relative),
- indicateur du degré d'échange thermique que peut impliquer une disposition. Les échanges sont proportionnels aux valeurs des facteurs de formes.

L'influence totale de ( $d$ ) sur ( $r$ ) s'écrit comme suit :

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r) \Delta \Phi_r + \Delta \psi_{r_s} (L_s \downarrow + D_s \downarrow) + \Delta F_{r\_env} [\alpha_{env} (1-\alpha_r) \Phi_{env} + \varepsilon_{env} \sigma T_{env}^4] + F_{r\_d} [\alpha_d (1-\alpha_r) \Phi_d + \varepsilon_d \sigma T_d^4]}{(\varepsilon_r \sigma 4 T_m^3 + h e_r + c_r)} \quad (3.45)$$

Soit, en dégagant les facteurs de formes, nous obtenons :

$$F_{r,d} = \frac{\Delta T_r [\varepsilon_r \sigma 4T_m^3 + he_r + c_r] - (1-\alpha_r) \Delta \Phi_r - \Delta \psi_{rs} L_s \downarrow - \Delta F_{env,r} [\alpha_{env} (1-\alpha_r) \Phi_{env} + \varepsilon_{env} \sigma T_{env}^4]}{[\alpha_d (1-\alpha_r) \Phi_d + \varepsilon_d \sigma T_d^4]} \quad (3.46)$$

$$\Delta \psi_{rs} = \frac{\Delta T_r [\varepsilon_r \sigma 4T_m^3 + he_r + c_r] - (1-\alpha_r) \Delta \Phi_r - F_{r,d} [\alpha_d (1-\alpha_r) \Phi_d + \varepsilon_d \sigma T_d^4] - \Delta F_{env,r} [\alpha_{env} (1-\alpha_r) \Phi_{env} + \varepsilon_{env} \sigma T_{env}^4]}{(L_s \downarrow + D_s \downarrow)} \quad (3.47)$$

$$\Delta F_{r,env} = \frac{\Delta T_r [\varepsilon_r \sigma 4T_m^3 + he_r + c_r] - (1-\alpha_r) \Delta \Phi_r - F_{r,d} [\alpha_d (1-\alpha_r) \Phi_d + \varepsilon_d \sigma T_d^4] - \Delta \psi_{rs} (L_s \downarrow + D_s \downarrow)}{[\alpha_{env} (1-\alpha_r) \Phi_{env} + \varepsilon_{env} \sigma T_{env}^4]} \quad (3.48)$$

Les facteurs de forme limite s'écrivent comme suit :

$$F_{r,d\_limit} = \frac{\Delta T_{r\_seuil} [\varepsilon_r \sigma 4T_m^3 + he_r + c_r] - (1-\alpha_r) \Delta \Phi_r - \Delta \psi_{rs} (L_s \downarrow + D_s \downarrow) - \Delta F_{r,env} [\alpha_{env} (1-\alpha_r) \Phi_{env} + \varepsilon_{env} \sigma T_{env}^4]}{[\alpha_d (1-\alpha_r) \Phi_d + \varepsilon_d \sigma T_d^4]} \quad (3.49)$$

$$\Delta \psi_{rs\_limit} = \frac{\Delta T_{r\_seuil} [\varepsilon_r \sigma 4T_m^3 + he_r + c_r] - (1-\alpha_r) \Delta \Phi_r - F_{r,d} [\alpha_d (1-\alpha_r) \Phi_d + \varepsilon_d \sigma T_d^4] - \Delta F_{r,env} [\alpha_{env} (1-\alpha_r) \Phi_{env} + \varepsilon_{env} \sigma T_{env}^4]}{(L_s \downarrow + D_s \downarrow)} \quad (3.50)$$

$$\Delta F_{r,env\_limit} = \frac{\Delta T_{r\_seuil} [\varepsilon_r \sigma 4T_m^3 + he_r + c_r] - (1-\alpha_r) \Delta \Phi_r - F_{r,d} [\alpha_d (1-\alpha_r) \Phi_d + \varepsilon_d \sigma T_d^4] - \Delta \psi_{rs} (L_s \downarrow + D_s \downarrow)}{[\alpha_{env} (1-\alpha_r) \Phi_{env} + \varepsilon_{env} \sigma T_{env}^4]} \quad (3.51)$$

Dans une situation discrétisée, où une surface ne peut opérer qu'une seule obstruction à la fois, les facteurs limites se définissent comme suit :

Dans le cas d'obstruction du ciel :

$$\Delta \psi_{rs\_limit} = \frac{\Delta T_{r\_seuil} [\varepsilon_r \sigma 4T_m^3 + he_r + c_r] - (1-\alpha_r) \Delta \Phi_r}{[\alpha_d (1-\alpha_r) \Phi_d + \varepsilon_d \sigma T_d^4] - (L_s \downarrow + D_s \downarrow)} \quad (3.52)$$

avec,

$$\Delta \psi_{rs} = -F_{r,d} \text{ et } \Delta F_{r,env} = 0$$

Dans le cas d'obstruction de l'environnement :

$$\Delta F_{r,env\_limit} = \frac{\Delta T_{r\_seuil} [\varepsilon_r \sigma 4T_m^3 + he_r + c_r]}{[\alpha_d (1-\alpha_r) \Phi_d + \varepsilon_d \sigma T_d^4] - [\alpha_{env} (1-\alpha_r) \Phi_{env} + \varepsilon_{env} \sigma T_{env}^4]}$$

( 3.53)

avec,

$$\Delta F_{r_{env}} = -F_{r_d} \text{ et } \Delta \psi_{rs} = 0$$

Dans le cas où ne seraient considérées que les influences de la surface ( $d$ ) :

$$F_{r_d\_limit} = \frac{\Delta T_{r_d\_seuil} [\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4T_m^3 + h e_r + c_r]}{[\alpha_d \cdot (1 - \alpha_r) \Phi_d + \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot T_d^4]} \quad ( 3.54)$$

Pour chaque valeur de facteur de forme limite, il est possible de proposer un nombre infini de situations qui induirait une élévation des températures de surface supérieure au seuil fixé.

### ***La zone d'influence***

La compréhension des échanges thermiques entre faces dépend de l'étude de la répartition spatiale des valeurs de facteur de forme dans un environnement discrétisé.

A chaque face correspond une autre face avec laquelle la valeur du facteur de forme est maximum. Autour de cette valeur maximale, les facteurs de forme entre une face de référence avec celles l'entourant diminuent au fur et à mesure qu'on s'en éloigne. Nous pensons que ce phénomène peut être également observé pour les échanges radiatifs. Avant d'expliquer et de développer cet aspect des échanges, quelques relations et observations complémentaires sont mis en relief. Nous tenterons de les développer sur deux cas fréquemment rencontrés en milieu urbain : deux surfaces perpendiculaires entre elles et parallèles entre elles. Ces simples exemples de relation entre surfaces perpendiculaires et parallèles entre elles, permettront de mieux cerner ce que nous avons défini comme "*zone d'influence*".

### ***Surfaces perpendiculaires***

L'objectif de cette investigation est de définir la situation d'une face dont la valeur du facteur de forme, avec une autre face de référence perpendiculaire à la première, serait maximale. Ceci s'effectuant par l'analyse de l'expression des facteurs de forme présentée comme suit :

A une valeur  $F_{max}$  de facteur de forme maximale, correspond une dérivée nulle :  $dF_{12} = 0$ .

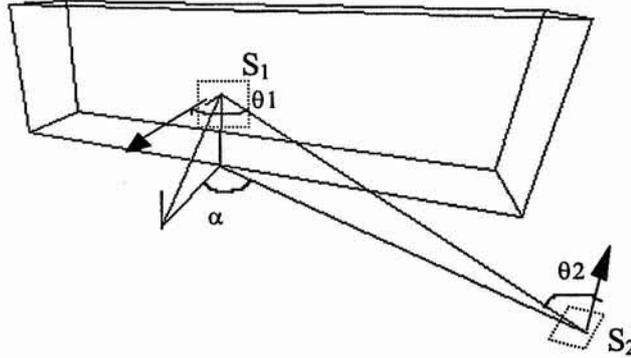


Figure 3.7 Analyse des valeurs de facteurs de formes entre deux surfaces perpendiculaires

$$\Delta F_{12} = \frac{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2 \cdot \Delta S_2}{\pi \cdot r^2}, \text{ en considérant que } \Delta S_2 = 1 \quad (3.55)$$

$$\Delta F_{12} \cdot \pi = \frac{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2}{r^2} \quad (3.56)$$

Soit :

$$\left. \begin{array}{l} \cos\theta_1 = \frac{a}{r} \\ \cos\theta_2 = \frac{h}{r} \end{array} \right\} \Rightarrow \cos\theta_1 = \frac{a}{h} \cdot \cos\theta_2 \quad (3.57)$$

et,

$$\left. \begin{array}{l} \cos\alpha = \frac{a}{r'} \\ \sin\theta_2 = \frac{r'}{r} \end{array} \right\} \Rightarrow a = r \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\alpha \quad (3.58)$$

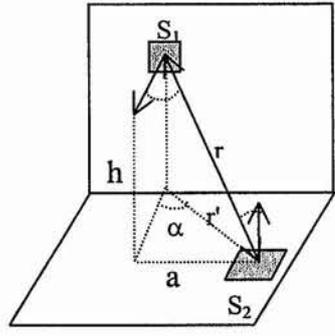


Figure 3.8 Facteur de forme entre deux éléments de face

En considérant l'équation (3.57) et l'équation (3.58) dans l'équation (3.56), nous obtenons :

$$\Delta F_{12} \cdot \pi = \left( \frac{r \cdot \sin\theta_2 \cdot \cos\alpha}{h} \right) \cdot \left( \frac{\cos^2\theta_2}{r^2} \right) \quad (3.59)$$

$$\Delta F_{12} \cdot \pi = \frac{\sin \theta_2 \cdot \cos \alpha \cdot \cos^2 \theta_2}{h \left( \frac{h}{\cos \theta_2} \right)} \quad (3.60)$$

$$\Delta F_{12} \cdot \pi = \frac{\sin \theta_2 \cdot \cos^3 \theta_2}{h^2} \cdot \cos \alpha \quad (3.61)$$

$\Delta F_{12}$  est maximum quand  $\cos \alpha = 1$  d'où  $\alpha = 0$ .  
 $(\Delta F_{12} \cdot \pi)$  s'exprime comme suit :

$$\Delta F_{12} \cdot \pi = \frac{\cos^3 \theta_2 \cdot \sin \theta_2}{h^2} \quad (3.62)$$

$\Delta F_{12}$  est maximum lorsque  $df = 0$ , avec  $f = \cos^3 \theta_2 \cdot \sin \theta_2$  (3.63)

$$df = 3 \sin^2 \theta_2 - \cos^2 \theta_2 \quad (3.64)$$

$$df = 0 \Rightarrow \theta_2 = 30^\circ$$

Soit  $F_{12}$  est maximum quand  $\alpha = 0$  et  $\theta_2 = 30^\circ$  (cf. fig.3.9)

Par cette démonstration, nous aboutissons à des valeurs d'angle et de distance bien précises, qui dépendent de la hauteur de l'élément de face de référence.

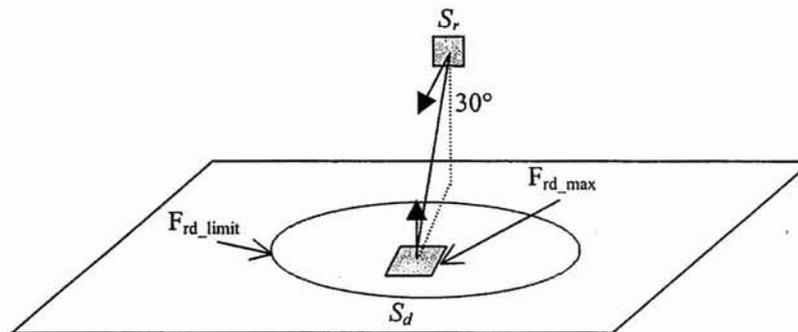


Figure 3.9 Schématisation de la zone d'influence entre deux surfaces élémentaires perpendiculaires.

### Surfaces parallèles

Pour des surfaces parallèles (cf. équation 3.14), la valeur de facteur de forme est maximale pour une distance  $r$  minimale et pour un produit :  $\cos\theta_1 \cos\theta_2$  qui serait égal à 1.

Ceci est possible que dans le cas où :  $\cos\theta_1 = 1$  et  $\cos\theta_2 = 1$ , c'est-à-dire pour des situations de surfaces parallèles se trouvant sur le même axe normal

Nous pouvons déduire de l'expression des facteurs de forme la décroissance des valeurs au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la valeur maximale (cf. fig.3.9 & fig.3.10). Cette décroissance s'effectue en lignes d'iso-valeurs qui définissent une aire de valeurs, que nous définirons comme *aire d'influence*, si cette dernière regroupe les différentes facettes dont les valeurs de facteurs de forme sont supérieures à celle du facteur de forme limite.

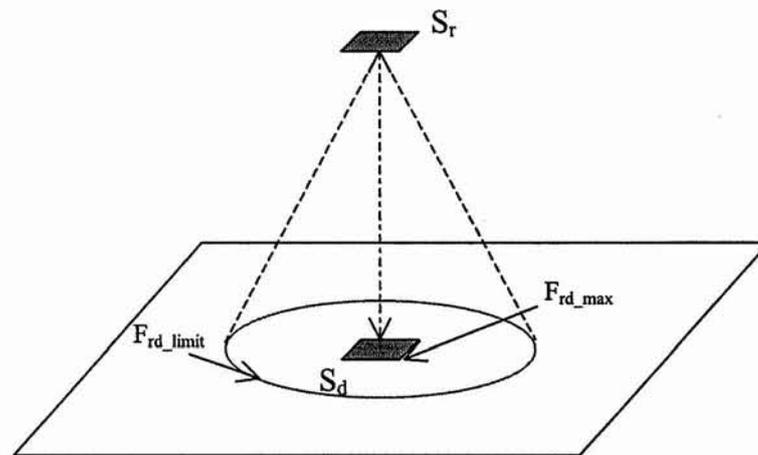


Figure 3.10 La zone d'influence pour deux faces parallèles

La définition du *facteur de forme limite* dépend des caractéristiques d'échange (cf. §3.1.4.1 ) entre les surfaces ( $r$ ) et ( $d$ ), et non de leur situation. Il délimite ainsi la zone d'influence, qui regroupe toutes les facettes dont l'influence est supérieure au seuil fixé.

Pour une zone homogène par rapport à ces caractéristiques physiques, la valeur du facteur de forme est proportionnelle à celle des variations de température de surface. Plus on s'éloigne plus les échanges sont faibles et les températures le sont également.

Cependant, plus la valeur du *facteur de forme limite* est faible plus la *zone d'influence* est grande. Ainsi, pour  $F_{limit}$  plus petit, nous avons un rapport  $\Delta T_{max}/\Delta T_{seuil}$  qui augmente et par delà la zone d'influence est grande.

Les descripteurs définis à partir du facteur de forme limite permettent de déterminer le degré de sensibilité des ambiances thermiques aux variations physiques et spatiales des espaces urbains. Les deux grands types de sensibilité étudiés sont donc :

*Sensibilité de type spatial* : c'est la sensibilité de l'environnement thermique aux différents facteurs qui dépendent principalement des caractéristiques géométriques et topologiques de l'espace et des bâtiments, que nous pouvons exploiter grâce aux répartitions spatiales des influences et aux zones d'influence.

*Sensibilité de type physique* : c'est la sensibilité de l'environnement thermique urbain aux caractéristiques physiques de surface (albédo, températures,...), de paroi (conductance, ...), et de l'air (température interne et externe, turbulence de l'air...).

Notre recherche s'effectue à l'échelle de l'espace urbain. Ceci nous oblige à utiliser une discrétisation spatiale pouvant exprimer les variations thermiques à l'échelle du piéton.

### 3.2.2.3 Echelle d'observation

L'observation des influences entre petites surfaces n'exclut pas l'analyse d'influence entre bâtiments. Ce choix de positionnement est lié à la volonté de comprendre les variations thermiques à l'échelle du piéton. Nous tenterons de démontrer que chaque échelle spatiale d'analyse, implique la définition d'ordres de grandeurs des influences spécifiques. Les études d'impacts thermiques sont tributaires de l'échelle d'observation et de résolution.

Soit ( $r$ ) et ( $d$ ) deux surfaces infiniment petites appartenant respectivement à deux plus grandes surfaces ( $R$ ) et ( $D$ ).

$$F_{r,d\_limite} = \frac{\Delta T_{r\_seuil} [\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4T_m^3 + h + c] - (1 - \alpha_r) \Delta \Phi_r - \Delta \psi_{rs} \cdot L_s \downarrow - \Delta F_{r\_env} [\alpha_{env} \cdot (1 - \alpha_r) \Phi_{env} + \varepsilon_{env} \cdot \sigma \cdot T_{env}^4]}{[\alpha_d \cdot (1 - \alpha_r) \Phi_d + \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot T_d^4]} \quad (3.65)$$

Par l'équation générale des influences, il s'agit de mettre en exergue les relations entre les surfaces ( $r$ ) et ( $d$ ). Si nous devons opérer à des échelles plus grandes, quels rapports entretiendraient cette influence avec des influences d'ordre global ? C'est-à-dire, entre les surfaces ( $R$ ) et ( $D$ ) qui peuvent être des façades de bâtiment par exemple.

La réponse résidera partiellement dans la définition des rapports existant entre  $F_{R,D}$  et  $F_{r,d}$ .

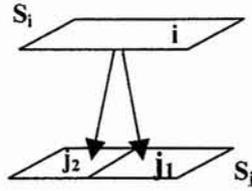


Figure 3.11 Relation du facteur de forme entre  $S_i$  et  $(S_{j1}, S_{j2})$  avec celui entre  $S_i$  et  $S_j$ .

En supposant deux surfaces  $S_i$  et  $S_j$ , il est possible de noter :

$$F_{ij} = F_{i(j1+j2)} = F_{i-j1} + F_{i-j2} \quad (\text{Sacadura 1982})$$

Notre analyse se basera sur l'application cette relation. Nous sommes donc en mesure d'écrire que :

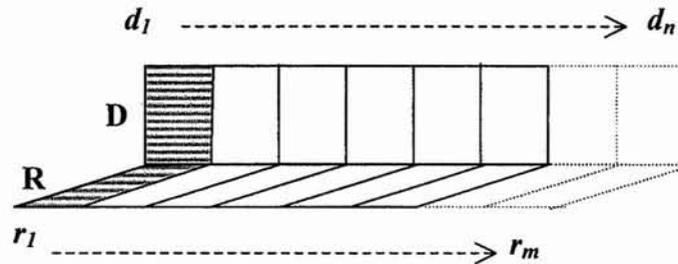


Figure 3.12 Relation des facteurs de forme entre  $D$  et  $R$  avec celui entre  $d$  et  $r$

$$\left. \begin{aligned} F_{R-D} &= \sum F_{R-r} \\ S_R \cdot F_{R-d} &= S_d \cdot F_{d-R} \end{aligned} \right\} \Rightarrow F_{R-D} = \frac{S_d}{S_R} \sum F_{d-R} \quad (3.66)$$

En remplaçant  $F_{d-R} = \sum F_{d-r}$  dans l'équation (3.16), nous obtenons :

$$F_{R-D} = \frac{S_d}{S_R} \sum_r \sum_d F_{d-r} \quad (3.67)$$

Par l'expression de réciprocité nous avons :

$$F_{R-D} = \frac{S_d}{S_R} \sum_r \sum_d \frac{S_r}{S_d} F_{r-d} \quad (3.68)$$

soit :

$$F_{R-D} = \frac{S_r}{S_R} \sum_r \sum_d F_{r-d}$$

(3.69)

Si nous considérons que les surfaces ( $r$ ) et ( $d$ ) sont composées respectivement de  $n$  surfaces ( $i$ ) et de  $m$  surfaces ( $j$ ), (cf. fig.3.12) nous pouvons noter que :

$$S_R = n.S_r \text{ et } S_D = m.S_d \quad (3.70)$$

alors l'équation (3.21) devient :

$$F_{R,D} = \frac{1}{n} \sum_{rd} F_{r,d} \quad (3.71)$$

Par la même réflexion nous obtenons :

$$F_{D,R} = \frac{1}{m} \sum_{rd} F_{d,r} \quad (3.72)$$

Considérons  $F_{r,d \text{ moy}}$  la moyenne des valeurs  $F_{r,d}$ . Ainsi :

$$\left. \begin{aligned} F_{r,d \text{ moy}} &= \sum_{rd} F_{r,d} / m.n \\ F_{R,d} &= \frac{1}{n} \sum_{rd} F_{r,d} \end{aligned} \right\} \Rightarrow F_{R,D} = m.F_{r,d \text{ moy}} \quad (3.73)$$

Cette relation nous amène à énoncer une remarque très importante concernant le rapport des influences avec l'échelle d'étude.

Ainsi, les ordres de grandeurs de  $\Delta T_r$  sont beaucoup plus petits ( $m$  fois dans le développement théorique) que  $\Delta T_R$ .

L'expression générale des influences par échange radiatif (cf. équation 3.65), entre ( $r$ ) et ( $d$ ), peut s'exprimer de manière plus synthétique par :

$$\Delta T_r = F_{r,d} \Phi^* / (h e_r + c_r + 4\sigma T_m^3) \quad (3.74)$$

Si l'échelle d'étude est celle de la ville, le  $\Delta T_{seuil}$  constitue la plus petite variation de température entre ville et campagne qui nous permet d'établir une situation d'îlot de chaleur par exemple. Pour la définition des variations de température à l'échelle d'un quartier, avec un  $F_{R,D}$  définissant le facteur de forme entre façades, le facteur de forme limite sera déterminé pour une valeur de température seuil  $\Delta T_{R_{seuil}}$  qui sera plus importante que le seuil défini à échelle réduite  $\Delta T_{r_{seuil}}$ .

$\Delta T_{seuil_{RD}}$  ne définit pas  $\Delta T_{ville_{campagne}}$  qui exprime principalement, les différences de température d'air définissant le phénomène d'îlot de chaleur.

Les phénomènes physiques observés à l'échelle macro de la ville, résultent des manifestations climatiques thermiques se produisant à l'échelle micro. Les relations existantes entre ces deux échelles sont difficiles à déterminer.

Nous avons tenté ici par la mise en relation des échanges radiatifs à l'échelle des facettes par rapport à celle des bâtiments de montrer leur interdépendance et la spécificité des grandeurs physiques et spatiales caractéristiques de la situation analysée.

### 3.2.3 Simulation solaire et thermique : SOLENE

Le modèle d'analyse des influences repose sur un nombre de paramètres qui sont, soit donnés par la littérature (tels que les coefficients), soit mesurés. Les densités de flux et températures de surface sont des entrées de notre modèle d'analyse des influences, et sont préalablement calculés par le logiciel Solène développé au laboratoire CERMA depuis 1985. (CERMA 1991)

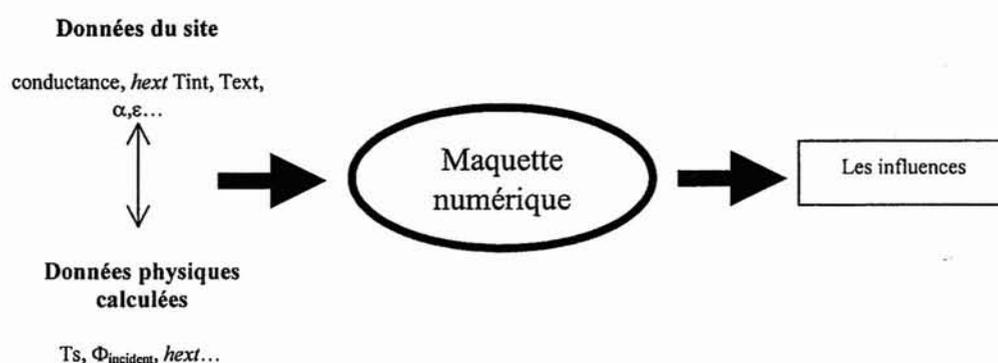


Figure 3.13 Diagramme du processus de calcul des influences.

Solène met en œuvre des procédures permettant d'estimer la densité de flux solaire incidente prenant en considération les facteurs liés à la latitude, au temps et au site (caractéristiques physiques du matériau et géométrie). Les simulations solaires reposent sur la réalisation d'héliodons numériques ; c'est-à-dire des vues axonométriques réalisées suivant la situation angulaire du soleil avec élimination des parties cachées d'une maquette numérique 3D. La définition des zones à l'ombre et au soleil, s'effectue grâce à la réalisation de projection axonométrique selon une situation d'observateur définie par les coordonnées angulaires solaires. Le traitement des vues axonométriques en opération booléenne permet la définition des parties de la scène qui sont hors de portée des rayonnements solaires directs.

L'estimation énergétique des rayonnements solaires incidents s'effectue grâce aux formules de P. de Brichambaut (1975) qui se restreignent au cas de ciel clair (pur, normal ou pollué). Le développement des recherches sur l'éclairement en milieu urbain par F. Miguet a permis la prise en compte des flux solaires directs et diffus aussi bien par ciel clair ou nuageux grâce aux modèles statistiques de distribution des luminances de Perez (Miguet 1996).

L'estimation des multiréflexions est possible par l'introduction du modèle de *radiosité* et de calcul des valeurs de facteur de forme. En effet, Solène, tel que nous l'utilisons ici, ne calcule les énergies que dans le cadre des multiréflexions diffuses hémisphériques.

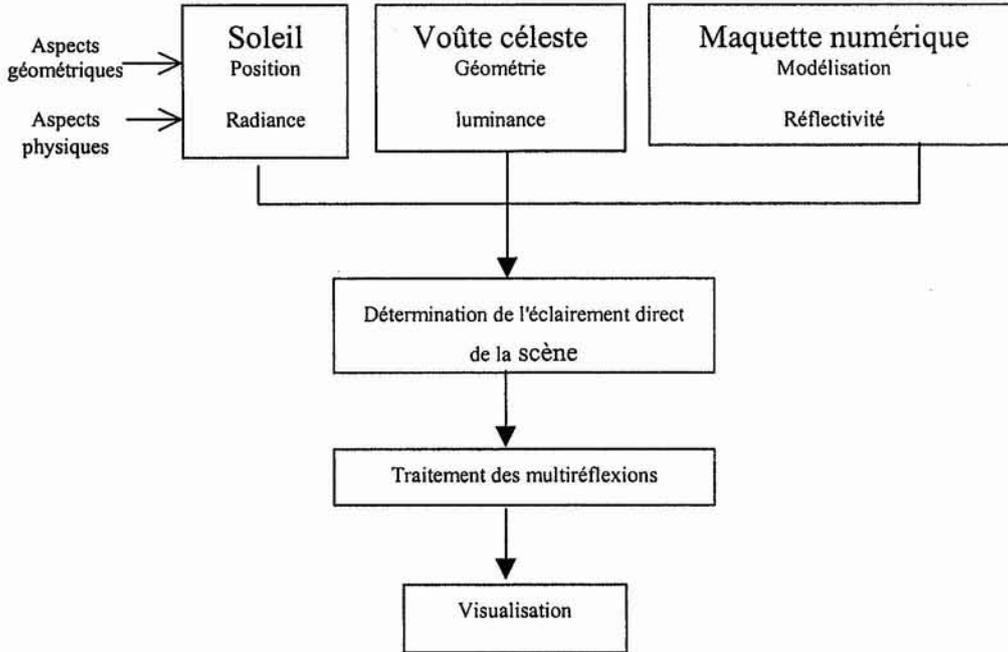


Figure 3.14 Diagramme général du processus de simulation de l'éclairage urbain (Miguet 1996).

La modélisation des calculs des températures de surfaces a commencé à se développer en 1997 (Antoine 1997). Les premiers développements concernent l'estimation des températures en régime permanent. Le modèle thermique développé est essentiellement bidimensionnel et est intégré aux outils de calculs solaires tridimensionnels.

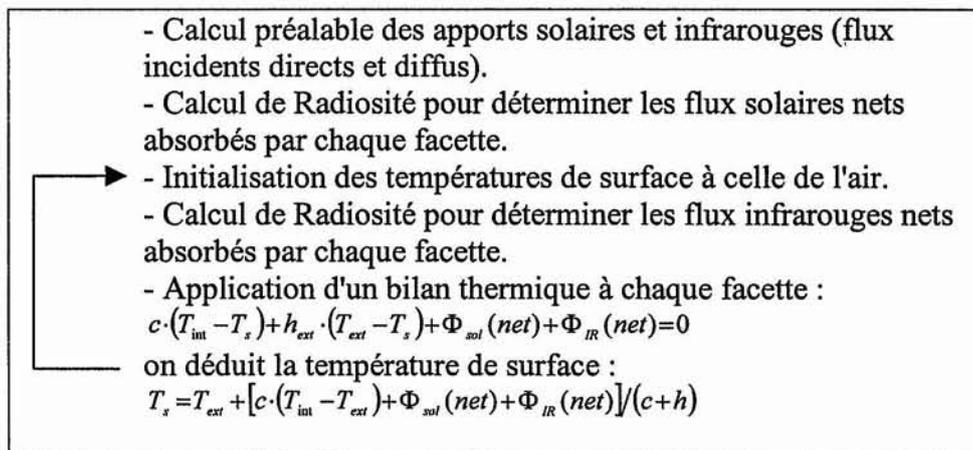


Figure 3.15 Etape de simulation de température de surface d'après Antoine (1997).

Les travaux de J. Vinet (1998) tentent d'introduire l'instationnaire et le couplage thermo-aéraulique dans l'estimation des températures de surface et celle de l'air.

Nous résumons ci-dessous les différents types de simulation que peut effectuer Solène ainsi que les développements en cours :

- *Simulation solaire et d'éclairage naturel :*

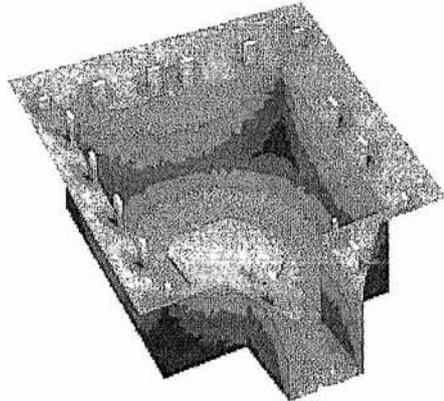


Figure 3.16 Simulation de l'éclairage naturelle dans la cour Mériadec à Nantes (Miguet et al. 1996)

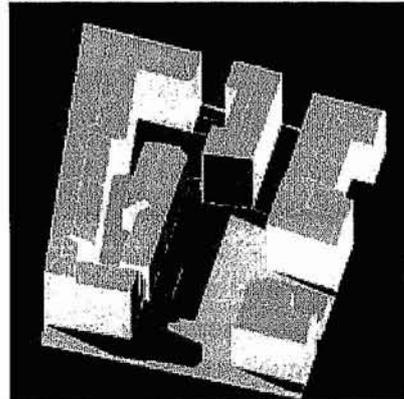
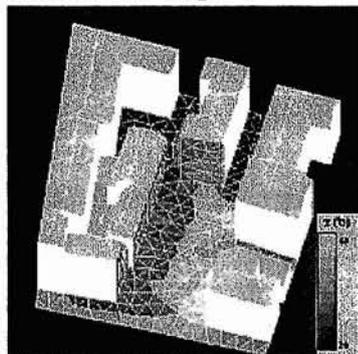


Figure 3.17 Simulation solaire du square Fleuriot à Nantes

Le modèle solaire et énergétique est l'un des premiers outils de simulation climatique que développe le laboratoire CERMA. Ces modélisations intègrent des aspects de type de ciel et de multiréflexion.

- *Simulation thermique :*



Latitude : 47°  
Date : le 14 juillet à 15h30

Type de ciel : ciel clair  
Réflectivité solaire : 0.5 pour toutes les facettes  
Réflectivité infrarouge : 0.05 pour toutes les facettes  
Conductance : 1 W/m<sup>2</sup>K pour toutes les facettes  
Température interne : 20°C (murs), 15 °C (sol)  
Température d'air externe : 25 °C  
Coefficient de transfert convectif : 20 W/m<sup>2</sup>K

Figure 3.18 Simulation thermique du square Fleuriot (Antoine et al. 1998)

La modélisation des bilans thermiques de surface contribue au développement d'un outil de simulation qui permet l'estimation des températures de ces dernières. Ce travail effectué en régime permanent se prolongera par

l'introduction de régime in-stationnaire, afin d'évaluer les transformations temporelles des températures.

- *simulation hygrométrique (en cours)* :

Le travail entrepris vise l'amélioration des connaissances sur les effets induits par l'eau et la végétation, en milieu urbain. Il prend appui sur le couplage thermo-aéraulique des logiciels SOLENE et N3S (logiciel de simulation de la dynamique des fluides développé par EDF et l'entreprise SIMULOG) et sur la prise en compte des phénomènes hygrométriques. (Vinet 1998).

- *simulation du confort en milieu extérieur (en cours)* :

Ce travail vise la modélisation du confort en milieu extérieur, à partir des équations du bilan hygrométrique de l'individu (Fanger 1972) dans un espace modélisé tridimensionnel. L'objectif de ce dernier est d'intégrer les phénomènes locaux radiatifs, convectifs et hygrométriques.

Ces deux derniers types de simulations sont en cours de développement et ne sont donc pas encore opérationnels.

Les calculs des influences dépendent des estimations des flux solaires incidents, des températures de surface, et des facteurs de formes. Ces derniers sont donc calculés par Solene. L'analyse des influence repose sur le traitement de grandeurs physiques, afin de permettre leur interprétation.

### **3.3 Conclusion**

Nous pouvons résumer les développements liés à nos propositions, présentés dans ce chapitre, comme suit.

Nous avons construit l'expression physique des influences à partir de la comparaison de deux situations thermiques : celle d'une surface isolée puis confrontée à l'influence d'autres surfaces. Elle repose sur un bilan d'échange en régime permanent considérant les températures de l'air extérieures et intérieures constantes.

La formulation simplifiée de cette expression, nous a permis de définir les différents types d'influence (positive ou négative), et le vocabulaire qui leur est associé : les apports, les obstructions, les bilans...

Les facteurs définis (surface, ciel, soleil) décrivent des influences spécifiques.

Le développement numérique du modèle repose sur certaines hypothèses nécessaires à l'isolation des différents facteurs et impacts définis. Ces hypothèses d'investigation sont également fondamentales pour le traitement de géométrie complexe.

Nous avons déterminé également différents types de descripteurs par des grandeurs physiques qui expriment :

- les différences de température de la surface analysée dues à la présence de l'environnement urbain,

- les rapports entre les différents types d'influence : entre les pertes et les apports, etc.
- les influences limites à partir desquelles nous pouvons juger si une influence est négligeable ou satisfaisante.

L'une des grandeurs limites les plus importantes est le *facteur de forme limite*. Il exprime la valeur minimale du facteur de forme entre deux surfaces, à partir de laquelle nous considérerons que l'influence est négligeable ou satisfaisante.

A partir de l'expression des facteur de forme, ils nous a été possible de définir également, la *zone d'influence*. En effet, entre deux surfaces, il existe une situation formelle, qui implique une valeur de facteur de forme maximale. Plus une surface s'éloigne de cette position, plus les valeurs des facteurs de forme diminuent. Cette situation peut décrire une zone, quand elle regroupe toute les faces dont l'influence est supérieure ou inférieure à une valeur donnée.

L'estimation des influences reposent sur les calculs de flux solaires et températures de surface, effectués par Solene. L'interprétation algorithmique des influences met en œuvre différentes estimations suivant la situation physique et spatiale de ( $r$ ) par rapport à ( $d$ ). La caractéristique principale du modèle développé est sa dissymétrie, c'est-à-dire que nous considérons une influence monodirectionnelle dans le sens où ( $d$ ) influence ( $r$ ). Cette dissymétrie fera l'objet de plus de discussion au **chapitre 6**.

Les possibilités de traitement et de visualisation de géométrie complexe grâce à Solene, nous permettent d'illustrer les différentes potentialités d'application du modèle d'analyse des influences, à travers l'exemple de la place du Pilon à Nantes (**chapitre 4**). Cet exemple, présenté dans le chapitre suivant, nous permettra d'aborder les différentes analyses spatiales et physiques des impacts radiatifs thermique que permet le modèle.



## Nomenclature du chapitre

$c$	coefficient d'échange intérieur : $c = \frac{1}{\frac{x}{\lambda} + \frac{1}{h_{int}}}$ (W/ m <sup>2</sup> K)
$C_p$	capacité calorifique (J/Kg°K)
$c_r, c_{ri}$	conductance des paroi ( $r$ ) et ( $d$ )
$D_s \downarrow$	flux solaire diffus incident
$F$	facteur de forme
$F_{limit}$	facteur de forme limite
$F_{r,d}$	facteur de forme entre les surfaces ( $r$ ) et ( $d$ )
$F_{max}$	valeur de facteur de forme maximale entre deux surfaces
$F_{r,d,limit}$	facteur de forme limite entre les surfaces ( $r$ ) et ( $d$ )
$F_{R,D}$	facteur de forme entre les surfaces ( $r$ ) et ( $D$ )
$F_{r,d,moy}$	facteur de forme moyen entre les surfaces ( $r_i$ ) et ( $d_i$ )
$F_{r,env}$	facteur de forme entre ( $r$ ) et ( $env$ )
$F'_{r,env}$	facteur de forme entre ( $r$ ) et ( $env$ )
$h_r, limit$	coefficient de transfert convectif limite (W/m <sup>2</sup> K)
$he_r, he_{ri}$	coefficient d'échange convectif extérieur de ( $r$ ) d'indice $i$ (W/m <sup>2</sup> K)
$h_{int}$	coefficient d'échange convectif intérieur (W/m <sup>2</sup> K),
$Infl_{total}$	influence radiative thermique totale de ( $d$ ) sur ( $r$ )
$Infl_{dj,total}$	influence radiative thermique totale de ( $d$ ) d'indice $j$ sur ( $r$ )
$Infl_{ciel}$	influence radiative thermique due à l'obstruction du ciel de ( $r$ ) par ( $d$ )
$Infl_{env}$	influence radiative thermique due à l'obstruction de l'environnement de ( $r$ ) par ( $d$ )
$Infl_{flux,direct}$	influence radiative thermique due à l'obstruction du soleil de ( $r$ ) par ( $d$ )
$Infl_{dj}$	influence radiative thermique de ( $d$ ) d'indice $j$ sur toute surface ( $r$ )
$Infl_{dj,ri}$	influence radiative thermique de ( $d$ ) d'indice $j$ sur ( $r$ ) d'indice $i$
$L_s \downarrow$	émission I.R. du ciel (W/m <sup>2</sup> )
$S_r, S_d$	surfaces de ( $r$ ) et ( $d$ ) (m <sup>2</sup> )
$T_r$	température de ( $r$ ) (K)
$T'r$	température de ( $r$ ) due en présence de ( $d$ )(K)
$T_{env}$	température de l'environnement (K)
$T_{int}$	température de l'air intérieure (K)
$T_m$	température moyenne d'évolution de ( $r$ ) (K)
$T_{mi}$	température moyenne d'évolution de ( $r$ ) d'indice $i$ (K)
$T_s$	température de surface(K)
$x$	épaisseur de la paroi (m)

$\alpha_r, \alpha_d$	albédo ou réflectivité de ( <i>r</i> ) et ( <i>d</i> )
$\alpha_{r\_limit}, \alpha_{d\_limit}$	albédo ou réflectivité limite de ( <i>r</i> ) ou ( <i>d</i> )
$\alpha_i, \alpha_j$	albédos des surfaces ( <i>i</i> ) et ( <i>j</i> ).
$\varepsilon_r, \varepsilon_d$	émissivité de ( <i>r</i> ) et ( <i>d</i> )
$\Delta F_{r\_env\_limit}$	variation du facteur de forme entre ( <i>r</i> ) et ( <i>env</i> ) due à la présence de ( <i>d</i> )
$\Delta T_r, \Delta T_{ri}$	variation de la température de ( <i>i</i> ) (K ou °C)
$\Delta T_{max}$	variation de température maximale (K ou °C)
$\Delta T_{r\_env}, \Delta T_{ri\_env}$	variation de la température de ( <i>r</i> ) d'indice ( <i>i</i> ) due à l'obstruction de l'environnement par ( <i>d</i> ) (K ou °C)
$\Delta T_{r\_ciel}, \Delta T_{ri\_ciel}$	variation de la température de ( <i>r</i> ) d'indice ( <i>i</i> ) due à l'obstruction du ciel par ( <i>d</i> ) (K ou °C)
$\Delta T_{r\_d}, \Delta T_{ri\_dj}$	variation de la température de ( <i>r</i> ) d'indice ( <i>i</i> ) due à ( <i>d</i> ) (K ou °C)
$\Delta T_{r\_\Phi_r}, \Delta T_{ri\_Phi}$	variation de la température de ( <i>r</i> ) d'indice ( <i>i</i> ) due à l'obstruction du rayonnement solaire direct par ( <i>d</i> ) (K ou °C)
$\Delta T_{seuil}$	différence de température seuil (K ou °C)
$\Delta T_{seuil\_rd}$	différence de température de surface de ( <i>r</i> ) due à ( <i>d</i> ) seuil (K ou °C)
$\Delta T_{ville\_campagne}$	différence de température entre ville et campagne (K ou °C)
$\Delta \Psi_{rs\_limit}$	variation du facteur de vue du ciel entre ( <i>r</i> ) et le ciel due à la présence de ( <i>d</i> )
$\Phi_{conv}$	densité de flux convectif (W/m <sup>2</sup> )
$\Phi_{cond}$	densité de flux conductif (W/m <sup>2</sup> )
$\Phi_{rad}$	densité de flux radiatif (W/m <sup>2</sup> )
$\Phi_{solaire}$	densité de flux solaire (W/m <sup>2</sup> )
$\Phi_{IR}$	densité de flux infrarouge (W/m <sup>2</sup> )
$\Phi_r$	densité de flux incidents sur ( <i>r</i> ) (W/m <sup>2</sup> )
$\Phi_d$	densité de flux incidents sur ( <i>d</i> ) (W/m <sup>2</sup> )
$\Phi_{env}$	densité de flux incidents sur ( <i>env</i> ) (W/m <sup>2</sup> )
$\Phi_j$	densité de flux nets incidents sur ( <i>j</i> ) (W/m <sup>2</sup> )
$\lambda$	conductivité thermique du matériau (W/mK)
$\sigma$	coefficient de Stefan-Boltzmann
$\Psi_{limit}$	facteur de vue du ciel limite
$\Psi_{rs}$	facteur de vue du ciel de la paroi ( <i>r</i> )
$\Psi'_{rs}$	facteur de vue du ciel de la paroi ( <i>r</i> ) en présence de ( <i>d</i> )

**Chapitre 4**  
**Illustrations**  
**Application à un espace urbain.**  
**Exemple de la place du Piloni**



Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les différentes investigations relatives à la construction du modèle et du cadre méthodologique des analyses d'impact. L'expression physique de ce que nous avons défini par influence, a été abordée, ainsi que le vocabulaire qui lui est associé et son interprétation algorithmique.

Dans cette partie, nous illustrons les différentes exploitations du modèle d'analyse des influences présenté précédemment, à travers un exemple urbain : la place du Pilon à Nantes.

Nous rappellerons, en premier lieu, le principe des études des impacts radiatifs thermiques et les différentes grandeurs représentatives de ces derniers. Nous situerons le cadre climatique des analyses effectuées. Ces dernières recouvrent les différents types d'influence définis dans le chapitre précédent : les pertes, les apports et les influences limites exprimées par les grandeurs limites. Autour de ces trois thématiques principales, sont présentés les degrés d'échange ou leur implication dans la caractérisation des impacts.

## 4.1 Analyse des influences radiatives thermiques

### 4.1.1 Introduction

Nous rappellerons le principe des analyses, qui est basé sur la comparaison de la température d'une surface donnée ( $r$ ) (réceptrice), en absence et en présence d'une surface influente ( $d$ ).



Figure 4.1 Place du Pilon à Nantes

L'expression générale des influences est :

$$\Delta T_{r\_d\_total} = \Delta T_{r\_d} - \Delta T_{r\_env} - \Delta T_{r\_soleil} - \Delta T_{r\_ciel} \quad (4.1)$$

Avec :

$\Delta T_{r\_d}$  apport de ( $d$ ) en terme d'émission et de multiréflexion dans les bandes solaires et infrarouges.

$$(\Delta T_{r\_d} = \Delta T_{r\_d\_GLO} + \Delta T_{r\_d\_CLO}).$$

$\Delta T_{r\_env}$  perte en terme de température de ( $r$ ) due à l'obstruction de ( $d$ ) du sol, ou éventuellement due au changement de revêtement de sol.

$\Delta T_{r\_ciel}$	perte en terme de température de ( $r$ ) due à l'obstruction de ( $d$ ) du ciel par rapport à ( $r$ ).
$\Delta T_{r\_soleil}$	perte en terme de température de ( $r$ ) due à l'obstruction du soleil.

L'influence du soleil est considérable par rapport aux autres influences, nous isolerons ce facteur qui fera l'objet d'un traitement particulier.

Cette approche considère les transformations thermiques subies par ( $r$ ), dues à la variation des conditions thermiques entre deux situations : en présence ou en absence de ( $d$ ). Si l'environnement initial de ( $r$ ) est remplacé par un autre moins influent, les différences de conditions thermiques de la surface seront négatives. Des différences de température positives sont observées pour des conditions d'environnement inverses, c'est-à-dire en remplaçant l'environnement de référence par un autre plus influent thermiquement.

Le modèle nous permet d'observer, ces points à travers les bilans d'influence. Il permet également de mettre en relief les différents facteurs intervenant dans les impacts.

Dans un site présentant  $n$  éléments de surface (de même aire), l'analyse mettra en relief deux types de grandeurs physiques importants :

$\Delta T_{r-di}$	constitue l'influence en terme de température d'une surface environnante ( $d_i$ ) sur ( $r$ ).
$\Sigma_n \Delta T_{r-di}$	constitue la somme des influences thermiques des surfaces environnantes ( $\Sigma d_i$ ) de la scène, sur ( $r$ ).

Les premières grandeurs ( $\Delta T_{r-di}$ ), permettent une observation de l'implication de chaque surface ( $d_i$ ) de la scène, dans la modification de la température de la surface de référence ( $r$ ).

Les grandeurs suivantes ( $\Sigma_n \Delta T_{r-di}$ ), permettent de mettre en relief l'influence globale qu'induisent toutes les surfaces ( $d_i$ ) sur chaque facette de référence de la scène.

La première représentation des influences donne une vision très localisée des influences, tandis que la deuxième tente de construire cette perception des impacts, de manière plus synoptique.

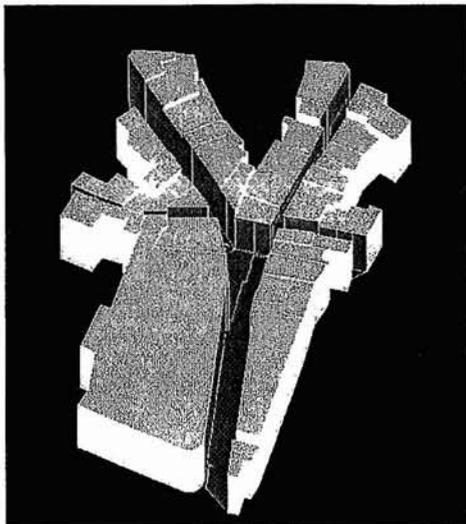


Figure 4.2 Ensoleillement de la place du Pilon le 21 juin

Afin de démontrer l'applicabilité et l'intérêt de ce type d'approche, la place du Pilon, l'une des plus anciennes de Nantes, a fait l'objet d'un certain nombre d'analyses.

Le choix de cette place a été motivé par sa configuration non régulière (géométriquement).

Un maillage triangulaire homogène des faces, a été adopté. Il ne recouvre que la partie principale de la place, pour des raisons de lourdeur des calculs de facteurs de forme.

Le choix d'une structure urbaine du Moyen Age, a pour but également, d'illustrer la diversité des conditions thermiques que peut induire une géométrie complexe de l'espace urbain.

La place du Pilon est caractérisée par une utilisation de matériaux divers : le granit pour le sol, le tuffeau pour certains bâtiments du 18<sup>ème</sup> siècle et les parois enduites pour d'autres plus modernes. La simulation thermique de cette place, prend en compte les travaux de ravalement des façades en tuffeaux récemment entrepris. Ces derniers induisent en effet une réflexion solaire des parois externes plus importantes.

Les analyses effectuées, sont spécifiques aux conditions de température et d'ensoleillement de Nantes (latitude 47° nord), correspondant au 21 juin à 12h00.

La situation angulaire solaire est de 0° pour l'azimut et de 66°3 pour la hauteur. Cette position implique, en général, un rapport d'ombre de 0.43. Dans le cas spécifique de la place, seulement 16% du sol et 37 % des surfaces du site sont ensoleillés. Ceci est défini par l'orientation principale de la place qui est Nord-Est Sud-Ouest, faisant un angle d'environ 60° avec le méridien.

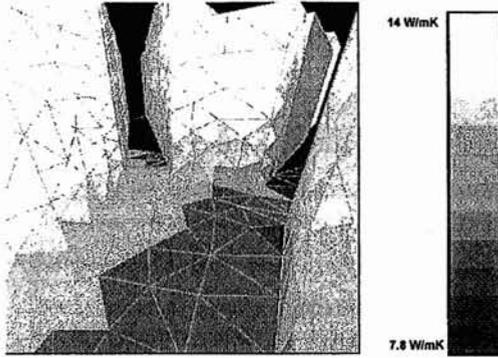


Figure 4.3 Coefficient d'échange convectif mixte externe  $h_e$  (W/mK)

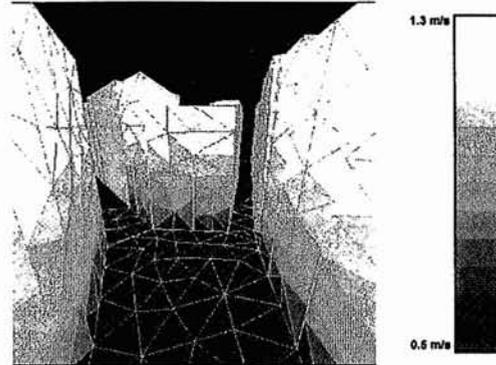


Figure 4.4 Vitesse de l'air (m/s)

L'estimation des échanges conductifs, repose sur une température intérieure aux bâtiments fixée à 20°C et celle du sol (à un mètre de profondeur) fixée à 15°C (Garnier 1982).

Les coefficients d'échange convectif forcé (cf. fig.4.3) nécessaires à la détermination des influences thermiques (cf. équation 3.24, §3.1.2), sont calculés pour un vent de 3.5 m/s, orienté Sud-Ouest et mesurés en station météorologique. Les échanges convectifs naturels sont considérés à partir de l'estimation des différences de températures entre l'air et les surfaces.

La vitesse de l'air au-dessus de la place du Piloni ( $z_{réf} = z_{météo} = 10$  m), a été définie par l'expression de recalage des écoulements aérodynamiques entre station météorologique et centre ville de J. Gandemer et A. Guyot (1976) :

$$U_{réf} = U_{météo} \left( \frac{z_{météo}}{400} \right)^{0.36} \quad (4.2)$$

A l'intérieur du site urbain, une expression logarithmique simple des variations des vitesses de vent (cf. fig.4.4) avec la hauteur a été utilisée (Sini et al. 1996) :

$$U_z = \frac{U_{réf}}{K} \ln \left( \frac{z}{z_{réf}} \right) \quad (4.3)$$

$K$  coefficient de Vankerman

Soit,

$$U_z = U_{réf} \left( \frac{z}{z_{réf}} \right)^\alpha \quad (4.4)$$

$\alpha$  variant entre 0.23-0.3

Les coefficients de convection naturelle et forcée ont été déterminés, grâce aux expressions de l'ASHRAE (Pignolet 1996) (cf. équations 4.5 & 4.6) et celle de Nusselt et Jurges (cf. équation 4.7).

Convection naturelle (ASHRAE) :

$$h_{rad} = 1.24 (T_s - T_{air})^{0.33} \quad \text{Surface verticale} \quad (4.5)$$

$$h_{rad} = 1.31 (T_s - T_{air})^{0.33} \quad \text{Sol} \quad (4.6)$$

Convection forcée (Nusselt et Jurges) :

$$h_v = 5.8 + 4.1 v \quad (4.7)$$

#### 4.1.2 Températures de surface

L'observation des températures de surface, met en évidence les différences notables de ces valeurs dues aux obstructions du soleil. Cependant, il est difficile, seulement à partir de l'observation des températures de surface, de distinguer les facteurs responsables des variations de températures sur une façade ayant des conditions d'ensoleillement homogènes. Nous tenterons de répondre à la question d'identification des facteurs climatiques grâce au modèle d'influence développé qui sera illustrée dans ce qui va suivre.

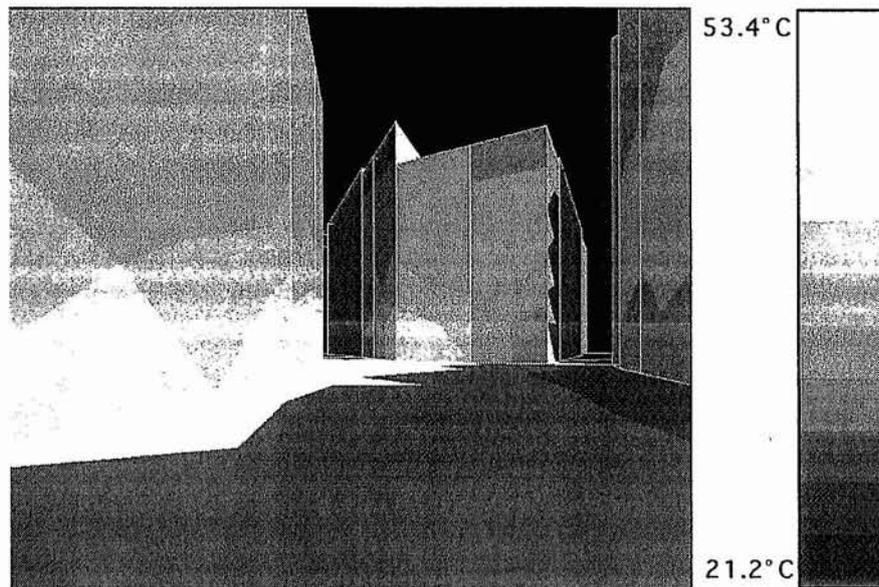


Figure 4.5 : Températures de surface le 21 juin à 12h00 (°C).  
Place du Piloni (Nantes)

L'isolation de chaque influence, permet de présenter de manière distincte les sources de ces variations, notamment les apports et les pertes qui sont dus aux transformations de l'espace. La décomposition des différentes contributions

permet d'adopter une attitude comparative de ces différentes influences. Ceci va être présenté de manière plus poussée dans ce qui va suivre.

Rappelons que l'observation des résultats de simulation doit être effectuée avec précaution, et cela en prenant en compte les différentes limites de la modélisation physique et spatiale qu'implique le modèle (cf. Chap.6).

#### **4.1.3 Intensité d'échange et influence**

Cette analyse a pour objectif la mise en évidence des influences relatives, et cela par l'étude des  $\Sigma\Delta T'_{r-d-total}$ . Chaque facette est exprimée par la somme des influences reçues par son environnement, comparée à une situation où elle aurait été seule (cf. fig. 4.6). Les contributions totales de chaque facette  $\Delta T'_{r-di-total}$  à l'influence de la température d'une surface de référence peuvent être également observées (cf. fig. 4.7).

Ces descripteurs, nous permettent en effet, de situer les apports les plus importants, et de pouvoir orienter l'attention sur les zones les plus influentes. Ils nous permettent également, de comparer le schéma des répartitions des influences avec celles des températures de surface et des flux incidents.

Cette dernière analyse, est très importante, afin de définir le degré d'implication des échanges thermiques radiatifs dans la caractérisation climatique de l'espace.

Rappelons que le caractère thermique d'une surface, dépend de sa situation thermique, liée à son exposition et également, aux échanges qu'elle entretient avec son environnement. Cette démarche a été principalement mise en œuvre dans le but de cerner ce deuxième point.

Les influences représentées par le bilan d'influence (cf. fig.4.6), qui sont occasionnées par la scène, nous permettent d'illustrer les impacts radiatifs thermiques urbains.

Ces influences variables dans l'espace sont représentatives des conditions thermiques diversifiées dans un même lieu.

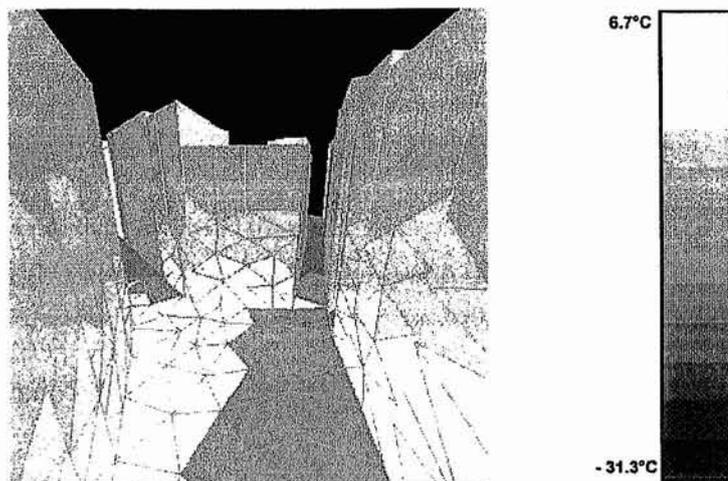


Figure 4.6 Les influences globales (pertes + apports) vues sur une partie du site

Ces influences ne sont pas toujours positives.

Nous pouvons observer que les surfaces les plus influencées sont celles proches du sol, et que les influences peuvent être négatives pour les plus hautes. L'hypothèse que nous pouvons formuler sur la cause de cette répartition, concerne la forte implication des facteurs de vue du ciel et de surface. En effet, les surfaces proche du sol voient plus leur environnement minéral et sont donc plus susceptibles d'être influencées par lui.

Cette explication reste non suffisante par rapport aux différentes contributions qui ont permis cette caractérisation.

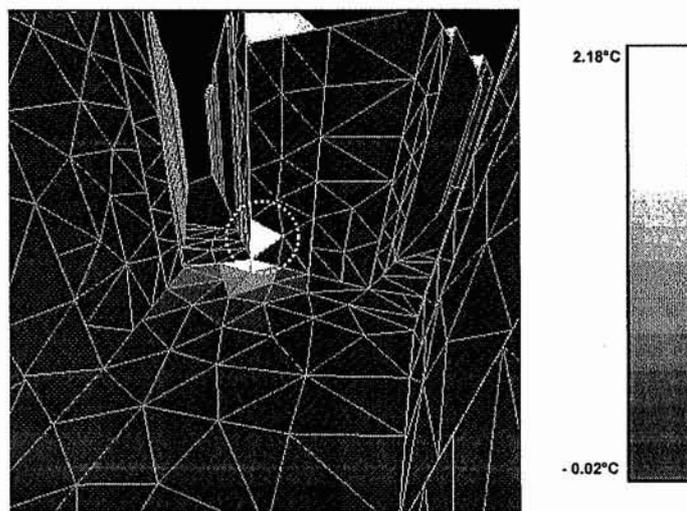


Figure 4.7 Les bilans d'influences subies par une surface de référence.

Il est plus intéressant d'aborder la question des correspondances entre la situation solaire et thermique de la surface et les influences subies, plus en aval

de notre approche. En premier lieu nous essayerons de comprendre et d'observer la logique de l'implication des différentes influences dans cet espace urbain. Ceci, nous a conduit à mettre en place une démarche structurée de l'analyse des impacts radiatifs thermiques basée sur les processus de décomposition et recombinaison.

La forme analytique des influences mise en place, joue un rôle important, dans cette démarche. L'observation des différentes contributions reposera sur la possibilité de *décomposition* de l'influence radiative thermique, grâce à l'expression analytique d'influence présentée plus haut (cf. équation 4.1).

$$Infl\_totale = Infl_{r\_d} + Infl_{r\_obs\_ciel} + Infl_{r\_obs\_env} + Infl_{r\_obs\_sol}$$

$Infl_{r\_d}$	influence des surfaces ( $d$ ) sur ( $r$ )
$Infl_{r\_obs\_ciel}$	influence des obstructions du ciel sur ( $r$ )
$Infl_{r\_obs\_env}$	influence des obstructions de l'environnement sur ( $r$ )
$Infl_{r\_obs\_sol}$	influence de l'obstruction du soleil sur ( $r$ )

La décomposition des différents facteurs intervenant dans le bilan, sera nécessairement suivie par une recombinaison éventuelle, afin de permettre de mettre en avant les liens existant entre les phénomènes thermiques d'influence. L'étude par décomposition /recombinaison des influences signifie pour nous, l'analyse des manifestations diverses, de manière isolée (apports, obstruction, etc.), et de leurs formes de regroupement.

Cette approche de décomposition et de recombinaison utilisée par Borie et al. (1987), dans l'étude de la morphologie urbaine, nous semble intéressante à appliquer à une analyse thermique urbaine.

Dans une approche de décomposition, il ne s'agit pas seulement d'observer l'implication des conditions thermiques de ( $d$ ) par rapport à ( $r$ ), mais d'analyser également comment la situation de ( $r$ ) par rapport à ( $d$ ) intervient sur les échanges et les obstructions.

Nous isolerons ainsi les apports de surface et les pertes dues aux obstructions. Les rapports entre les pertes et les gains peuvent également être comparés.

La décomposition physique des phénomènes est accompagnée par une décomposition spatiale, qui permet :

- d'étudier les sommes des différences de température occasionnées par la scène sur chaque facette ( $\Sigma\Delta T'_{r-d\_total}$ ,  $\Sigma\Delta T_{r-d}$ ,  $\Sigma\Delta T_{r-ciel}$ ,  $\Sigma\Delta T_{r-env}$ ),
- d'étudier les différents apports de chaque surface sur une facette de référence ( $\Delta T'_{r-d\_total}$ ,  $\Delta T_{r-d}$ ,  $\Delta T_{r-ciel}$ ,  $\Delta T_{r-env}$ ).

Ces deux méthodes complémentaires seront présentées à chaque étape d'isolation des facteurs physiques intervenant.

La recomposition des influences, tentera de comparer les différents facteurs et d'évaluer leur impact par rapport à une situation d'échange globale.

Les interprétations des résultats de simulation, ont été effectuées tout en étant vigilant par rapport aux limites du modèle. Il s'agit d'adopter une démarche comparative et non pas descriptive précise des grandeurs numériques, car les estimations simplificatrices ne le permettent pas.

#### 4.1.4 Les pertes

La nature des pertes par obstruction, dépend de la situation de ( $d$ ) par rapport à ( $r$ ). Une surface ( $d$ ) peut masquer le sol ou le ciel. Dans la réalité, une surface peut opérer les deux obstructions. Mais un maillage assez fin du site, permet de modéliser une seule obstruction à la fois (cf.§3.1.2). Rappelons que le maillage doit présenter des facettes de même surface, car  $S_r = S_d$ .

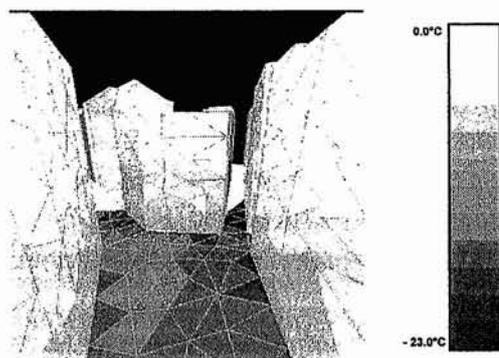


Figure 4.8 Somme des pertes dues aux obstructions du ciel pour une partie du site

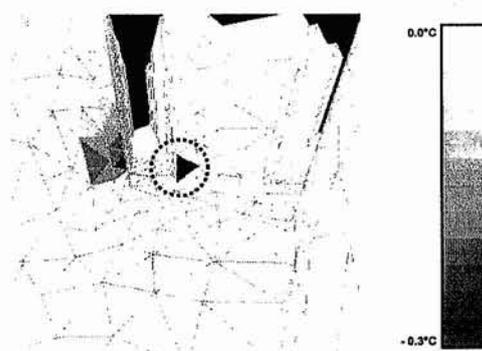


Figure 4.9 Pertes dues aux obstructions du ciel des faces  $d$  sur une facette  $r$  de référence

##### 4.1.4.1 Les pertes par obstruction du ciel

Les pertes par obstruction du ciel sont occasionnées par les pertes d'énergies infrarouges et solaires diffuses émises par la voûte céleste.

L'observation d'une facette donnée, implique l'étude des obstructions occasionnées par les surfaces entourant celle de référence. Ces pertes sont proportionnelles aux facteurs de forme entre les surfaces obstruantes et celle de référence.

Les pertes par obstruction du ciel, observées sur une facette de référence et occasionnées par toute la scène, sont proportionnelles aux facteurs de forme entre la facette et l'environnement minéral. Le facteur de forme d'une surface avec son environnement minéral, s'oppose à son facteur de vue du ciel. En effet, plus une surface voit le ciel, moins elle voit les surfaces environnantes.

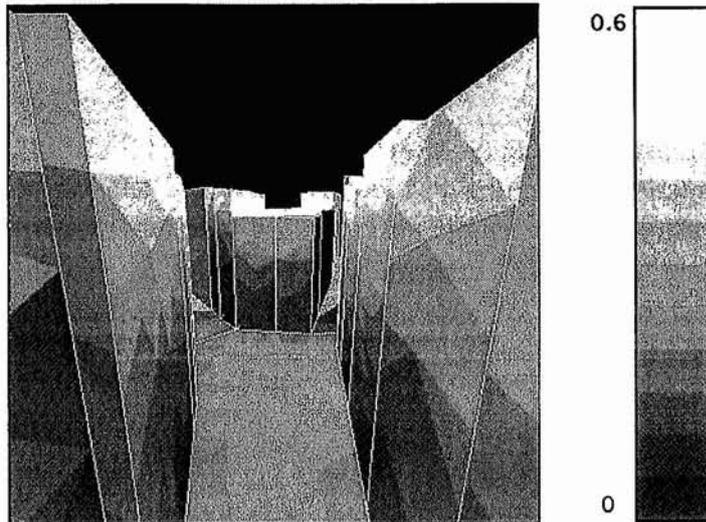


Figure 4.10 Facteur de vue du ciel

L'impact d'une surface sur une autre est importante, quand cette dernière obstrue le plus possible le ciel, c'est-à-dire : facteur de vue du ciel initial remplacé par un facteur de forme entre surfaces important. Ceci explique les différences d'influence existant entre les surfaces verticales proches du sol et celles plus hautes. Les surfaces les plus hautes ne subissent pas de pertes considérables, car elles restent très peu affectées par l'obstruction du ciel, contrairement aux surfaces les plus basses.

L'analyse des facteurs de vue du ciel à elle seule, n'est pas pertinente, dans l'étude des implications configurationnelles vis-à-vis des obstructions. L'observation des conditions thermiques des surfaces obstruées est également à considérer. Une surface verticale seule est exposée au ciel, mais aussi au sol. L'influence thermique par obstruction s'opère sur ces deux plans. Le sol ne peut subir qu'une obstruction du ciel et éventuellement celle du soleil.

#### 4.1.4.2 Les pertes par obstruction du sol

Etant donnée la situation thermique particulière d'un sol dégagé, la considération de l'influence de ce dernier est nécessaire.

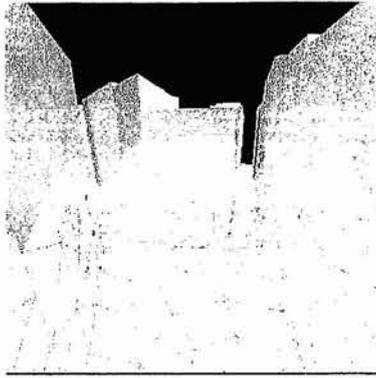


Figure 4.11 Pertes dues à l'obstruction du sol pour une partie de la scène

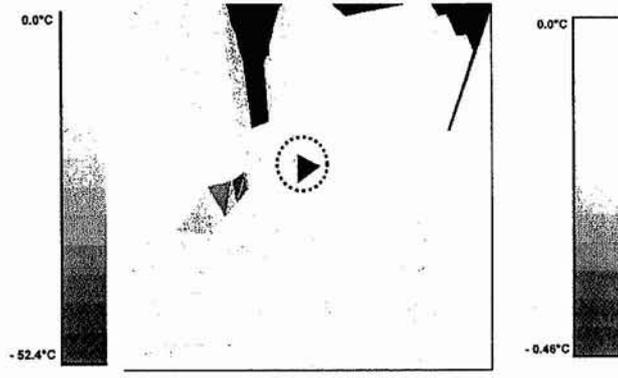


Figure 4.12 Pertes dues à l'obstruction du sol par rapport à une facette de référence.

Le type d'obstruction et le degré d'influence dépendent de la disposition en hauteur des surfaces. Les surfaces les plus hautes qui voient une grande partie du sol, sont donc les plus influençables par rapport aux obstructions de ce dernier. Ici, la température type et la quantité de flux type du sol ont été considérées pour un sol dégagé.

En dehors des facteurs de forme entre surfaces, les degrés de pertes sont tributaires des conditions de l'environnement obstrués. Les conditions de sol dégagé ne peuvent être comparables à celles du ciel, surtout à ce moment là de la journée. L'obstruction du ciel ici, n'implique pas systématiquement celle du soleil.

La comparaison des ordres de grandeur entre les deux types de pertes présentés ci-dessus (cf. § 4.1.4.1 & 4.1.4.2), révèle les influences thermiques par obstruction du sol plus importantes. En effet, les conditions thermiques et radiatives d'un sol dégagé, sont plus importantes que celle du ciel. Le ciel peut être comparé à une surface émettrice froide.

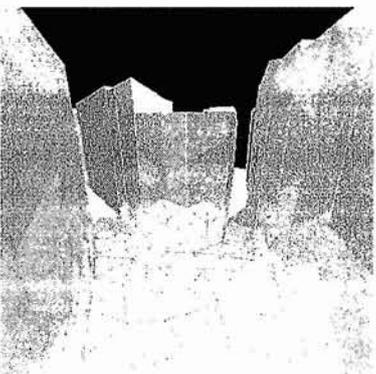


Figure 4.13 La somme des pertes des surfaces de l'environnement vue sur une partie de la scène



Figure 4.14 La somme des pertes de surfaces appliquée sur une facette de référence

En dressant le bilan des influences par obstruction, nous pouvons remarquer que :

- les surfaces les plus hautes de la scène, sont plus influencées par obstruction du sol, que par obstruction du ciel,
- les surfaces proches du sol sont donc, plus influencées par obstruction du ciel, que par obstruction du sol.
- les conditions thermiques et radiatives du sol obstrué, sont plus importantes que celles du ciel.

Il est donc possible d'observer dans cette configuration urbaine dense (caractéristique du Moyen Age) que les faces les plus hautes sont les plus influencées par obstruction que les surfaces les plus basses.

#### 4.1.5 Les apports et contributions

Les apports sont définis par les variations positives qu'induisent les surfaces minérales de l'environnement. Ces influences sont proportionnelles aux facteurs de forme entre faces (cf. fig.4.16 et fig.4.17) et aux conditions thermiques et radiatives des surfaces influentes.

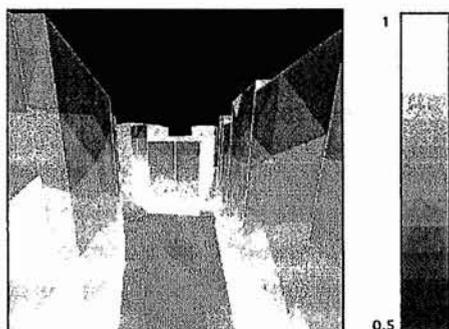


Figure 4.15 Facteurs de forme entre la surface et l'environnement minéral

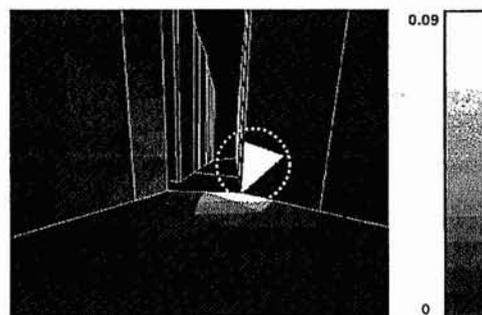


Figure 4.16 Facteurs de forme entre une surface de référence et les surfaces environnantes

Les apports comportent les influences thermiques d'une surface, dues aux flux solaires qu'elle réfléchit et qu'elle émet vers les autres.

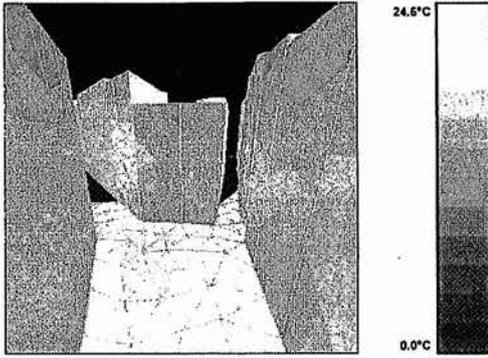


Figure 4.17 La somme des apports infrarouges des facettes

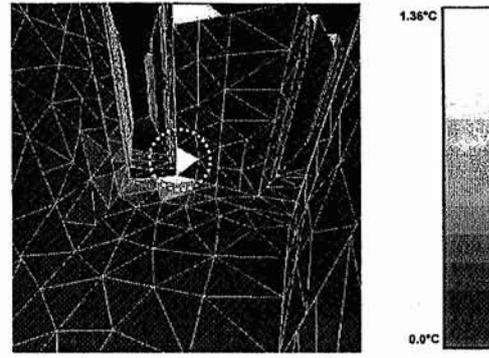


Figure 4.18 L'analyse des apports infrarouges des surfaces observés par rapport à une facette de référence

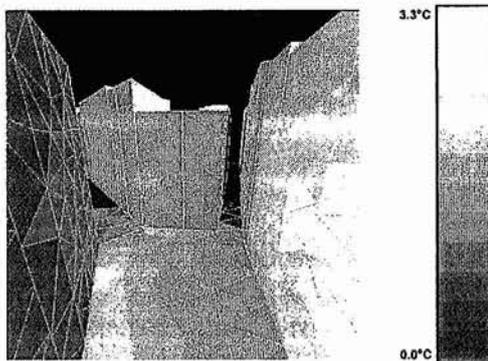


Figure 4.19 La somme des apports solaires des surfaces de la scène

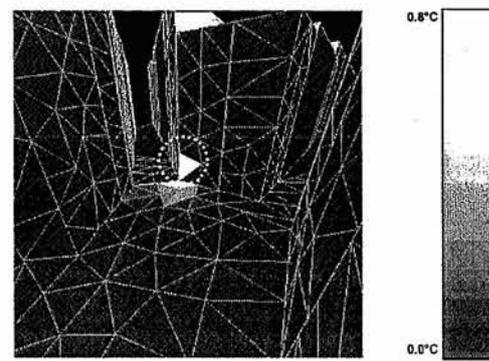


Figure 4.20 Les apports solaires de surfaces par rapport à une facette de référence

Nous ferons une distinction entre contributions et apports.

Les contributions expriment pour nous l'influence de l'environnement constitué seulement par les surfaces verticales et soulignent l'impact thermique par la prise en considération de la situation de référence de rase campagne.

Les apports englobent toutes les influences thermiques y compris celles du sol.

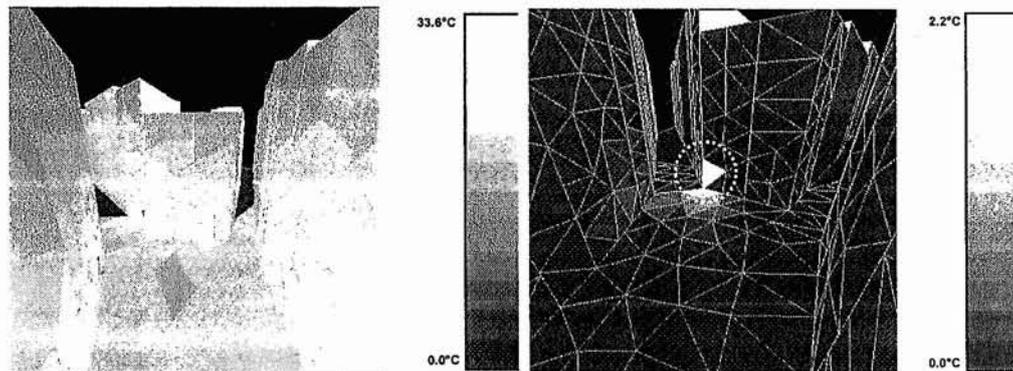


Figure 4.21 La somme des apports des surfaces de la scène.

Figure 4.22 Les apports thermiques de l'environnement à une face de référence.

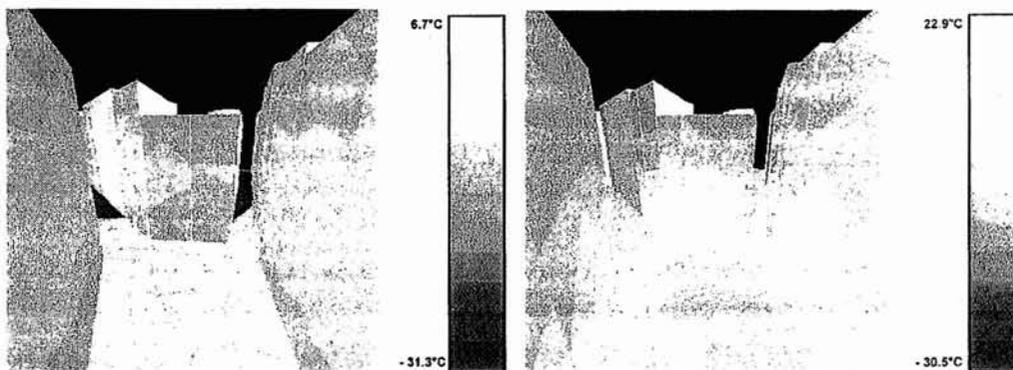


Figure 4.23 La somme des contributions avec une situation de référence prise en compte incluant l'influence thermique du sol..

Figure 4.24 Le bilan de toutes les influences (pertes + gains) sans situation de référence.

#### *Rapport entre les apports solaires et infrarouges*

En terme d'apport thermique, les facettes influencent plus par émission de chaleur que par la réflexion des flux solaires (cf. fig.4.25 & fig.4.26).

Il est important de noter que cette distinction spectrale est appliquée seulement aux *influences* thermiques et radiatives *des surfaces* sur une autre de référence.

Nous ne parlons pas de la distinction spectrale de la caractérisation thermique d'une surface recevant un rayonnement solaire direct. Il est évident que la température de cette dernière sera plus tributaire des rayonnements solaires incidents que des rayonnements de courte et de grande longueur d'onde résultant des échanges de l'environnement minéral avec elle. Rappelons que notre objectif est de montrer l'impact des surfaces urbaines sur leur température, et non pas celle du rayonnement solaire direct incident.

Afin d'analyser les rapports entre les influences distinguées par bandes spectrales, et cela aussi bien en apports qu'en pertes, il ne faudrait pas séparer les influences en terme de milieu mais en type de longueur d'onde :

- émission du ciel, émission de surface et de la partie du sol masquée, constituant l'influence en infrarouge,
- flux solaire diffus du ciel, flux solaire global (direct + diffus) réfléchi des surfaces, constituant l'influence en bande solaire.

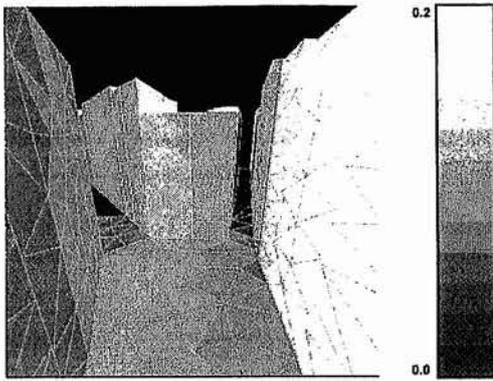


Figure 4.25 Les rapports entre les contributions solaires et infrarouges des surfaces observés sur une partie de la scène

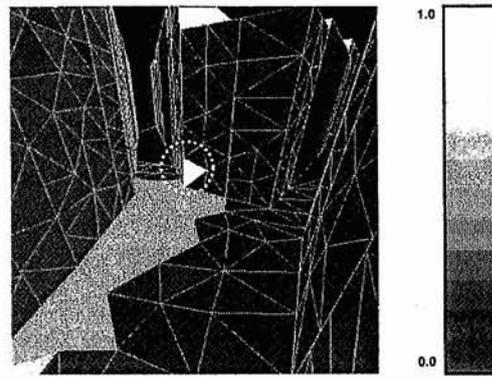


Figure 4.26 L'analyse du rapport entre contributions solaires et infrarouges appliquée à une facette de référence.

#### 4.1.5.1 Influence de la variation d'aménagement

Il est possible d'analyser l'influence des changements de type d'aménagement du sol, en comparant deux situations de revêtement différentes. Cette analyse peut s'avérer intéressante, quand on veut évaluer l'impact thermique dû au réaménagement d'une rue piétonne, par exemple, et à l'intégration de la circulation automobile. Ainsi on peut évaluer les transformations des échanges thermiques du lieu, liées à l'aménagement d'une chaussée bitumée.

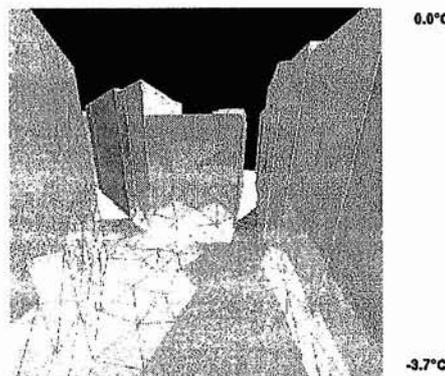


Figure 4.27 Différences d'influence thermique des surfaces dues à la variation des albédos à 0.1. Les valeurs d'albédos de référence sont égales à 0.3 et 0.45.

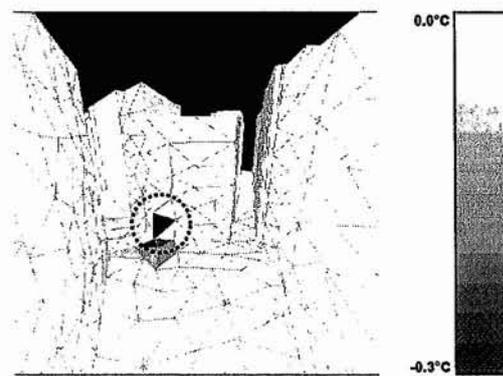


Figure 4.28 Différences d'influence thermique de surface dues à la variation des albédos à 0.1. Les valeurs d'albédos de référence sont égales à 0.3 et 0.45.

L'exemple présenté ci-dessus (cf. fig.4.27 & fig.4.28), concerne les différences des influences thermiques dues à la diminution des albédos de surface à 0.1. Les changements de température de surface, due à la variation des valeurs d'albédo est prise en compte. La diminution des albédos de la scène induit une diminution des influences radiatives.

#### 4.1.6 Rapports entre pertes et contributions

Nous avons défini des influences positives (apports) et négatives (pertes), il serait intéressant de les comparer. Ceci revient à comparer les qualités d'influence de l'environnement urbain, par rapport à celui obstrué ou remplacé (partie du ciel, partie du sol).

Il est important de préciser que dans un premier temps, nous ne nous intéresserons qu'aux bilans premiers, c'est-à-dire ceux n'intégrant pas l'influence de l'obstruction des flux solaires directs. Ces derniers seront développés plus loin (cf. §4.1.7).

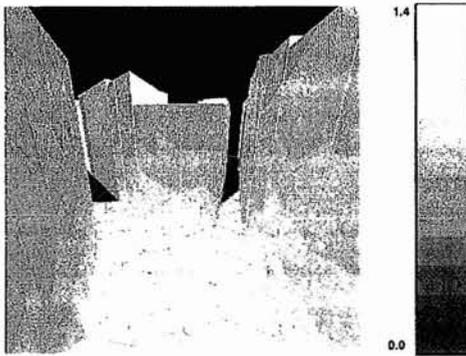


Figure 4.29 Rapport entre les apports et les pertes observé sur une partie de la scène

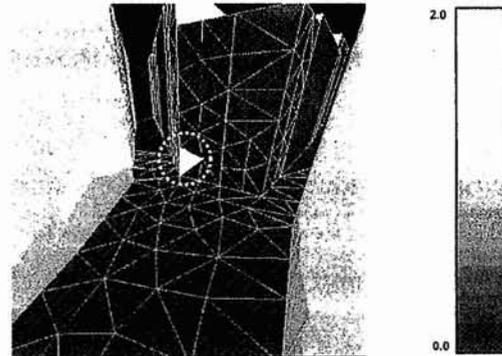


Figure 4.30 Rapport entre les apports et les pertes pour une facette de référence

La comparaison entre les valeurs des températures de surface et flux incidents (cf. fig.4.5 & fig.4.32) avec le rapport entre pertes et gains (cf. fig.4.29 & fig.4.30), peut mettre en évidence certaines similarités ou recouvrements.

Les surfaces proches du sol, accusent des températures de surface plus chaudes que les faces les plus hautes. En même temps, elles ont un niveau d'apport thermique et radiatif plus important : les faces les plus basses subissent des apports bien plus importants que les pertes.

L'observation d'une facette (l'exemple donné est spécifique à une situation de facette proche du sol) permet de distinguer les surfaces environnantes les plus influentes.

La surface de référence présentée (cf. fig. 4.30) accuse une température de 40°C, sa température hors toute influence des parois est de 32.5°C. Le bilan d'influence est de l'ordre de 7.5°C, en sachant que 16°C sont dus aux apports. Il est important de noter, que dans ce cas pratiquement le quart de sa température résulte de l'interaction de la surface de référence avec les autres. Ce qui n'est pas négligeable. En effet, Les échanges radiatifs jouent un rôle important dans la définition des situations thermiques des surfaces urbaines. Notons cependant que ces influences ont été calculées pour des conditions de vent faibles.

Nous pouvons remarquer également à partir de l'analyse des impacts thermiques subis par une surface de référence, que les influences des surfaces environnantes décroissent très rapidement avec la distance.

#### 4.1.7 L'impact solaire sur les températures et les influences

Le dernier point que nous n'avons pas encore développé, est l'obstruction du soleil. Il est le facteur d'influence thermique le plus important par rapport à tous ceux déjà rencontrés. En dehors de la situation climatique, son degré d'impact dépend de la part de l'espace urbain mise à l'ombre.

L'obstruction du soleil contribue, de façon plus importante, que l'obstruction du ciel et du sol, au refroidissement des températures de surfaces. L'influence de l'obstruction du soleil, se révèle également plus importante que les apports, cependant elle ne concernera qu'une partie de la scène.



Figure 4.31 L'ensoleillement de la place le 21 juin à 12h

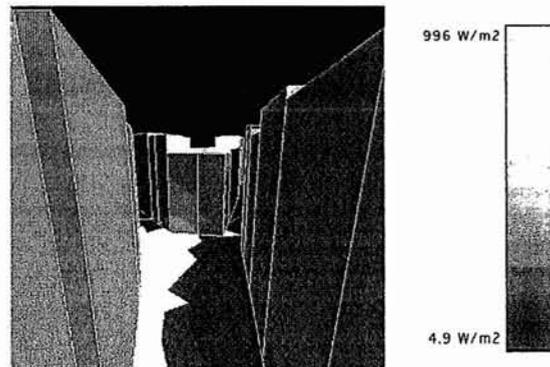


Figure 4.32 Les flux incidents sur le site incluant les multiréflexions solaires, directes et diffuses.

Notons que le modèle des influences voulu linéaire, ne tient pas compte du facteur temps, qui intervient sur les déperditions thermiques liées à l'obstruction. Ces dernières s'effectuent dans le temps en fonction du degré d'inertie du matériau. Sans oublier que le temps d'imprégnation thermique des surfaces, est également confronté au mouvement solaire, qui fait varier la ligne d'ombre. Ici, la ligne définissant la limite de l'obstruction solaire (cf. fig.4.31), ne devrait pas être aussi distincte que celle de son influence thermique (cf. fig.4.34).

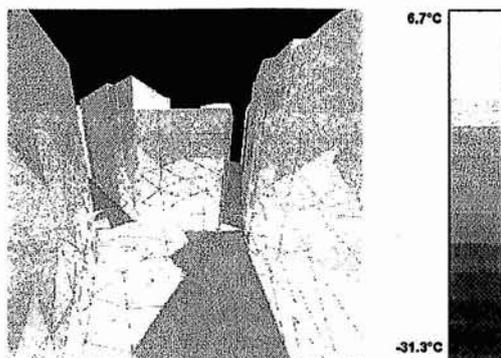


Figure 4.33 Bilan des influences incluant l'obstruction du soleil



Figure 4.34 La partie à l'ombre créée par le masque urbain, le 21 juin à 12h

Ceci constitue une limite du modèle d'échange thermique, due à l'estimation des températures de surfaces en régime permanent, dont il faut tenir compte dans l'analyse thermique urbaine.

La prise en compte de l'ensoleillement direct, permet, néanmoins, la comparaison de son influence par rapport à celui des échanges radiatifs. Même si ce rapport nous paraît évident, la situation des ordres de grandeur reste intéressante.

#### 4.1.8 Les grandeurs limites

Les grandeurs limites définies (cf. §3.1.3), permettent de spécifier le degré d'implication des caractéristiques physiques et formelles des surfaces dans leurs influences thermiques et radiatives.

##### *Facteur de forme limite*

En dehors de la définition de la zone d'influence (cf. §3.2.2.2), ce descripteur exprime les facteurs de forme entre faces, à partir desquels, nous pouvons définir une situation géométrique. En effet, l'expression géométrique de ce facteur (à partir de distances, d'angles, et de surfaces) permettrait la construction d'une nouvelle disposition qui induirait une influence radiative thermique dite satisfaisante ou négligeable.

Cette dernière proposition peut amener à développer un nouvel axe de recherche, orienté vers l'application de la modélisation déclarative (Siret 1997) à la proposition de nouvelles formes urbaines à partir de la contrainte de l'influence thermique.

La nouvelle forme se définirait par les nouvelles valeurs de facteurs de forme (facteurs de forme limites) induisant une variation des orientations des faces ou des distances par rapport à une proposition formelle donnée.

Cette approche mène vers d'autres questionnements qui sont liés à la définition d'une influence thermique et radiative *satisfaisante*, si nous nous référons au confort radiatif, ou *négligeable*, si notre préoccupation est liée au phénomène d'îlot de chaleur.

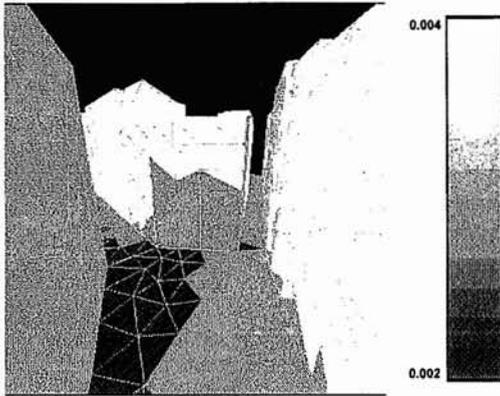


Figure 4.35 Valeur de facteur de forme limites induisant une élévation de température de 0.1°C



Figure 4.36 Zone d'influence définie par : - facteur de forme > facteur de forme limite, -  $\Delta T_{rd} > \Delta T_{rd\_seuil}$  égale à 0.1°C.

Rappelons que les valeurs de facteur de forme limite, définies de manière indépendante des caractéristiques spatiales des surfaces, expriment la disposition minimale entre facettes induisant une influence thermique inférieure à un seuil. Plus la valeur du facteur de forme est faible plus l'influence thermique est grande. Si le facteur de forme limite est proche de 1.0, cela implique que quelque soit la situation urbaine des deux surfaces ( $r$ ) et ( $d$ ), l'influence sera toujours inférieure au seuil fixé. Si le facteur de forme limite est proche de zéro, le nombre de facettes dont l'influence est supérieure à la limite est plus grande.

Dans le cas de la place du Pileri (cf. fig.4.35), nous pouvons observer que les surfaces ensoleillées accusent des valeurs de facteurs de forme limites plus faibles que celles ayant une exposition solaire moins intéressante. Ces surfaces seront les plus influentes. Cependant, les valeurs de facteur de forme limite ont les mêmes ordres de grandeur (0.002-0.004).

#### *L'albédo limite*

Ce descripteur nous permet d'observer l'implication des réflectivités de matériaux dans les influences. Ici, il définit les valeurs d'albédo limite induisant une influence inférieure à 0.1°C. Quand les valeurs d'albédo limite sont égales à 1.0, cela implique que, quelle que soit la réflectivité solaire des facettes accusant cette valeur, ces dernières ont des influences thermiques sur la facette de référence inférieures à 0.1°C. Dans le cas d'un albédo limite égal à 0.0, quelle que soit la réflectivité de la surface influente, celle-ci impliquera une variation de température de la surface de référence supérieure à 0.1°C.

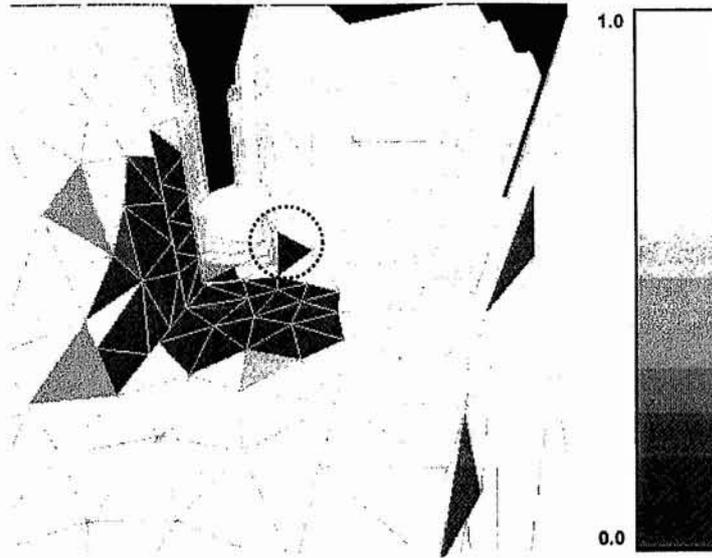


Figure 4.37 Variation de l'albédo limite pour un seuil d'influence thermique de 0.1°C.

L'application de l'albédo limite dans le cas de situation thermique et radiative de la Place du Piloni sur une surface de référence (ici encerclée), nous permet d'observer que la modification des albédos des facettes les plus proches et de celles les plus éloignées, n'aura pas d'incidence sur l'influence radiative thermique sur la facette de référence, si l'influence thermique maximale requise est de 0.1°C. Seulement une zone intermédiaire, entre les surfaces les plus proches et les plus éloignées par rapport à celle de référence, dont la modification d'albédo est possible afin de limiter leur influence à 0.1°C. L'albédo solaire reste un facteur modifiant des influences radiatives thermiques et il n'est pas déterminant.

Les analyses effectuées sur la place du Piloni ont suscité des questionnements importants relatifs au rapport des conditions physiques d'un espace avec les impacts radiatifs thermiques. En effet, nous avons pu observer à travers cet exemple, que les influences radiatives thermiques sont variables suivant la situation spatiale et physique des surfaces. Après avoir abordé le cadre méthodologique de l'analyse d'impacts, à travers le cas de la place du Piloni, nous tenterons dans la partie qui va suivre, de cerner de manière plus générale, les différents facteurs intervenant dans la définition des influences.

**Chapitre 5**  
**Vers une interprétation qualitative physique et spatiale des impacts radiatifs thermiques**



Le chapitre précédent, a permis d'aborder les types d'interprétation des impacts radiatifs thermiques, que permet le modèle. En effet, nous avons mis en place un essai de structuration d'une lecture radiative thermique des impacts, à partir de la démarche de décomposition et recombinaison des différentes manifestations physiques. La décomposition des échanges radiatifs permis d'estimer l'impact de chaque manifestation, alors que la recombinaison tenta d'évaluer leur importance par rapport à l'impact radiatif global.

Cependant, l'interprétation de ces influences, laissent un certain nombre de questions en suspens. Nos interrogations concernent l'implication de chaque facteur physique et spatial, dans la caractérisation des impacts. Nous tenterons d'apporter quelques éléments de réponses, dans ce chapitre, en mettant en relief :

- les facteurs importants dans la caractérisation des influences thermiques dans un espace urbain,
- le rôle qu'ils jouent dans cette caractérisation,
- les relations existant entre ces différents facteurs.

Nous aborderons ici, de façon plus générale, les questions relatives à la caractérisation des influences thermiques et du positionnement des facteurs formels dans la définition des critères de caractérisation. La situation complexe de la place du Piloni soulève des questions de la généralisation des interprétations des phénomènes observés. En effet, les explications que nous donnons aux résultats simulés peuvent-ils s'appliquer à d'autres espaces urbains ?

La représentativité des descripteurs définis dans les chapitres précédents (cf. § 3.1.3), n'est pas remise en cause. Cependant, afin d'éclaircir ces points, une investigation dans des conditions élémentaires et sur des géométries simples a été conduite (configuration de **rue**, en **L** et en **U**).

Le modèle a été redéfini, afin de permettre de tester des conditions d'influence variées entre deux surfaces élémentaires.

Avant d'aborder cela, nous tenterons de cerner les éléments méthodologiques relatifs à l'analyse microclimatique urbaine. Ces derniers concerneront : les facteurs observés, les grandeurs qui permettent de les manipuler ou de les analyser. Nous soulèverons également, les problèmes liés à la construction d'une méthode d'analyse microclimatique.

En partie développement, nous cernerons les différents types d'interprétations des situations physiques et spatiales, qui peuvent être rencontrées en milieu urbain. Nous ne nous positionnons pas dans un objectif d'exhaustivité des situations analysées, mais de mise en relief des interactions physiques principales caractéristiques des impacts radiatifs thermiques.

Nous tenterons en dernier lieu, d'apporter quelques éléments de réponse à la question fondamentale : existe-t-il une logique de lecture des influences radiatives thermiques de la forme urbaine ?

## 5.1 Analyse climatique thermique des formes urbaines

La caractérisation thermique des espaces urbains, dépendra de la définition de trois types de facteurs fondamentaux : les facteurs exclusivement physiques ou exclusivement spatiaux et les facteurs transversaux reliant les spécificités physiques et formelles d'un espace.

*Les facteurs physiques* : sont définis par leur particularité exclusivement physique, qui est liée au matériau : conductibilité, albédo, absorptivité, etc.

*Les facteurs spatiaux* : sont liés à la disposition relative des surfaces qui intervient principalement sur les échanges radiatifs.

*Les facteurs transversaux* : font intervenir aussi bien des facteurs configurationnels que physiques, donnons comme exemple :

*Les énergies incidentes* : notons la présence de deux types de flux influents sur les températures de surfaces ; les flux incidents directs de courte et de grande longueur d'onde (rayonnements solaires directs et diffus et rayonnement infrarouge du ciel et des surfaces) et les flux incidents indirects dus aux multiréflexions. La quantité de flux incidente solaire dépend du mouvement solaire, de la latitude du lieu et également de la disposition de la surface par rapport aux rayonnements. Les multiréflexions dépendront de facteurs de réflexion et des dispositions de surfaces.

*Les échanges convectifs* : sont liés aux mouvements et à la vitesse de l'air, et aux différences de température entre l'air et les surfaces. Ces paramètres dépendent aussi bien des conditions climatiques, que géométriques du lieu.

Il est important de distinguer, la notion de critère de celle de facteur.

Ce dernier est représentatif des éléments qui agissent et qui influent sur les phénomènes.

Les critères permettent d'évaluer et d'expliquer les phénomènes étudiés.

Nous avons pu observer, dans les chapitres précédents, que les grandeurs et les interactions radiatives thermiques définissant l'impact, sont employées pour désigner le type d'influence et également le degré d'influence. Ils déterminent les critères d'*influence*, car ils permettent d'évaluer le degré d'interaction entre formes urbaines et échanges radiatifs.

Les critères d'évaluation des influences radiatives urbaines, mettent en exergue les relations qu'entretiennent les facteurs avec les manifestations observés. Cela grâce à une décomposition des facteurs d'influence sous forme d'environnement, et des manifestations par les actions qu'exerce chaque type d'environnement sur un autre. Les types d'environnements définis sont :

surfaces minérales, le soleil, et le ciel. Chacun a un comportement très spécifique du point de vue des influences : obstruction, apports, etc.

L'analyse des influences s'effectue sur les deux plans : spatiaux (type d'environnement) et physiques (manifestations physiques). L'intérêt de cette approche est de déterminer, comment les facteurs présentés plus haut, définissent les influences, et le rôle joué par chaque environnement dans la caractérisation thermique de l'espace urbain.

Les facteurs et les critères de caractérisation d'un phénomène donné, ne peuvent être directement observés. La définition de descripteurs spécifiques sont nécessaires à leur analyse. La caractérisation climatique d'un espace urbain, implique le développement d'indicateurs permettant l'analyse des formes urbaines, selon des critères ou facteurs spécifiques.

Les descripteurs ou indicateurs sont, des paramètres ou des valeurs, donnant des informations, ou décrivant, une situation ou un phénomène donné.

Ces indicateurs peuvent indiquer un état, ou une évolution d'état.

Les indicateurs d'état rendent possible l'observation d'une situation donnée, alors que les indicateurs d'évolution d'état permettent l'observation des changements de situation.

Ces derniers se traduisent dans notre investigation par les indicateurs d'impacts (somme des contributions, les pertes, etc.). En effet, le modèle d'influence nous permet de déterminer le potentiel d'une forme urbaine à transformer les conditions thermiques des surfaces, par rapport à une situation de référence.

Avant d'aborder l'interprétation physique et spatiale des indicateurs développés ici, il est important de donner un aperçu des types de descripteur que nécessitent les aspects climatiques.

### **5.1.1 Définition des indicateurs climatiques**

Les indicateurs radiatifs thermiques de description d'état ou d'évolution se définiront suivant trois facteurs radiatifs importants : les énergies de grandes et de courtes longueurs d'onde, les échanges et les matériaux. Ces facteurs interviennent de manière interdépendante mais dont les implications formelles et spatiales peuvent être distinguées. Cependant, le climat urbain introduit des facteurs autre que radiatifs, impliquant des descripteurs spécifiques, que nous tenterons d'aborder ici.

Dans l'objectif d'analyse d'interaction entre forme urbaine et phénomènes thermiques, il s'agit de mettre en correspondance deux types d'indicateurs principaux : *des indicateurs physiques* (flux, températures de surface, etc.) et *indicateurs spatiaux* (densités, rapport plein vide, etc.). Cette mise en correspondance repose sur la compréhension des facteurs analysés. Les facteurs climatiques ne peuvent être observés directement ; la pertinence de

l'étude reposera sur la définition de descripteurs appropriés et sur une gestion poussée des traitements et des interprétations de ces descripteurs.

Nous verrons à travers ce qui va suivre que les descripteurs peuvent être des grandeurs autres que numériques, exprimant un état ou une évolution d'état thermique, de manière directe ou indirecte.

L'analyse climatique repose donc sur une lecture et une interprétation réfléchie de ces descripteurs. Les résultats où les connaissances mises en place dépendront fondamentalement de la structure de lecture mise en œuvre. Cette structure reflète les questionnements principaux de la recherche entreprise.

#### 5.1.1.1 Caractérisation solaire des surfaces

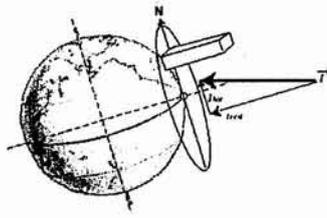
Le soleil est le facteur le plus important, dans la caractérisation thermique des espaces urbains. Son mouvement définit, par les figures d'ombre et d'ensoleillement des espaces urbains, les zones les plus chaudes et les plus froides. La caractérisation solaire des espaces urbains tient compte de la rotation de la terre sur elle-même et autour du soleil et de son inclinaison qui définissent des variations journalières et saisonnières spécifiques suivant le lieu et la latitude. Cependant, d'autres facteurs ; tels que les couvertures nuageuses et le vent, peuvent contribuer à l'atténuation ou à l'accentuation de l'influence des rayonnements solaires incidents.

##### *Latitude*

Selon la latitude nous avons trois types de situation angulaire solaire (cf. tableau 5.1) :

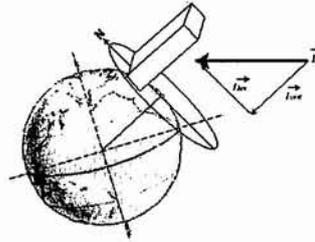
- Les latitudes proches de l'équateur : sont caractérisées par des hauteurs solaires importantes. A titre indicatif, la hauteur solaire du méridien varie entre  $68^\circ$  (le 21 décembre) et  $90^\circ$  (le 21 mars ou 21 septembre).
- Les latitudes proches des tropiques (Cancer et Capricorne) : comprennent des hauteurs solaires méridiennes variant de  $43^\circ$  (le 21 décembre) à  $90^\circ$  (le 22 juin).
- Les latitudes proches des pôles : les hauteurs solaires sont basses, et varient globalement de  $0^\circ$  à  $47^\circ$ .

Lat.  $-23^\circ$  à lat.  $+23^\circ$



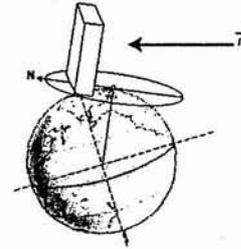
L'inclinaison de la terre induit un rayon solaire incident sur un sol toujours proche de la normale le midi. Ceci induit une supériorité évidente des quantités de flux incidents sur un sol par rapport à ceux incidents sur une façade de bâtiment.

Lat.  $+/-23^\circ$  à la lat.  $+/-66^\circ$



Pour ces latitudes les quantités de flux incidents en un temps donné de la journée sont très variables. Les flux incidents sur le sol sont supérieurs à ceux incidents sur une paroi verticale durant les saisons de printemps et d'été. Pour le reste de l'année le processus est inversé ; les flux sont beaucoup plus proches de la normale des surfaces verticales que celle du sol.

Lat.  $+/-66^\circ$  à lat.  $+/-90^\circ$



Ici, les rayons solaires sont rasants par rapport au sol. Ainsi les quantités de flux incidents sur une paroi verticale sont nettement supérieures à celles des flux incidentes sur le sol.

Tableau 5.1 Situation de surface suivant les latitudes et flux incidents.

#### *Variation saisonnière et journalière*

Les hauteurs solaires sont basses du 22 décembre au 21 mars et hautes pour les saisons variant du 22 mars au 23 septembre. Ces différences de hauteur sont accentuées pour les latitudes proches des tropiques.

Comparons les conditions de Nantes (lat.  $47^\circ$ ) avec celle de l'Equateur.

A Nantes, les hauteurs angulaires solaires varient l'hivers entre ( $0-43^\circ$ ) avec des journées 8-10h, alors que pendant les périodes d'été et de printemps ces hauteurs varient de ( $0-68^\circ$ ) avec des journées de 12 à 18h.

Pour la latitude  $0^\circ$ , les hauteurs maximales solaires varient entre ( $68^\circ-90^\circ$ ) avec des journées de longueurs proches des 12 heures.

Les variations saisonnières des hauteurs solaires et durée des journées sont atténuées pour les latitudes proches de l'équateur. Ceci implique que pour les lieux proches des tropiques, les influences des flux solaires peuvent être contrastées entre les périodes de solstice et d'équinoxe.

Le contraste se révèle dans les quantités de flux incidents sur les parois et les sols de la ville. Les villes de basses latitudes se caractérisent par un soleil toujours haut, ce qui explique la forte densité de ces villes, qui permettent d'exposer le moins possible le sol urbain aux rayonnements solaires.

Les indicateurs physiques solaires doivent mettre en exergue le type d'exposition de l'espace et sa qualité d'exposition. Ils doivent être également,

confrontés à des indicateurs spatiaux exprimant l'orientation générale des surfaces et les proportions et également la latitude.

### Indicateurs Spatiaux

*Descripteur d'état*

Orientation générale et locale des surfaces  
Proportions rapport hauteur / largeur de l'espace H/W  
Densité...

*Descripteur d'évolution d'état*

Différence de proportions  
Différences d'orientation.  
Ecart de densité...

### Indicateurs physiques

*Descripteur d'état*

Situation en latitude  
% d'espace exposé  
Temps d'exposition  
Période générale d'exposition (matin, midi, soir)  
Energie moyenne incidente  
Température de surface...

*Descripteur d'évolution d'état*

Ecart de % de surface d'exposition  
Ecart du temps d'ensoleillement  
Différences des périodes générales d'exposition  
Ecart d'énergie incidente  
Ecart de température de surface, ...

#### 5.1.1.2 Les échanges radiatifs et convectifs

Le degré d'échange radiatif est souvent lié au degré d'ouverture et de fermeture de l'espace urbain. Ces caractéristiques sont principalement définies par les distances entre faces : plus les distances sont courtes plus les échanges sont intenses. Les échanges sont favorisés dans les espaces étroits.

L'angle entre normales de surfaces intervient également, par exemple : deux faces appartenant au même plan n'échangent pas par rayonnement.

### Indicateurs spatiaux

*Descripteur d'état*

Disposition relative des surfaces :  
Ouverture et fermeture de l'espace (H/W)...

*Descripteur d'évolution /d'impact*

Différence de relations formelles et géométriques...

### Indicateurs physiques

*Descripteur d'état*

Facteur de vue du ciel,  
Facteur de vue du sol,  
Facteur de vue des parois,...

*Descripteur d'évolution d'état*

Différence du facteur de vue du ciel, des parois, ...  
L'impact de l'obstruction du ciel, du sol, ...

Les échanges convectifs dépendent de deux facteurs :

Vent : lié aux conditions climatiques et comportements dynamiques de l'air au sein d'une ville.

Ecart de température : entre les surfaces et l'air.

## Indicateurs formels et spatiaux

*Descripteur d'état*

Directions du vent (dx, dy, dz)  
Effets aérodynamiques  
Rapport de surfaces ensoleillées et à l'ombre...

*Descripteur d'évolution d'état*

Changement d'orientation  
Différence d'effet...

## Indicateurs physiques

*Descripteur d'état*

Vitesse, fréquences, turbulence...  
Ecart de températures...

*Descripteur d'évolution d'état*

Différence de qualité du vent en dehors et dans la ville, entre différentes configurations urbaines ou espaces urbains.  
Différence des écart de températures entre surface et environnement,...

### 5.1.1.3 Les matériaux urbains

Une grande partie des matériaux de construction utilisés ont des comportements thermiques assimilés à des corps noirs, c'est-à-dire faibles réflectivités solaires et I.R., et bonne émissivité. Ceci induit un comportement d'influence favorisé par l'émission IR des parois plus que par multiréflexions. Certaines villes cependant accusent un taux d'utilisation assez prononcées de vitrage par rapport aux autres matériaux. Le verre, ayant un comportement différents suivant l'angle d'incidence des rayonnements solaires, peut avoir une forte capacité de réflexion ou de transmission de rayonnements solaires. Son émission propre dépendra des conditions internes et de sa résistance thermique.

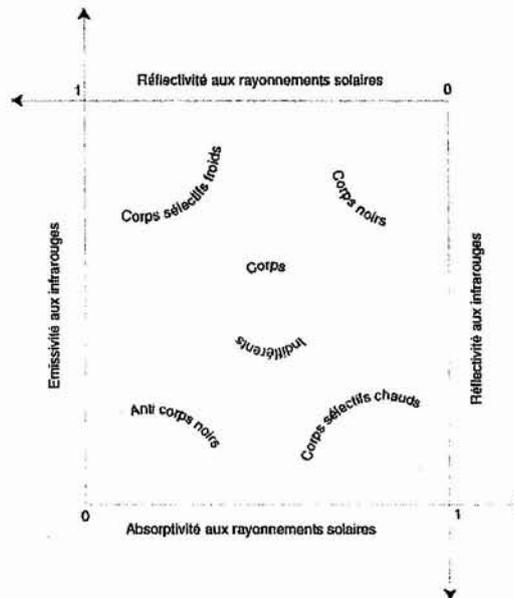


Figure 5.1 Les caractéristiques réflectives et absorptives des matériaux.

### **Indicateurs formels et spatiaux**

#### *Descripteur d'état*

Caractéristique des parois et du sol :

Proportions de chaussée,...

Proportion de surfaces fenêtre,...

#### *Descripteur d'évolution d'état*

Différences de matériaux de revêtement :  
substitution, changement...

### **Indicateurs physiques**

#### *Descripteur d'état*

Absorptivité de surface

Réflectivité dans le solaire et l'I.R.

#### *Descripteur d'évolution d'état*

Différence des qualités absorbantes et  
réflectives des surfaces,...

#### 5.1.1.4 Végétation

Caractérisation solaire (ombre), aérodynamique (porosité) et thermique de la végétation (consommation de chaleur par évapotranspiration ou par photosynthèse).

### **Indicateurs formels et spatiaux**

#### *Descripteur d'état*

Type de végétaux

Disposition et nombre

Caractéristiques de la masse foliaire :

Volume, densité, porosité...

Hauteur

#### *Descripteur d'évolution d'état*

Comportement estival et hivernal, ex. arbre à  
feuilles caduques

### **Indicateurs physiques**

#### *Descripteur d'état*

Caractéristique d'évapotranspiration et de  
photosynthèse.

Absorptivité

Réflectivité dans le solaire et l'I.R.

#### *Descripteur d'évolution d'état*

Différences de comportement diurnes et  
annuelles (absorption, réflexions, chaleur  
latente...)

Différences de comportement suivant l'âge du  
végétal...

#### 5.1.1.5 Autres facteurs climatiques

D'autres facteurs climatiques interviennent dans la caractérisation thermique des espaces urbains, qui dépendent pour la plupart aussi bien des comportements climatiques régionaux que des caractéristiques des espaces urbains, donnons comme exemple :

#### *Condition du ciel*

Les influences solaires peuvent être accentuées ou atténuées suivant les conditions générales du ciel. Ces dernières dépendent de la nature du climat locale et des facteurs météorologiques, qui déterminent le type de couverture nuageuse et sa fréquence annuelle.

#### *Températures et humidité de l'air*

Ces facteurs dépendent principalement du climat, de la végétation et de l'hydrologie du site. Cependant, la ville influe également sur ces deux paramètres.

Les exemples de descripteurs présentés ici, nous permettent d'observer l'implication des spécificités spatiales et formelles d'un espace, dans pratiquement tous les facteurs climatiques présentés. L'analyse de la correspondance entre les aspects physiques et spatiaux est possible pour un phénomène. Cette analyse demande une définition poussée des caractéristiques spatiales définies par les phénomènes observés. Cette étude devient beaucoup

plus complexe quand plusieurs facteurs doivent être analysés du point de vue formel. Elle demande une gestion élaborée de croisement des phénomènes observés exprimant différents facteurs climatiques. L'étude d'une manifestation climatique, ne peut être effectuée sans la prise en compte de son implication sur les autres types de manifestation. Cependant le croisement des implications formelles qu'induisent les phénomènes microclimatiques, ne peut s'élaborer sans cerner les interactions opérant entre un phénomène et les formes urbaines. Les études de facteurs climatique de manière isolée, tiennent compte des limites liées à la décomposition d'un phénomène intégrant un système complexe.

La méthode d'analyse des influences que nous développons concerne que les interactions radiatives entre surfaces. Elle permet l'interprétation physique et spatiale des manifestations physiques, que nous définissons par impact. Nous verrons, à partir de ce qui va suivre, que ces deux types d'interprétation sont étroitement liés.

## **5.2 Interprétation physique des influences. Etude des influences entre deux surfaces élémentaires**

Nous aborderons dans cette partie le type d'interprétation physique que permet le modèle d'analyse des impacts radiatifs thermiques d'une forme urbaine. Cette présentation sera basée sur une approche, qu'on peut nommer théorique, car les conditions d'investigation sont plus simples par rapport au cas précédent (cf. chap.4). Ces conditions d'analyse simplifiées permettent de cerner plus facilement quelques éléments de réponse à propos des influences des facteurs physiques sur les phénomènes thermiques radiatifs urbains. Nous tenterons de démontrer ce dernier point, sans développer de manière exhaustive les différents cas possibles d'interaction radiative entre surfaces.

La définition des cas analysés dits élémentaires repose sur une décomposition d'alternatives d'influences, que nous présenterons ici.

Nos cas sont limités aux relations d'influence entre deux surfaces, une surface dite distributrice (*d*) influente et une deuxième réceptrice (*r*) influencée.

Deux situations géométriques typiques ont été retenues :

- l'influence entre deux parois verticales ensoleillées ou à l'ombre.
- l'influence entre deux parois normales ensoleillées ou à l'ombre.

Ces formes d'influence ont été analysées pour différentes conditions solaires, répondant aux latitudes, qui sont celles de l'équateur, du tropique du Cancer et de Nantes, avec des parois de types variés.

Ces surfaces joueront le rôle d'influente ou d'influencée et cela suivant les situations d'observation adoptées.

Ainsi, les cas étudiés sont :

- l'influence d'une paroi sur un sol,
- l'influence d'une paroi sur une autre paroi,
- l'influence d'un sol sur une paroi.

Deux orientations principales sont affectées aux parois : nord pour celles se trouvant à l'ombre, et sud pour les parois ensoleillées. Les latitudes prises en compte sont ; 47° pour Nantes, 23° pour le tropique du Cancer, et 0° pour l'équateur. Les températures d'air extérieur prises comme référence pour les deux dernières latitudes correspondent (à titre indicatif) respectivement à celles des villes d'Equateur et de Mexico.

Rappelons l'expression des influences totales :

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r.\sigma.4.T_m^3+h+c)} + \frac{\Delta\psi_{rs}.\Theta_s \downarrow}{(\varepsilon_r.\sigma.4.T_m^3+h+c)} + \frac{\Delta F_{r\_env}.\Theta_{env}}{(\varepsilon_r.\sigma.4.T_m^3+h+c)} + \frac{F_{r\_d}.\Theta_d}{(\varepsilon_r.\sigma.4.T_m^3+h+c)} \quad (5.1)$$

Avec :

$\Theta_{env}$  l'énergie de grandes et de courtes longueurs d'onde de l'environnement de (r) et de (d) :

$$\Theta_{env} = [\alpha_{env}(1-\alpha_r)\Phi_{env} + \varepsilon_{env}.\sigma.T_{env}^4] \quad (5.2)$$

$\Theta_d$  l'énergie de courtes et de grandes longueurs d'onde de (d) :

$$\Theta_d = [\alpha_d(1-\alpha_r)\Phi_d + \varepsilon_d.\sigma.T_d^4] \quad (5.3)$$

$\Theta_s$  la somme des flux diffus et directs solaire.

$$S_r = S_d = S_{env}$$

Certaines approximations ont été effectuées dans l'estimation de la température de (d). En effet, (d) permettra d'évaluer les impacts, suivant sa température, dont l'influence, n'est considérée dans cette phase, que pour ses caractéristiques variables. Dans des cas plus complexes, rencontrés dans le chapitre précédent (cf. chap.4), les températures de surface ont fait l'objet d'une investigation plus poussée.

L'estimation de la température de la surface influente (d), dépendra de l'écriture du bilan qui est nul en régime stationnaire.

Soit :

$$c_d.(T_{im} - T_d) + h_d.(T_{air} - T_d) + (1-\alpha_d)\Phi_d - \varepsilon_d.\sigma.T_d^4 + F_{d\_env}[\varepsilon_d.\sigma.T_{env}^4 + \alpha_{env}.\Phi_{env}] + \psi_{d\_s}.\Phi_{M,S} = 0$$

(5.4)

Avec  $\psi_{d\_s} + F_{d\_env} = I$

$$c_d \cdot (T_{int} - T_{air}) + (h_d + c_d)(T_{air} - T_d) + (1 - \alpha_d)\Phi_d + \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot (T_{env}^4 - T_d^4) + F_{d\_env} \cdot \alpha_{env} \cdot \Phi_{env} + \psi_{d\_s} \cdot (\Phi_{IR\_s} - \varepsilon_{env} \cdot \sigma \cdot T_{env}^4) = 0 \quad (5.5)$$

L'environnement ici constitue toute surface minérale entourant ( $d$ ). Dans notre cas ( $d$ ) et ( $r$ ) sont isolées et l'environnement constitue le sol. Si ( $d$ ) est une surface horizontale, elle est considérée appartenant au sol.

En linéarisant l'expression et en considérant que,  $T_{env} \approx T_{air}$ , nous obtenons :

$$c_d \cdot (T_{int} - T_{air}) + (h_d + c_d + \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3)(T_{air} - T_d) + (1 - \alpha_d)\Phi_d + F_{d\_env} \cdot \alpha_{env} \cdot \Phi_{env} + \psi_{d\_s} \cdot (\Phi_{IR\_s} - \varepsilon_{env} \cdot \sigma \cdot T_{air}^4) = 0 \quad (5.6)$$

Avec  $T_m = (T_{air} + T_d) / 2$  résultant de la linéarisation de  $(T_{air}^4 - T_d^4)$ .

Nous pouvons estimer de manière très simplifiée la température de ( $d$ ) comme suit :

$$T_d = T_{air} + \frac{(1 - \alpha_d)\Phi_d + \psi_{d\_s} \cdot (\Phi_{IR\_s} - \varepsilon_{env} \cdot \sigma \cdot T_{air}^4) + F_{d\_env} \cdot \alpha_{env} \cdot \Phi_{env} + c_d \cdot (T_{int} - T_{air})}{h_d + c_d + 4 \cdot \sigma \cdot T_{air}^3} \quad (5.7)$$

Soit pour une paroi ( $d$ ) verticale ( $\psi_{d\_s} = 1/2$ ) :

$$T_d = T_{air} + \frac{(1 - \alpha_d)\Phi_d + 1/2 \cdot (\Phi_{IR\_s} - \varepsilon_{env} \cdot \sigma \cdot T_{air}^4 + \alpha_{env} \cdot \Phi_{env}) + c_d \cdot (T_{int} - T_{air})}{h_d + c_d + 4 \cdot \sigma \cdot T_{air}^3} \quad (5.8)$$

Pour une paroi ( $d$ ) horizontale ( $F_{d\_env} = 0$  et  $\psi_{d\_s} = 1$ ) :

$$T_d = T_{air} + \frac{(1 - \alpha_d)\Phi_d - \sigma \cdot T_{air}^4 + \Phi_{IR\_s} + c_d \cdot (T_{int} - T_{air})}{h_d + c_d + 4 \cdot \sigma \cdot T_{air}^3} \quad (5.9)$$

Avec :

- Pour un ciel clair, les apports infrarouges du ciel sont estimés comme suit :  $\Phi_{IR\_s} = 5,5 \cdot T_{air} + 213$  et exprimés en  $W \cdot m^{-2}$ , avec  $T_{air}$  en °C d'après Unsworth M. H. et Monteith J. L. (1975). Les apports solaires diffus et directs incidents sont définis suivant les expressions de De Blichambaut P. (1975).
- $h_e$  est le coefficient d'échange convectif. Il a été considéré égal à 12 ( $W/m^2K$ ) pour une paroi verticale, et égal à 14 ( $W/m^2K$ ) pour un sol.

## 5.2.1 Les études d'influence

Pour étudier l'influence de chacun des facteurs présentés plus haut, l'expression a été réécrite en abordant indépendamment chacun des paramètres intervenant dans le modèle des influences (cf. équation 5.10) :

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} + \frac{\Delta\psi_{rs} \cdot (L_s \downarrow + D_s \downarrow)}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} + \frac{\Delta F_{r\_env} \cdot \Theta_{env}}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} + \frac{F_{r\_d} \cdot \Theta_d}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} \quad (5.10)$$

soit :

$$\Delta T_{r\_total} = \Delta T_{r\_soleil} + \Delta T_{r\_ciel} + \Delta T_{r\_env} + \Delta T_{r\_d} \quad (5.11)$$

Les deux types d'analyse (physique et spatiale) seront mis en avant.

En premier lieu il s'agira d'observer les manifestations, de chaque intervenant, positives (la surface (*d*)) et négatives (les obstructions). En deuxième lieu, nous tenterons de définir une relation spatiale de disposition et de distance en rapport avec les influences. Cette analyse est effectuée grâce au facteur de forme limite que nous avons pu développer dans les chapitres précédents (cf. §3.1.4.1).

Cas	Obstructions		
	Environnement	ciel	Soleil
Influence d'une surface verticale sur une autre horizontale 	Non	Oui	Possible
$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} + \frac{\Delta\psi_{rs} \cdot (L_s \downarrow + D_s \downarrow)}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} + \frac{F_{r\_d} \cdot \Theta_d}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)}$ soit, $\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} + \frac{F_{r\_d} \cdot [\Theta_d - (L_s \downarrow + D_s \downarrow)]}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} \quad \text{Cas (1)}$			
Influence d'une surface horizontale sur une autre verticale. 	Oui	Non	Non
$\Delta T_r = \frac{F_{r\_d} \cdot [\Theta_d - \Theta_{env}]}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} \quad \text{(cas 2)}$			

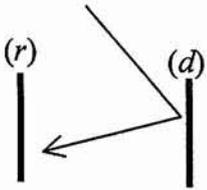
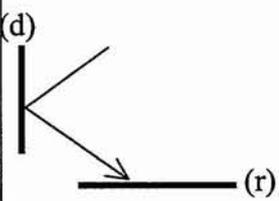
Influence d'une surface verticale sur une autre.	Possible	Oui	Possible
	$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} + \frac{\Delta\psi_r(L_r \downarrow + D_r \downarrow)}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} + \frac{\Delta F_{r,env} \cdot \Theta_{env}}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} + \frac{F_{r,d} \cdot \Theta_d}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)}$		
	(cas 3.a) (d opérant plusieurs obstructions à la fois). Si (d) opérant une seule obstruction à la fois : - Obstruction que de l'environnement : $\Delta T_r = \frac{F_{r,d} \cdot [\Theta_d - \Theta_{env}]}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} \text{ (cas 3.b).}$		
	- Obstruction que du ciel et éventuellement du soleil : $\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} + \frac{F_{r,d} \cdot [\Theta_d - (L_s \downarrow + D_s \downarrow)]}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} \text{ (cas 3.c)}$		

Tableau 5.2 Synthèse des différents cas d'influence possible entre deux surfaces élémentaires.

Le tableau (5.2) présente les différentes conditions d'interaction ou d'influence entre deux éléments (d) et (r) de surfaces égales. L'intérêt de cette étude élémentaire réside dans le fait d'analyser plusieurs cas de figure d'interaction entre (d) et (r). La distinction des cas est primordiale. Nous retiendrons les situations où une seule obstruction à la fois est envisagée, ainsi seuls les cas (1, 2, 3.c) seront développés. Des cas plus complexes d'obstruction ont été observés dans le chapitre précédent.

Cas	Analyse	
	Physique Influence de chaque paramètre de l'expression : $\text{Inf}_{d,r,\text{total}} = \text{Inf}_{d,r} + \text{Inf}_{\text{ciel},r} + \text{Inf}_{\text{soleil},r} + \text{Inf}_{\text{env},r}$	Spatiale Les influences et les dispositions spatiales $\Delta T_r = f(F)$ avec $F(0:1)$ $F_{\text{limit}} = f(\Delta T_{\text{seuil}})$
Cas 1 : Influence paroi sur sol 	$\Delta T_{r,\text{total}} = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)} + \frac{F_{r,d} \cdot [\Theta_d - \Theta_s \downarrow]}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)}$ $\Delta T_{r,\text{total}} = \Delta T_{r,\text{soleil}} + F_{r,d} \cdot (\Delta T'_{r,d} - \Delta T'_{r,\text{ciel}})$ avec : $\Delta T'_{r,\text{ciel}} = \frac{\Theta_s \downarrow}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)}$ et $\Delta T'_{r,d} = \frac{\Theta_d}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)}$	

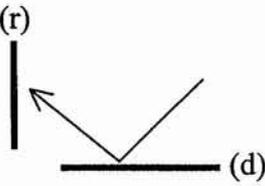
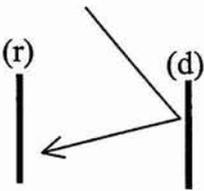
	<p>Analyse de l'influence de (d)</p> $Inf_{d\_flux} = \frac{\Delta T_{d\_flux}}{\Delta T_{r\_d}} \cdot 100 \text{ (%)}$ <p>Influence de (d) par rapport aux obstructions.</p> $Inf_{d\_ciel} = \frac{\Delta T_{r\_d}}{\Delta T_{r\_ciel}} \cdot 100 \text{ (%)}$ $Inf_{d\_soleil} = \frac{\Delta T_{r\_d}}{\Delta T_{r\_soleil}} \cdot 100 \text{ (%)}$ $Inf_{d\_soleil+ciel} = \frac{\Delta T_{r\_d}}{\Delta T_{r\_soleil} + \Delta T_{r\_ciel}}$	<p>Facteur de forme limite.</p> $F_{r\_ciel\_limit} = \frac{\Delta T_{r\_ciel\_seuil}}{\Delta T'_{r\_ciel}}$ $F_{r\_d\_limit} = \frac{\Delta T_{r\_d\_seuil}}{\Delta T'_{r\_d}}$
<p>Cas2 : Influence sol sur paroi</p> 	$\Delta T_r = \frac{F_{r\_d} \cdot [\Theta_d - \Theta_{env}]}{(\epsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h + c)}$ <p>Influence de (d)</p> $Inf_{d\_flux} = \frac{\Delta T_{d\_flux}}{\Delta T_{r\_d}} \cdot 100 \text{ (%)}$ <p>Influence de (d) par rapport aux obstructions.</p> $Inf_{d\_env} = \frac{\Delta T_{r\_d}}{\Delta T_{r\_env}} \cdot 100 \text{ (%)}$ <p>L'environnement peut être défini comme sol de référence avec des caractéristiques qui ont été remplacée par celle de (d).</p>	<p>Les influence et les dispositions spatiales</p> $\Delta T_{r\_total} = F_{r\_d} \cdot (\Delta T'_{r\_d} - \Delta T'_{r\_env})$ <p>Facteurs de forme limite.</p> $F_{r\_d\_limit\_total} = \frac{\Delta T_{r\_seuil\_total}}{(\Delta T'_{r\_d} - \Delta T'_{r\_env})}$ $F_{r\_env\_limit} = \frac{\Delta T_{r\_env\_seuil}}{\Delta T'_{r\_env}}$ $F_{r\_d\_limit} = \frac{\Delta T_{r\_d\_seuil}}{\Delta T'_{r\_d}}$
<p>Cas3.c : Influence d'une paroi sur une autre</p> 	$\Delta T_r = \frac{(1 - \alpha_r) \Delta \Phi_r}{(\epsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h + c)} + \frac{F_{r\_d} \cdot [\Theta_d - \Theta_s \downarrow]}{(\epsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h + c)}$ <p>Influence de (d)</p> $Inf_{d\_flux} = \frac{\Delta T_{d\_flux}}{\Delta T_{r\_d}} \cdot 100 \text{ (%)}$ <p>Influence de (d) par rapport aux obstructions :</p> $Inf_{d\_ciel} = \frac{\Delta T_{r\_d}}{\Delta T_{r\_ciel}} \cdot 100 \text{ (%)}$ $Inf_{d\_soleil} = \frac{\Delta T_{r\_d}}{\Delta T_{r\_soleil}} \cdot 100 \text{ (%)}$ $Inf_{d\_soleil+ciel} = \frac{\Delta T_{r\_d}}{\Delta T_{r\_soleil} + \Delta T_{r\_ciel}}$	<p>Les influence et les dispositions spatiales</p> $\Delta T_{r\_total} = \Delta T_{r\_soleil} + F_{r\_d} \cdot (\Delta T'_{r\_d} - \Delta T'_{r\_ciel})$ <p>Les facteurs de forme limites.</p> $F_{r\_d\_limit\_total} = \frac{\Delta T_{r\_seuil\_total} - \Delta T_{r\_soleil}}{(\Delta T'_{r\_d} - \Delta T'_{r\_ciel})}$ $F_{r\_ciel\_limit} = \frac{\Delta T_{r\_ciel\_seuil}}{\Delta T'_{r\_ciel}}$ $F_{r\_d\_limit} = \frac{\Delta T_{r\_d\_seuil}}{\Delta T'_{r\_d}}$

Tableau 5.3 Synthèse des différents descripteurs physiques et spatiaux permettant l'analyse des influences

Les parois et sols types sélectionnés sont caractérisés par des conductances  $c$  (W/mK) et des réflectivités solaires, plus ou moins contrastées. Les réflexions en infrarouge thermique ont été considérées négligeables.

Deux types de parois ont été retenus :

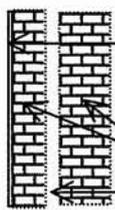
- paroi béton avec une grande conductibilité et réflectivité (sans isolant),
- paroi en brique avec une faible conductibilité et réflectivité (avec isolation).

Trois cas de sols :

- sol revêtement béton, de faible conductibilité et de grande réflectivité,
- sol asphalte, de faible conductibilité et faible réflectivité,
- sol nu, de moyenne conductibilité et moyenne réflectivité.

Le choix rigoureux des matériaux, de par leurs caractéristiques physiques, nous permet de donner quelques éléments de réponse à propos des questionnements suivants :

- Une valeur d'albédo d'une surface donnée, assez grande induirait une faible absorptivité solaire de la paroi donc, une faible influence de par sa température. Mais cette influence peut-elle être compensée par l'énergie qu'elle est capable de réfléchir ?
- Une paroi qui réfléchit très peu d'énergie, peut-on dire que son influence est compensée par sa température ?
- Quelle est la part de l'influence des énergies de grandes et de courtes longueurs d'onde et des caractéristiques physiques des parois dans les influences thermiques radiatives ?

Type de Paroi et de Sol	Conductance (W/mK)	$\alpha$
<p><b>Paroi Brique</b></p>  <p>Plâtre e=1,5 cm, <math>\lambda=0,74</math>W/mK**</p> <p>Brique e=15 et 10 cm, <math>\lambda=0,5</math>W/mK**</p> <p>Couche d'air e=5 cm, <math>\lambda=0,24</math> W/mK**</p>	<b>1,2***</b>	<b>0.2**</b>
<p><b>Paroi béton</b></p>  <p>Béton e=20cm, <math>\lambda=2</math> W/mK**</p>	<b>4.76***</b>	<b>0.45**</b>

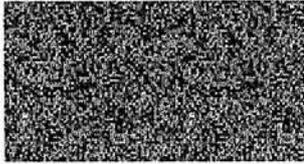
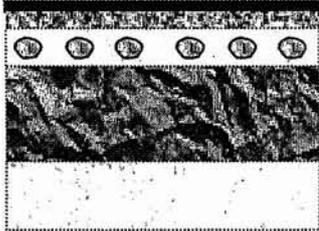
<p><b>Sol nu</b></p> 	<p>Sol nu 35% humidité e=1m, <math>\lambda=0,17 \text{ W/mK}^*</math></p>	<p><b>0,17*</b></p>	<p><b>0.2*</b></p>
<p><b>Dalle de béton ou de granit</b></p> 	<p>Dalle en béton, e=5-7 cm, Sable, e=5-10 cm, <math>\lambda=0,07 \text{ W/mK}^*</math> Terre sèche, e=1m, <math>\lambda=0,04 \text{ W/mK}^*</math></p>	<p><b>0.038</b></p>	<p><b>0.45*</b></p>
<p><b>Route en asphalte</b></p> 	<p>Asphalte sablé e : 2,5-3 cm Macadam mixte asphalté e : 4-5 cm, Pierraille, e : 6-8 cm, Blocage, e : 15-20 cm, <math>\lambda=3 \text{ W/mK}^{**}</math> Terre sèche, <math>\lambda=0,04 \text{ W/mK}^*</math></p>	<p><b>0.038</b></p>	<p><b>0.1*</b></p>

Tableau 5.4 Synthèse des différents types de paroi et sol utilisés.

\* :Takashi Asaeda, Vu Than Ca, Akio Wake, 1996, "Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere", Atmospheric Environment, vol. 30 n°3, pp. 413-427.

\*\* :Martin Mittag, Pratique de la construction des bâtiments, Paris : Editions Eyrolles, 1981.

\*\*\* :  $1/h_1=0,11 \text{ (m}^2\text{K/W)}$ , Réf. Règle Th-K97, Document Technique Unifié, CSTB.

### 5.2.1.1 Influence d'une surface sur une autre

Dans cette partie, nous tenterons d'aborder les questions relatives à l'influence d'une surface sur la température d'une autre. Une surface influence, de par ses conditions de températures, de flux et également de disposition par rapport à la surface influencée. L'isolation de chacun de ces paramètres nous permettra d'éclaircir un certain nombre de questionnements liés au degré de manifestation de chacun de ces facteurs.

Les diagrammes qui vont suivre tentent de représenter l'apport thermique d'une surface sur une autre, et cela de par les flux qu'elle réfléchit et par sa température, pour des situations de latitude correspondant à celle de  $0^\circ$ ,  $23^\circ$  et  $47^\circ$  nord. Les obstructions ne seront prises en compte qu'ultérieurement. Les estimations de  $\Delta T_{r,d}$  effectuées (tableau 5.5) correspondent aux influences occasionnées par une surface ( $d$ ) disposée de manière à ce que le facteur de forme entre ( $r$ ) et ( $d$ ) soit égal à 0.2.

En premier lieu, seront observés les variations annuelles des influences calculées pour le 21<sup>ème</sup> jour de chaque mois à midi.

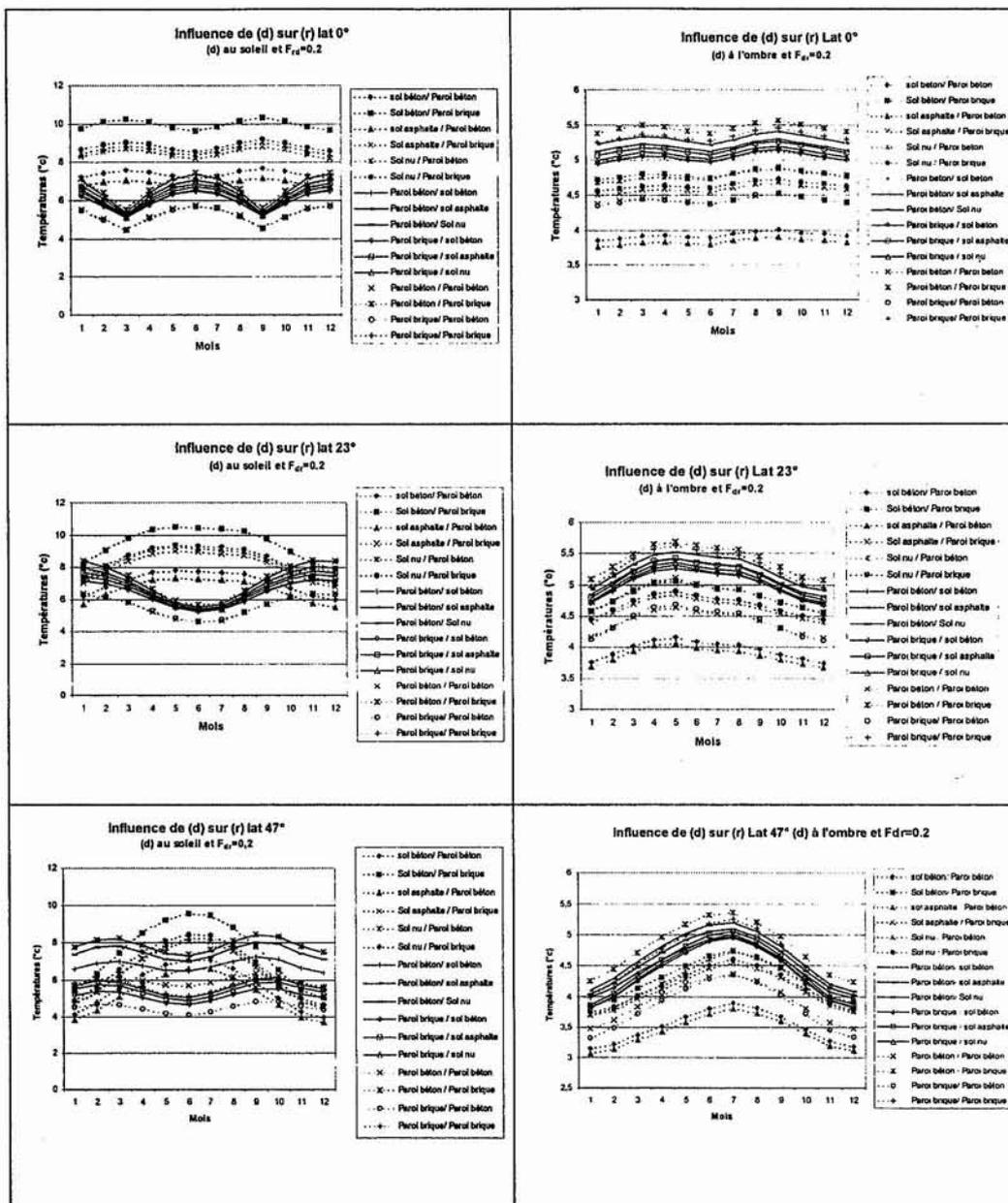


Tableau 5.5 Variation des influence de (d) sur (r) suivant les latitudes 0° 23° et 47°.

Nous pouvons observer une différence de comportement entre les influences des surfaces horizontales et verticales. Cette différence est plus remarquable pour les cas éloignés des latitudes tropicales.

Ceci pose la question du type de caractérisation des influences qu'induiraient les différences d'intensité de flux solaires incidents sur les surfaces influentes. Ces différences sont liées à l'angle d'incidence des rayonnements solaires dépendant aussi bien de l'orientation et l'inclinaison des surfaces que de la position solaire journalière saisonnière et suivant la latitude. Nous tenterons de donner des réponses à travers l'analyse des influences de (d) de par ses réflexions solaires.

Notons, que le comportement des flux incidents sur une surface peut être considéré symétrique par rapport à l'équateur. Il est le même pour les tropiques du cancer et du capricorne comparé à des saisons identiques. Nous soulignons dans cet exemple simplifié, l'apport diffus solaire considéré comme uniforme sur la voûte céleste. Ce qui explique la disparition des variations saisonnières d'influence entre les surfaces horizontales et verticales, quand elles sont à l'ombre.

Les surfaces verticales situées en grandes latitudes, participent davantage au réchauffement de l'environnement minéral pendant les saisons d'hivers le midi, que l'été. Pendant les saisons estivales, les surfaces horizontales jouent un rôle primordial. Cette situation ne se rencontre pas pour l'équateur. Les sols continueront à entretenir une relation privilégiée avec les influences et cela durant toute l'année.

Nous pouvons observer, que la variation journalière des influences est tributaire du mouvement angulaire du soleil. Au lever et au coucher du soleil, les rayonnements incidents sont quasi-normaux aux parois verticales influentes. Ainsi, ces dernières se manifestent plus dans les influences thermiques de leur environnement, que le sol. Cette situation s'inverse, quand le soleil s'approche du zénith.

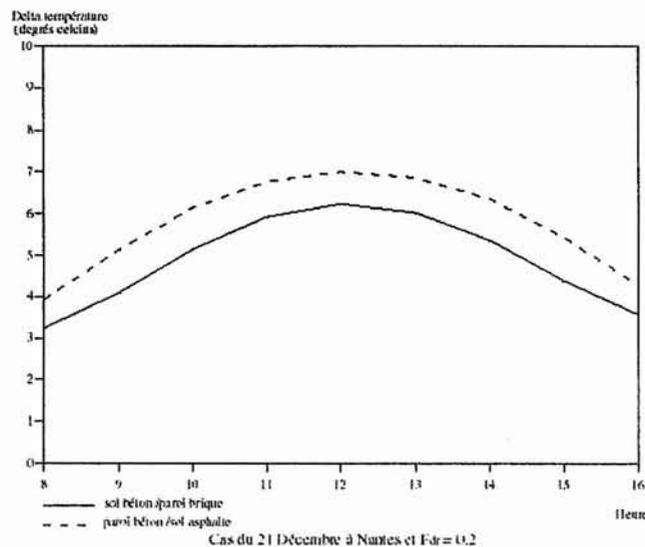


Figure 5.2 Variation diurne des influences de  $(d)$  sur  $(r)$  sous les conditions solaires et thermiques de Nantes le 21 décembre.

Cependant pour les conditions hivernales et de grandes latitudes, cette situation ne s'inverse pas durant la journée. En effet, nous pouvons observer que l'influence d'une paroi sur une autre reste sensiblement plus importante (cf. fig. 5.2) et cela durant toute la journée du 21 décembre pour la latitude  $47^\circ$ . Alors qu'au mois de juin cette situation est inversée (cf. fig. 5.3).

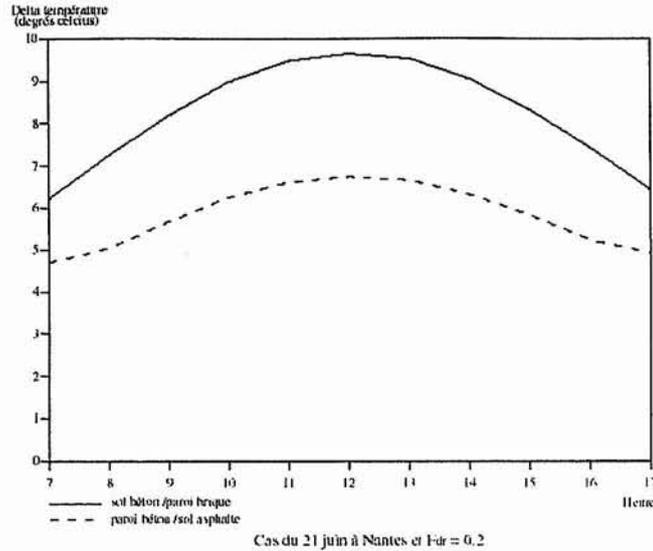


Figure 5.3 Variation diurne des influences de  $(d)$  sur  $(r)$  sous les conditions solaire et thermique de Nantes du 21 juin.

Ainsi pour les latitudes proches de l'équateur l'influence du sol reste dominante toute l'année. Alors que les latitudes correspondant aux situations plus au nord ou au sud des tropiques du Cancer ou du Capricorne, la paroi verticale joue un rôle plus important dans l'influence de la température de son environnement et cela est plus marqué pendant la période hivernale. Les différences d'influence thermique annuelle entre les surfaces verticales et horizontales sont plus marquées pour les latitudes se trouvant entre  $23^\circ$  et  $66^\circ$ . En effet, dans ces conditions, l'influence des parois verticales est dominante l'hivers, alors que l'été celle-ci cède ce rôle au paroi horizontale. Pour les latitude entre l'équateur et les tropiques l'influence des parois horizontale reste dominante. Pour les latitudes plus au nord ou sud de  $\pm 66^\circ$  les parois verticales jouent un rôle plus important dans les impacts radiatifs thermiques. Ceci s'explique par l'inclinaison de la terre et de sa rotation autour du soleil (cf. §5.1.1.). ces remarques ne tiennent cependant pas compte des différences de condition de vent entre les deux saisons (hivernale et estivale). Les impacts convectifs doivent être considérés parallèlement aux influences radiatives présentées ici. Il est clair que nous présentons l'influence de  $(d)$  sur  $(r)$  de manière distincte et cela sans introduire les impacts thermiques négatifs dus à la transformation de l'environnement de  $(r)$  par  $(d)$ . Les estimations des influences thermiques ne sont pas définitives car le bilan implique l'intégration aussi bien des apports que des pertes dues aux obstructions. Nous aborderons cette question dans l'analyse des bilans. Avant cela, nous tenterons de cerner le rôle joué par les caractéristiques physiques des matériaux et les flux de grandes et de courtes longueurs d'onde dans les interactions radiatives entre surfaces.

### Influences des flux et des émissions de température

Nous pouvons observer à partir des diagrammes d'influence (cf. tableau 5.6), que les influences les plus intenses dans la majorité de nos cas sont achevées par l'échange sol béton / paroi brique.

En effet cet échange présente une très bonne propriété réfléchive pour ( $d$ ) et absorptive de ( $r$ ). Le sol béton présente également une situation angulaire par rapport aux flux solaires incidents qui augmente son potentiel d'influence, et cela aussi bien par sa température que par ses réflexions.

La question qui se pose en premier lieu : Quel rôle joue la température de surface par rapport aux réflexions solaire sur cette influence ?

En deuxième lieu, nous tenterons de cerner le rôle joué par les caractéristiques physiques des matériaux dans les influences radiatives thermiques.

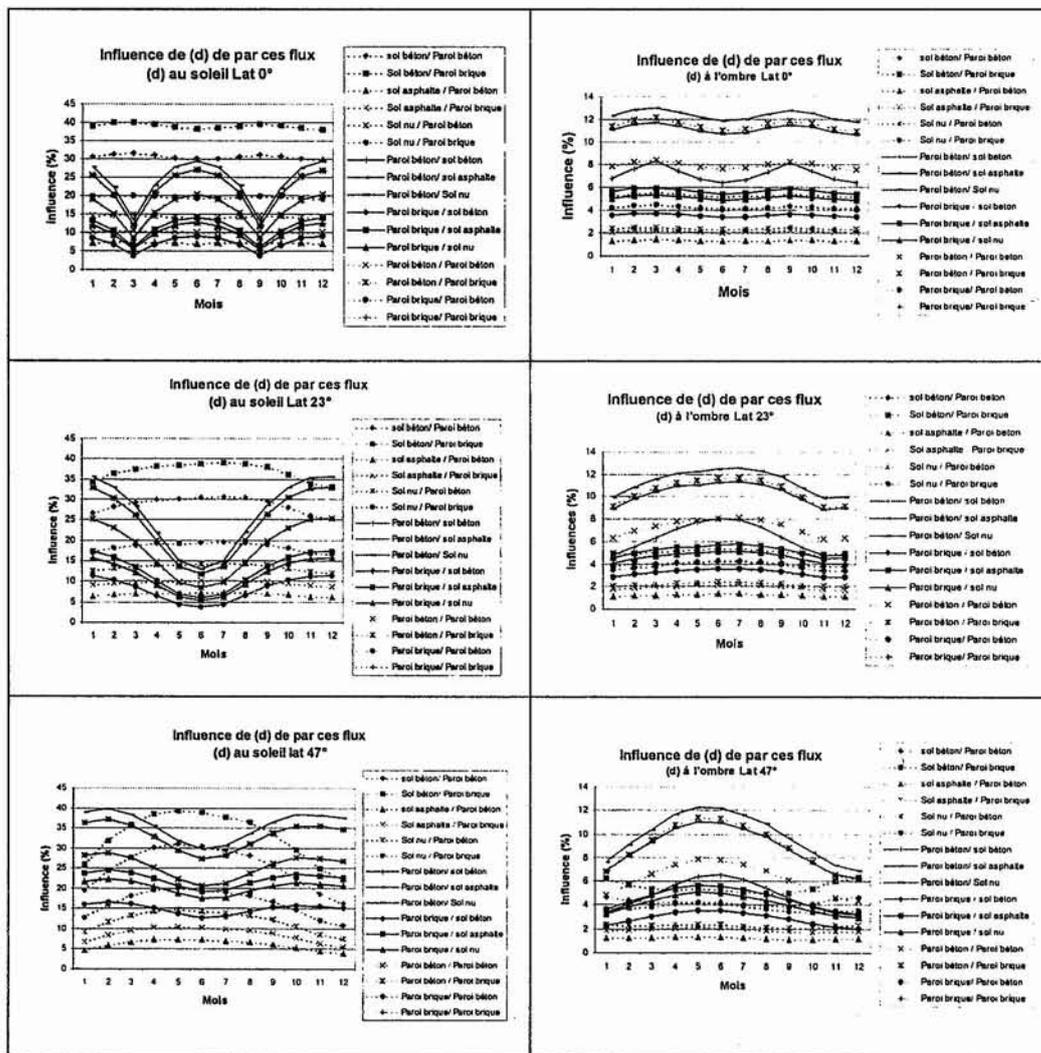


Tableau 5.6 Rapport entre l'influence solaire et infrarouge de ( $d$ ) sur ( $r$ ).

Il est intéressant de comparer les influences radiatives thermiques dues aux émissions infrarouges de surface, par rapport à celles dues aux réflexions solaires.

Cette comparaison est basée sur l'écriture du rapport des influences des flux relatives à celles des influences de surface, soit :

$$\Delta T_{r,d} = \Delta T_{r,flux} + \Delta T_{r,temp} \text{ ou } Inf\_temp + Infl\_flux = Infl\_d$$

L'expression de l'influence relative des flux est :  $\%Infl\_flux = \frac{\Delta T_{r,flux}}{\Delta T_{r,d}} \cdot 100$

Les diagrammes ci-dessus (cf. tableau 5.7), nous révèle que l'apport de (*d*) en terme de flux est souvent moins influent que l'apport infrarouge. L'influence solaire de la surface béton est parmi celles qui peuvent rivaliser avec ces influences infrarouges. En sachant que le béton possède dans notre cas des propriétés de réflexions très importantes. Ces influences sont beaucoup plus faibles quand la surface influente (*d*) est à l'ombre.

Il est important de noter que les erreurs que peuvent induire nos simplifications sont à considérer. Ces simplifications concernent :

- la sous-estimation des influences des flux et cela en considérant une seule réflexion dans la bande solaire :

$$\Phi_{1\_solaire} = F_{d,r} \cdot \alpha_d \cdot (1 - \alpha_r) \cdot \Phi_{d\_solaire} \quad (5.12)$$

En considérant *n* réflexions :  $\Phi_{d\_solaire}^* = \Phi_{1\_solaire} + \Phi_{2\_solaire} + \dots + \Phi_{n\_solaire}$

$$\text{Soit, } \Phi_{n\_solaire} = F_{d,r}^n \cdot F_{r,d}^{n-1} \cdot \alpha_d^n \cdot \alpha_r^{n-1} \cdot (1 - \alpha_r) \cdot \Phi_{d\_solaire} \quad (5.13)$$

et  $S_d = S_r$  implique que  $F_{dr} = F_{rd}$  :

$$\Phi_{n\_solaire} = F_{d,r}^{2n-1} \cdot \alpha_d^n \cdot \alpha_r^{n-1} \cdot (1 - \alpha_r) \cdot \Phi_{d\_solaire} \quad (5.14)$$

Il est possible d'estimer les erreurs maximales en comparant  $\%Infl\_flux$  et  $\%Infl\_flux\_max$  qui expriment les influences des flux avec et sans multiréflexions et un  $F_{dr} = 1$ .

L'erreur maximale en terme d'influence exprimée en (%) que peut occasionner la négligence des multiréflexions dépassent rarement les 5% (cf. tableau 5.9).

- la surestimation des températures de surface, en effectuant le calcul en régime permanent plutôt que variable et en sous-estimant la valeur de la température moyenne entre la surface et son environnement (cf. §5.2.).
- la sous-estimation de la température de surface de (*d*) et cela en considérant que l'environnement ayant une température proche de celle de l'air, et en négligeant les multiréflexions.

En négligeant les multiréflexions nous considérons que :

$$\Phi_{d\_IR}^* = F_{d,r} \cdot \Phi_{d\_IR}, \alpha_{r\_IR} \approx 0 \text{ et } \alpha_{d\_IR} \approx 0$$

avec :

$$\Phi_{d\_IR}^* = F_{d,r} \cdot (1 - \alpha_{r\_IR}) \cdot \Phi_{d\_IR} + F_{d,r}^3 \cdot \alpha_{d\_IR} \cdot \alpha_{r\_IR} \cdot (1 - \alpha_{r\_IR}) \cdot \Phi_{d\_IR} + \dots + F_{d,r}^{2n-1} \cdot \alpha_{d\_IR}^{n-1} \cdot \alpha_{r\_IR}^{n-1} \cdot (1 - \alpha_{r\_IR}) \cdot \Phi_{d\_IR} \quad (5.15)$$

Bien que l'influence thermique de ( $d$ ) sur ( $r$ ) par les flux solaires réfléchis n'est pas négligeable, son impact infrarouge reste plus important. Cependant la raison première pour qu'une surface (dans nos cas c'est ( $d$ )), exerce une importante ou faible influence, est liée à ses conditions d'ensoleillement.

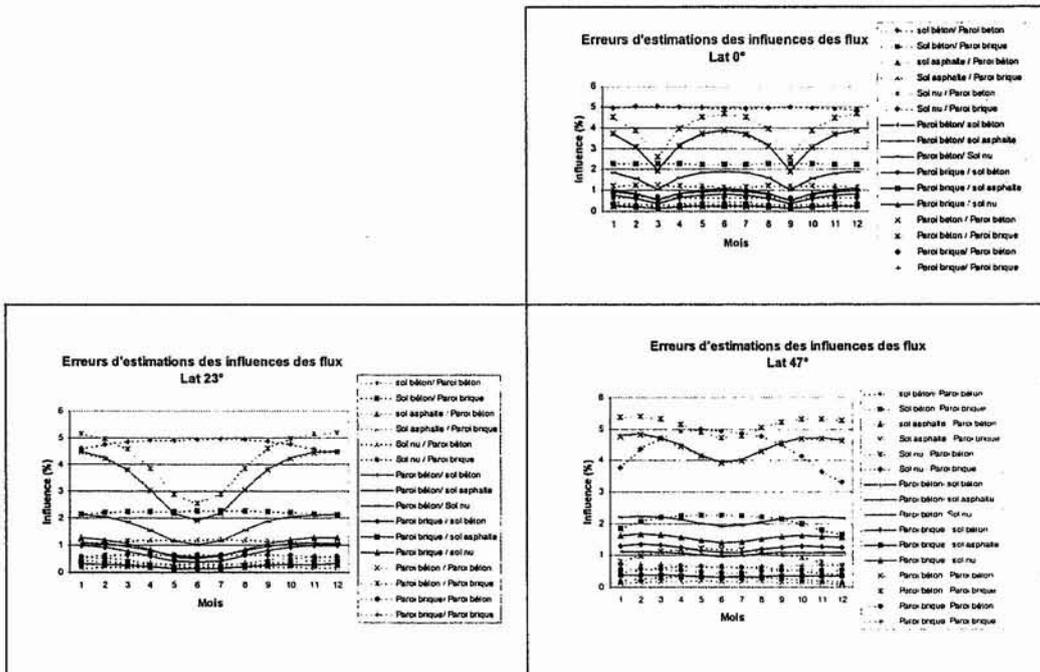
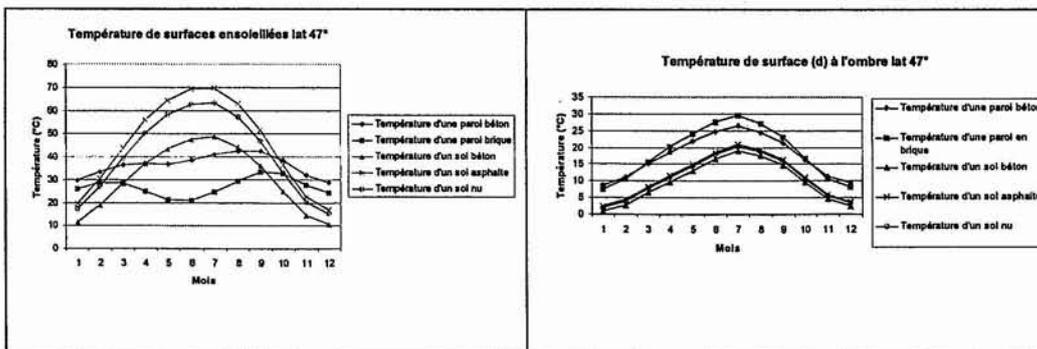


Tableau 5.7 Erreurs maximales estimées dans la définition des rapports d'influences des flux CLO comparés aux GLO (%).

Les seules sources d'énergies qui permettent le réchauffement des surfaces extérieures d'une paroi sont soit liées aux conditions intérieures (chauffage, etc.) ou à celles extérieures. A part dans les conditions de ciel nuageux ou nocturnes, le soleil reste la source primordiale de réchauffement des surfaces urbaines.

En effet, nous pouvons observer, pendant les conditions hivernales, que le sol asphalté possédant une plus grande capacité d'absorption, accuse des températures moins élevées que celles des surfaces plus exposées aux rayonnements solaires (exp. paroi brique ou béton).



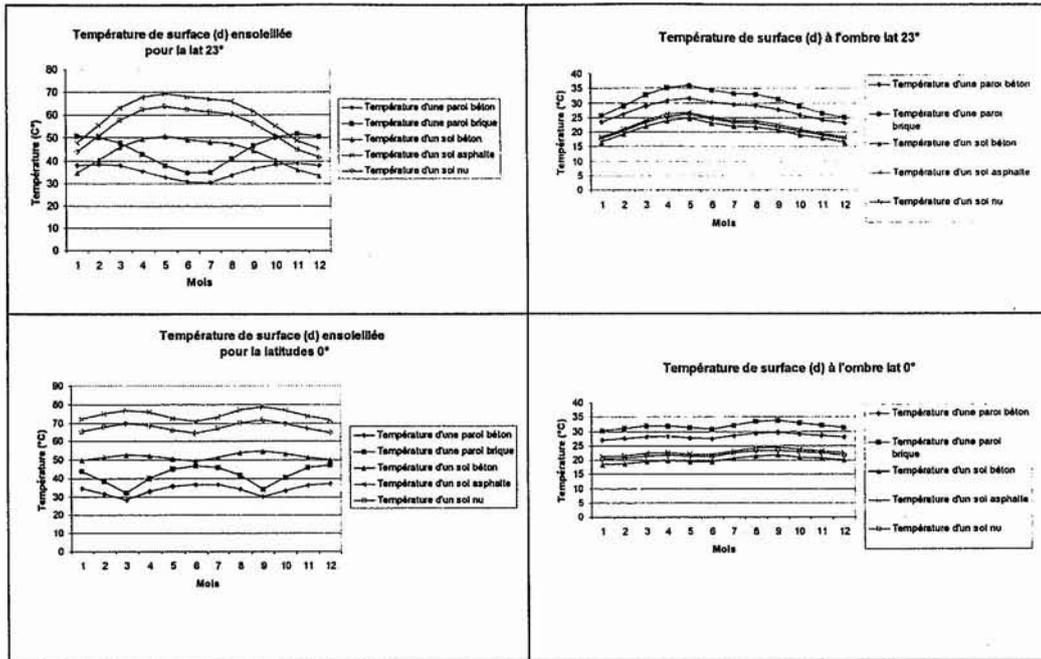


Tableau 5.8 Températures de (d) estimées.

Les flux solaires restent le facteur premier, déterminant des influences thermiques en milieu urbain. Il n'est pas possible d'expliquer l'îlot de chaleur, que par les phénomènes de multiréflexion solaires. Il est important d'observer le degré de pénétration des rayonnements solaires dans un espace urbain donné et les températures de surface ainsi occasionnées. Le rapport entre surfaces ensoleillées et à l'ombre, peut représenter, celui entre surfaces influentes et influencées.

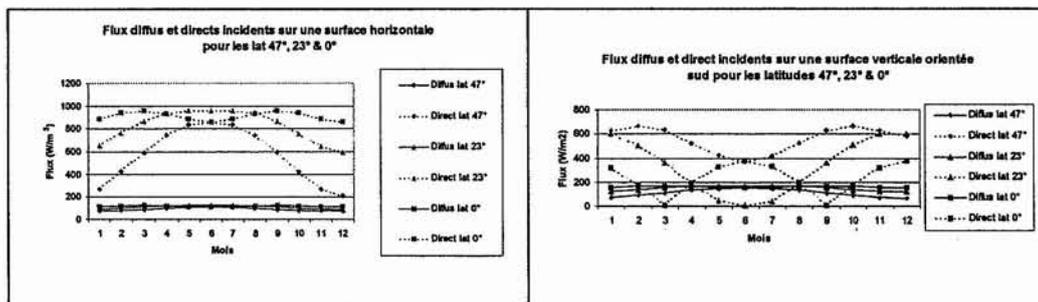


Tableau 5.9 Flux solaires directs et diffus incidents sur une surface horizontale et verticale le 21<sup>ème</sup> jour de chaque mois à midi.

### Les matériaux

À travers le choix des matériaux, deux caractéristiques ont été prises en compte ; la conductibilité et la réflectivité (ou albédo). Rappelons qu'une surface influence son environnement par sa température, et par la réflexion des flux. Cette influence sera d'autant plus grande, si une surface est chaude et réfléchit plus de flux que son environnement.

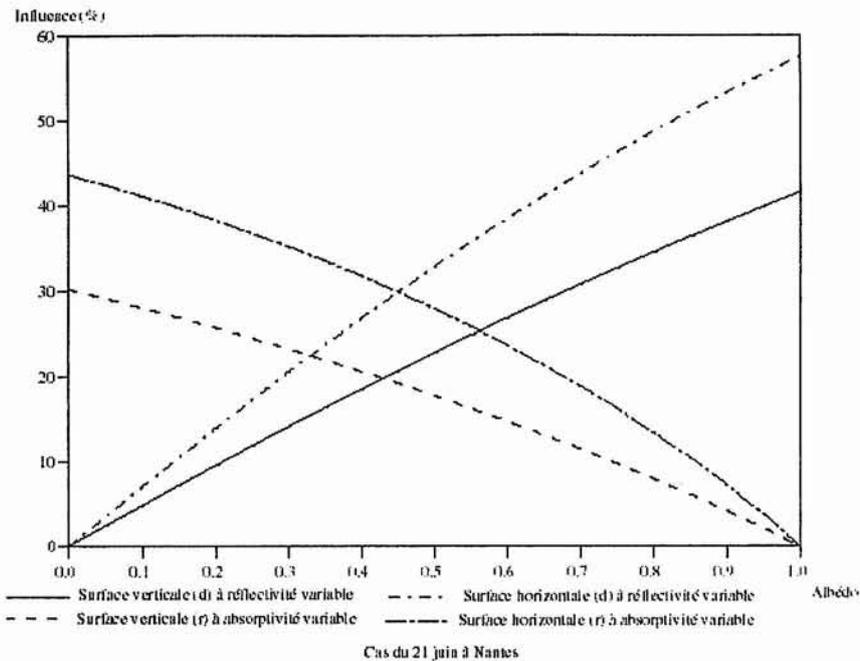


Figure 5.4 La relation entre la variation de l'albédo de ( $d$ ) et de ( $r$ ) avec l'influence des flux solaires par rapport à celle des flux infrarouges Condition d'influence d'un sol béton sur une paroi brique et inversement.

L'influence des réflexions solaires dépend des caractéristiques physiques des surfaces réceptrices et émettrices. Ses caractéristiques sont la **réflectivité** des surfaces *émettrices* et l'**absorptivité** des surfaces *réceptrices*.

Les échanges présentant les caractéristiques de grande réflectivité pour la surface ( $d$ ) et de grande absorptivité pour la surface ( $r$ ) sont les plus influentes, et inversement. Mais il est clair que cette caractéristique ne peut à elle seule expliquer la hiérarchie d'influence résultante, si nous procédons à la comparaison des données du tableau ci-dessous (cf. tableau 5.14) avec les diagrammes tracés plus haut (cf. tableau 5.7). En effet, le couple d'influence paroi béton et sol asphalté semble le mieux répondre aux exigences physiques des échanges. Cependant, c'est l'influence du sol béton sur une paroi brique qui est la plus importante.

Les autres facteurs présentés plus haut (flux incidents, températures), sont à considérer parallèlement aux propriétés réfléchives des surfaces. En effet, le sol béton reçoit plus d'énergie solaire qu'une paroi béton. Nous pouvons donc considérer les réflectivités solaires comme facteurs modifiants, alors que les énergies solaires et infrarouges sont des facteurs dominant des influences entre surfaces.

<b>Echanges</b>	$\alpha_d \cdot (1 - \alpha_r)$
Paroi béton / sol asphalte	0.405
Sol béton / paroi brique	0.36
Paroi béton / paroi brique	0.36
Paroi béton/ sol nu	0.36
Sol béton / paroi béton	0.247
Paroi béton / paroi béton	0.247
Paroi béton / sol béton	0.247
Paroi brique / sol asphalte	0.18
Sol nu /paroi brique	0.16
Paroi brique/ sol nu	0.16
Sol nu / Paroi béton	0.11
Paroi brique/ paroi béton	0.11
Paroi brique / sol nu	0.11
Sol asphalte / Paroi brique	0.08
Sol asphalte/ Paroi béton	0.055
Paroi brique/ paroi brique	0.04

Tableau 5.10 Détermination des facteurs d'échanges radiatifs solaires des différents cas d'influence

### ***Influence des dispositions sur les échanges***

Les *facteurs de forme* dépendent des caractéristiques topologiques du lieu. A partir de l'expression analytique des facteurs de forme, nous étudierons deux dispositions importantes et fréquentes en milieu urbain correspondant : au parallélisme de parois (d'une rue par exemple) et à la perpendicularité du sol et des parois.

Cette analyse se basera sur l'expression du facteur de forme limite (§ 3.1.4.1 ). Ce dernier peut exprimer les relations spatiales entre surfaces correspondant aux échanges radiatives entre environnement. L'expression du facteur de forme limite prend plusieurs formes suivant le type de relation analysé :

$$\Delta T_{r-d} = \frac{F_{dr} \cdot [(1 - \alpha_r) \alpha_d \cdot \Phi_d + \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_d^4]}{h_r + c_r + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_m^3} \quad \text{et} \quad F_{limit} = \frac{\Delta T_{seuil} \cdot (\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h_r + c_r)}{\alpha_d (1 - \alpha_r) \cdot \Phi_d + \varepsilon_d \cdot \sigma \cdot T_d^4} \quad (5.16) \text{ et } (5.17)$$

avec :

$$\Delta T_{r-Flux} = \frac{F_{dr} \cdot (1 - \alpha_r) \alpha_d \cdot \Phi_d}{h_r + c_r + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{air}^3}, \quad \text{soit} \quad F_{limit\_flux} = \frac{\Delta T_{seuil} \cdot (\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot T_m^3 + h_c + c_c)}{\alpha_d \cdot (1 - \alpha_r) \cdot \Phi_d} \quad (5.18) \text{ et } (5.19)$$

et,

$$\Delta T_{r-Temperature} = \frac{F_{dr} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_d^4}{h_r + c_r + 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{air}^3}, \quad F_{limit\_flux} = \frac{\Delta T_{seuil} \cdot (\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot T_m^3 + h_c + c_c)}{\varepsilon_d \cdot \sigma \cdot T_d^4} \quad (5.20) \text{ et } (5.21)$$

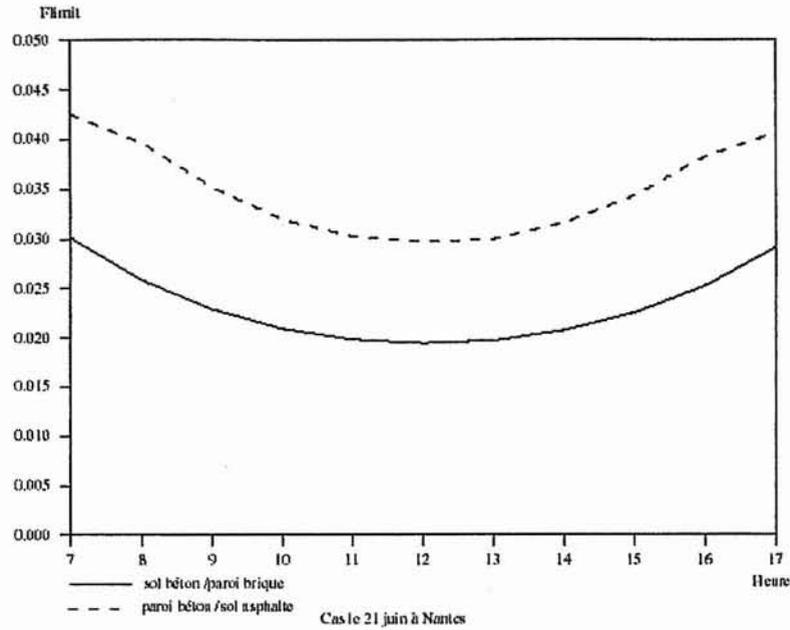


Figure 5.5 Variation diurne du facteur de forme limite le 21 juin à Nantes.  
 $\Delta T_{rd\_seuil} = 0.1^\circ C$ .

A partir de ces expressions, nous pouvons donner quelques ordres de grandeur sur les positions des surfaces et leurs degrés d'influence. Pour cela nous utilisons l'expression analytique simple des facteurs de forme entre deux surfaces perpendiculaires et parallèles (cf. tableau 5.13). La définition spatiale des influences de manière simple permet de situer l'échelle spatiale des impacts radiatifs thermiques. La définition d'une zone d'influence de manière plus élaborée a pu être présentée en chapitre 4 (cf. §4.1.8).

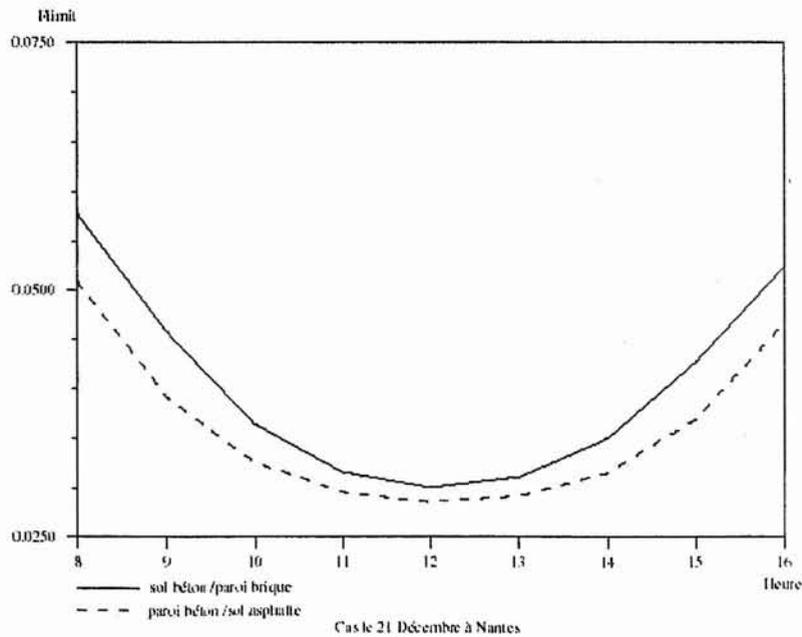


Figure 5.6 Variation diurne du facteur de forme limite le 21 décembre à Nantes.

$$\Delta T_{rd\_seuil}=0.1^{\circ}\text{C}.$$

Nous pouvons remarquer que les valeurs des facteurs de forme limites sont extrêmement faibles pour des influences thermiques égales à  $0.1^{\circ}\text{C}$ .

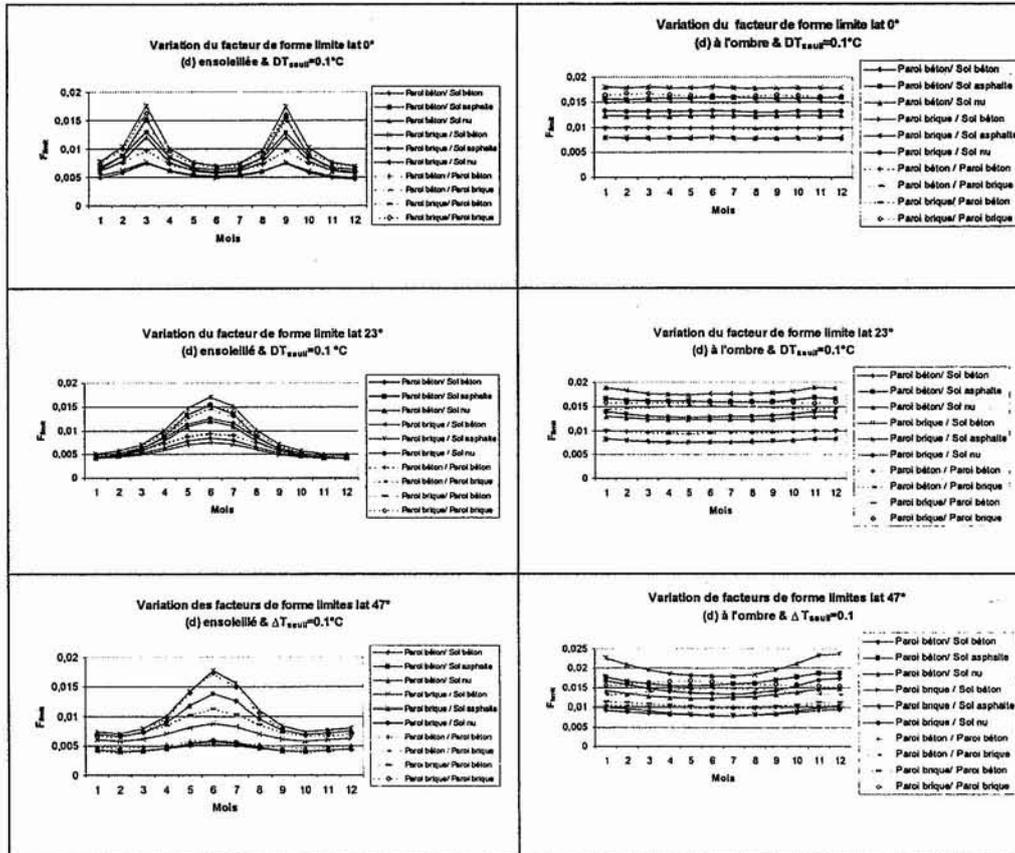


Tableau 5.11 Variation des facteurs de forme limite pour les latitudes  $0^{\circ}$ ,  $23^{\circ}$  et  $47^{\circ}$  Nord, le midi du 21 du mois.  $\Delta T_{rd\_seuil}=0.1^{\circ}\text{C}$ .

La valeur du facteur de forme limite d'une surface influente ensoleillée (située en latitude  $47^{\circ}$ ) est généralement comprise entre 0.04 et 0.018. Pour deux surfaces normales, cela désigne une influence supérieure à  $0.1^{\circ}\text{C}$  pour les deux premières faces frontales ou latérales (cf. tableau 5.13. Cas 1 et 2). Alors qu'entre deux faces parallèles, ce n'est qu'à partir d'un éloignement de quatre fois le côté de la surface de référence, que l'influence devient inférieure à  $0.1^{\circ}\text{C}$ .

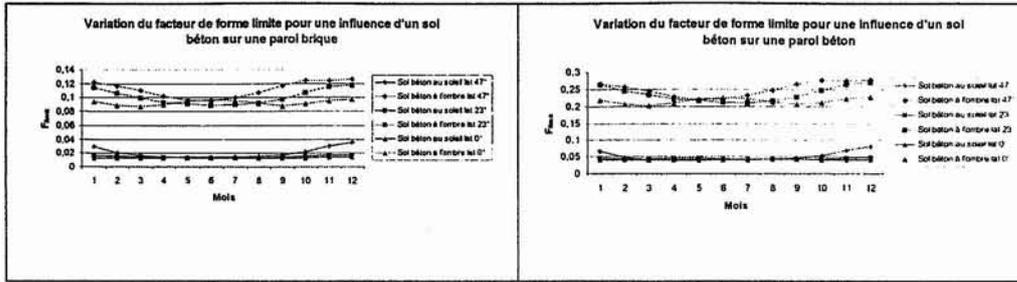


Tableau 5.12 Variation des facteurs de forme limites propres aux conditions d'influence entre sol béton et paroi brique et sol béton paroi béton.

Nous pouvons retenir que les influences décroissent très rapidement avec la distance. Malgré les variations journalières des facteurs de forme limites, les influences radiatives thermiques s'effectuent toujours de manière significative avec les surfaces les plus proches. Une variation journalière importante en terme de valeur de facteur de forme induit des différences très peu significatives en terme de zone spatiale d'influence.

Donnons l'exemple de la variation journalière du facteur de forme limite, exprimant l'influence d'une paroi béton sur un sol asphalté (cf. fig. 5.5). Le facteur de forme limite varie entre 0.03 et 0.05 pour une influence de 0.1°C. Ceci induit une zone d'influence très restreinte comportant seulement, les deux faces frontales (cf tableau 5.13, cas 1).

Nous pouvons remarquer par les deux digrammes ci-dessus (cf. tableau 5.12) que suivant les conditions climatiques propres à chaque latitude le couple d'influence *sol béton / paroi brique* conserve les mêmes ordres des valeurs de facteur de forme limite, le midi, durant toute l'année. Les surfaces ensoleillés accusent des valeurs plus faibles. Cela implique qu'ils ont une zone d'impact thermique plus importante.

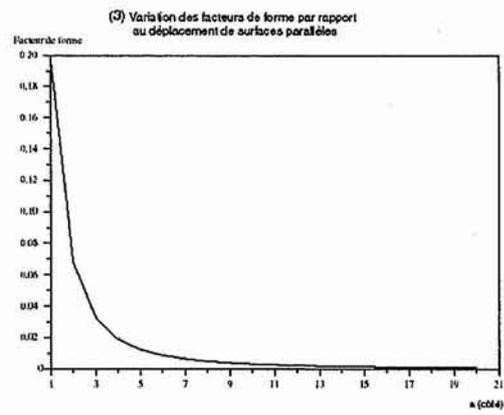
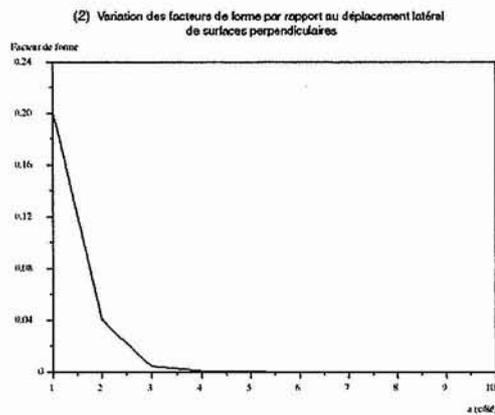
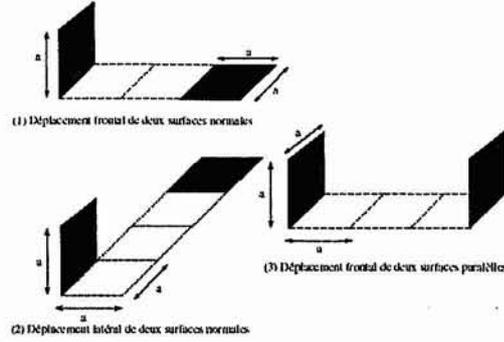
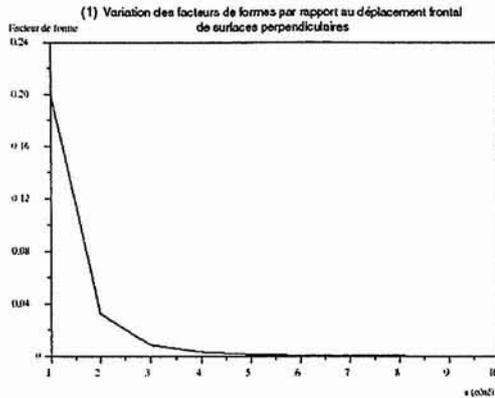


Tableau 5.13 Variation des facteurs de forme entre deux surfaces normales et parallèles.

### 5.2.1.2 Les influences par obstruction

#### **Obstruction du ciel**

Nous tenterons, dans cette partie, d'analyser le degré d'influence du ciel par rapport à la surface ( $d$ ). L'influence céleste se distingue par deux grandes sources ; le solaire et l'infrarouge. L'importance de cette étude ne résidera pas dans l'extraction de résultat précis, mais dans la compréhension d'un certain nombre de rapports d'influence qui nous seront nécessaires dans des éventuelles analyses plus complexes.

Rappelons que cette analyse considère les apports célestes, en visible et en infrarouge, uniformes par les expressions de P. de Brichambaut (1975) et d'Unsworth et Monteith (1975). Il s'agira de prendre un certain nombre de précautions en terme d'interprétation surtout pour l'influence en bandes solaires dans les conditions de ciel clair. En effet, les intensités de flux solaires diffusés sont bien plus importantes au voisinage du soleil que sur le reste de la voûte céleste. Notons également que l'estimation des flux infrarouges célestes dépendent de la température de l'air. Il faudra considérer son caractère variable selon les saisons et le site.

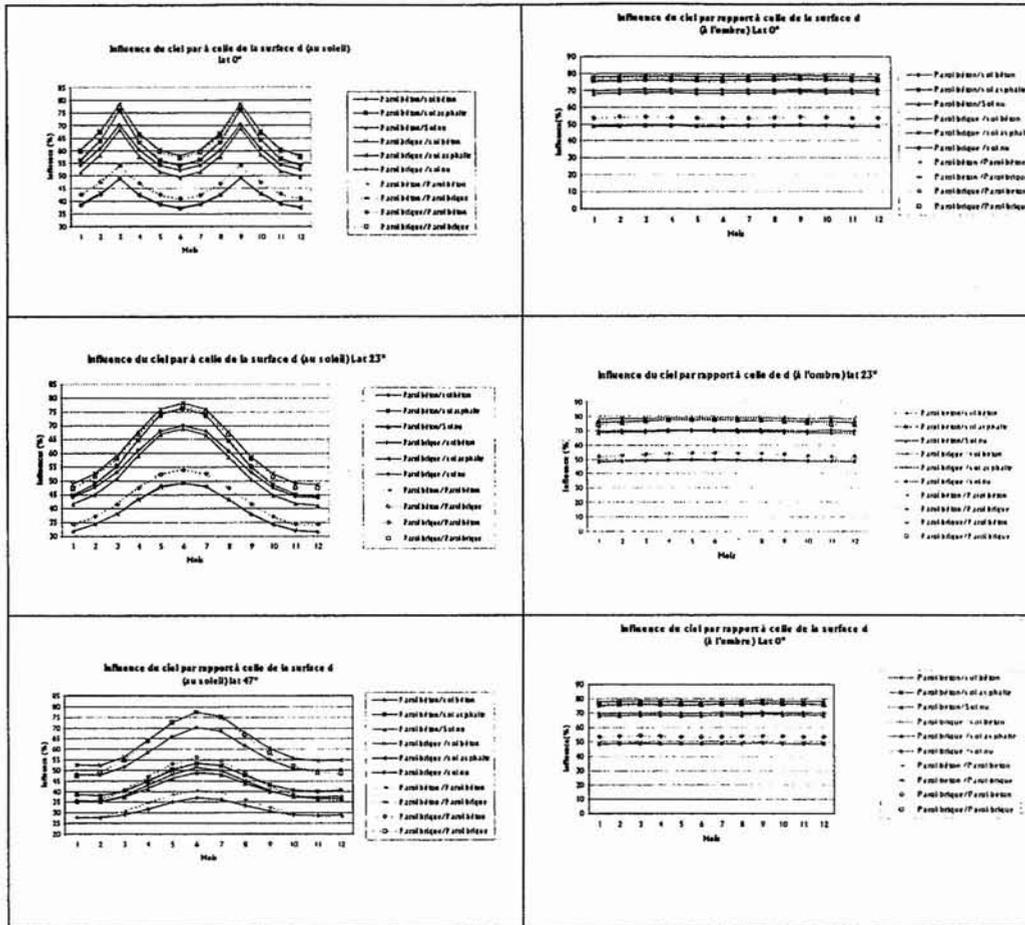


Tableau 5.14 Influence radiative thermique du ciel par rapport à celle des surface (%) :  
(d) ensoleillées et à l'ombre

Les graphes ci-dessus (cf. tableau 5.14) expriment le rapport entre les pertes thermiques de ( $r$ ), dues à l'obstruction du ciel par la surface ( $d$ ), et les gains dus à la présence de cette dernière. Ce rapport est exprimé en pourcentage. Notons l'absence des influences du sol qui ne peuvent masquer le ciel aux autres surfaces.

Nous pouvons observer que la différence entre les gains et les pertes thermiques est positive. En effet, les pertes dues à l'obstruction du ciel sont plus faibles que les apports de ( $d$ ), cela quelle que soit la situation de ( $d$ ) par rapport à ( $r$ ), ainsi que leurs positions en latitude. Rappelons que dans nos cas simplifiés, ( $d$ ) est dans deux situations extrêmes d'exposition, elle est orientée sud ou nord. C'est seulement dans les cas où ( $d$ ) est à l'ombre, que l'influence du ciel sur la température de ( $r$ ) peut rivaliser avec celle de ( $d$ ).

Nous avons pu isoler les apports du ciel selon les différences de longueurs d'onde (solaires et infrarouges). Les diagrammes ci-dessous (cf. tableau 5.15 & 5.16) tentent d'exprimer le rapport entre les pertes (par obstruction du ciel) et les gains (apports de ( $d$ )) dans la bande spectrale infrarouge thermique.

L'apport infrarouge du ciel varie, dans nos cas spécifiques, entre 30 et 70% par rapport à celui d'une surface. Rappelons que les températures dont sont tributaires les apports infrarouges du ciel (clair), sont spécifiques à des situations climatiques choisies par rapport aux différentes latitudes (0° Equateur, 23° Mexico et 47° Nantes) (cf. équation de Unsworth et al. 1975 §5.2).

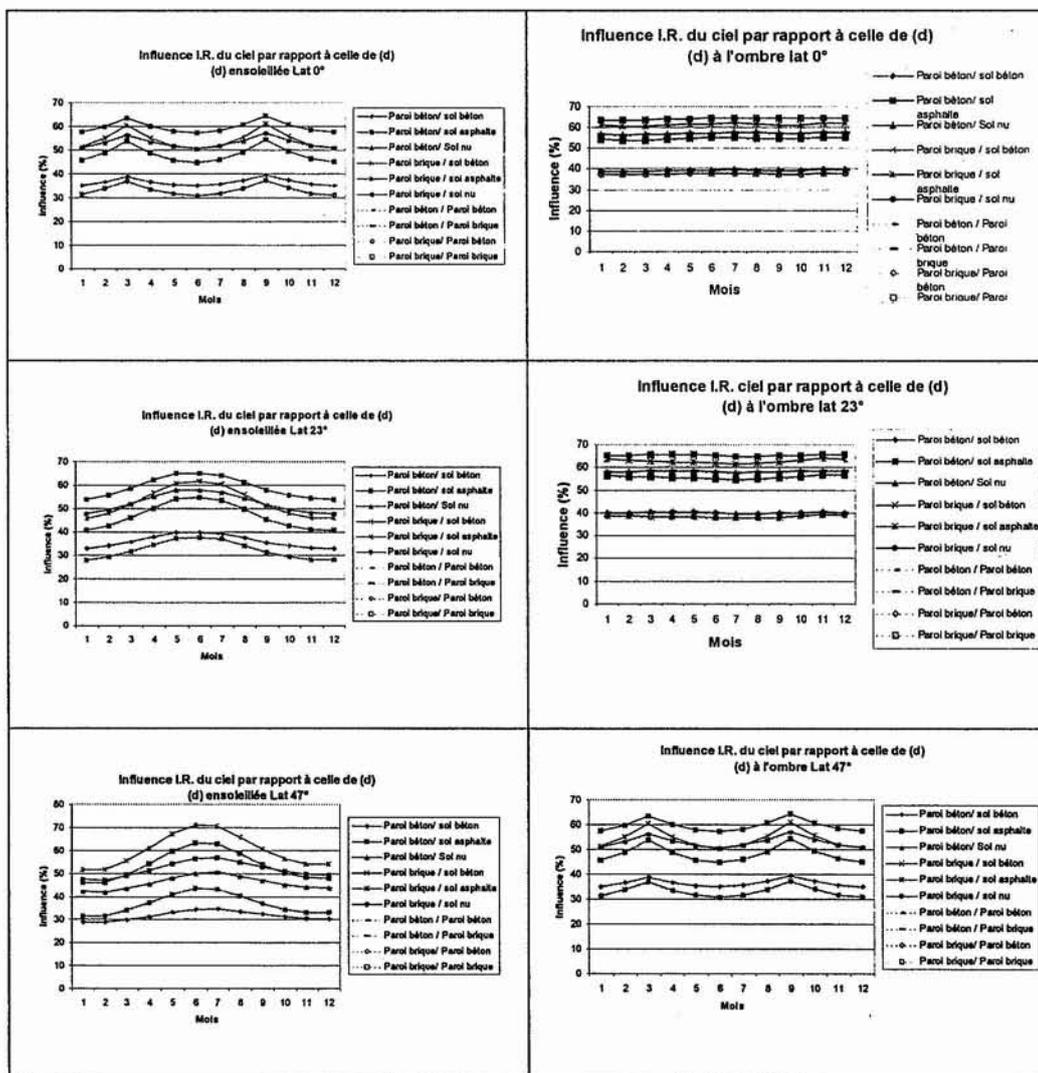


Tableau 5.15 Rapport d'influences (%) entre les pertes (dus à l'obstruction du ciel) et les gains de chaleur (dus à d).

Les pertes des énergies solaires diffuses par obstruction sont moins importantes que les apports solaires des surfaces ensoleillées. Quand ces dernières sont à l'ombre, elles ne peuvent plus rivaliser avec les apports diffus du ciel. Dans nos cas étudiés ici, l'influence thermique du ciel en solaire est de 2 à 5 fois supérieure à celle de (d) se trouvant à l'ombre. Les apports solaires de surface rivalisent avec les pertes en énergie diffuse seulement, quand (d) reçoit et réfléchit un flux solaire important notamment direct.

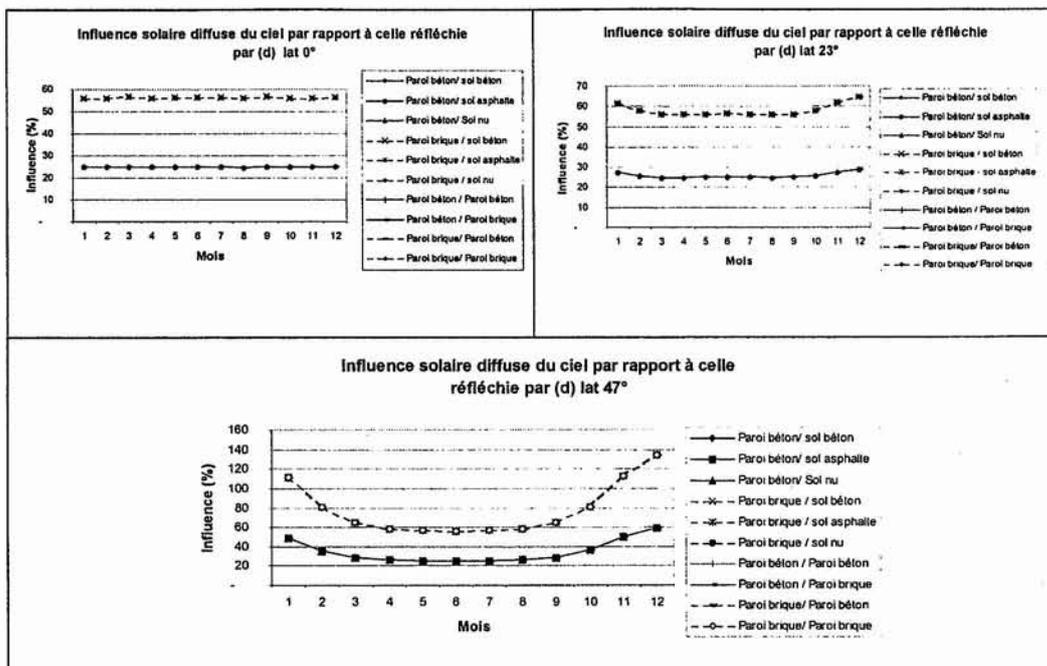


Tableau 5.16 Rapport entre influence diffuse du ciel masqué avec celle de la surface ( $d$ ) soumise au rayonnement solaire direct.

Le rapport entre diffus solaires et flux infrarouges du ciel le midi, ne dépasse pas dans nos cas, le facteur de 0.3. En effet, le ciel intervient sur la température de son environnement, davantage par ces émissions infrarouges. Cependant, la perte en terme de flux infrarouge du ciel est largement compensée par l'émission infrarouge des surfaces, spécifiquement quand ces dernières sont ensoleillées.

Nous pouvons conclure que l'influence de surface dans tous les cas observés reste toujours plus importante que celle du ciel. L'obstruction du ciel induit le remplacement d'un environnement (ciel) par un autre (surface), ayant des conditions d'influence radiatives thermiques plus importantes.

Notons cependant que ces analyses ont été effectuées pour des conditions de ciel clair. Les influences thermiques du ciel nuageux sont d'autant plus importantes quand les couvertures nuageuses sont basses. L'influence solaire dépendra de la qualité de transparence ou d'opacité de cette couverture nuageuse. Ces conditions n'ont pas été analysées mais doivent être considérées dans la détermination des effets d'impact.

Les intensités de flux infrarouges du ciel dépendent de la température de l'air. Ici nous pouvons comparer les différences entre flux I.R. du ciel et solaire diffus calculés pour une température moyenne le midi du 21 de chaque mois. Le flux infrarouge reste plus important que le diffus.

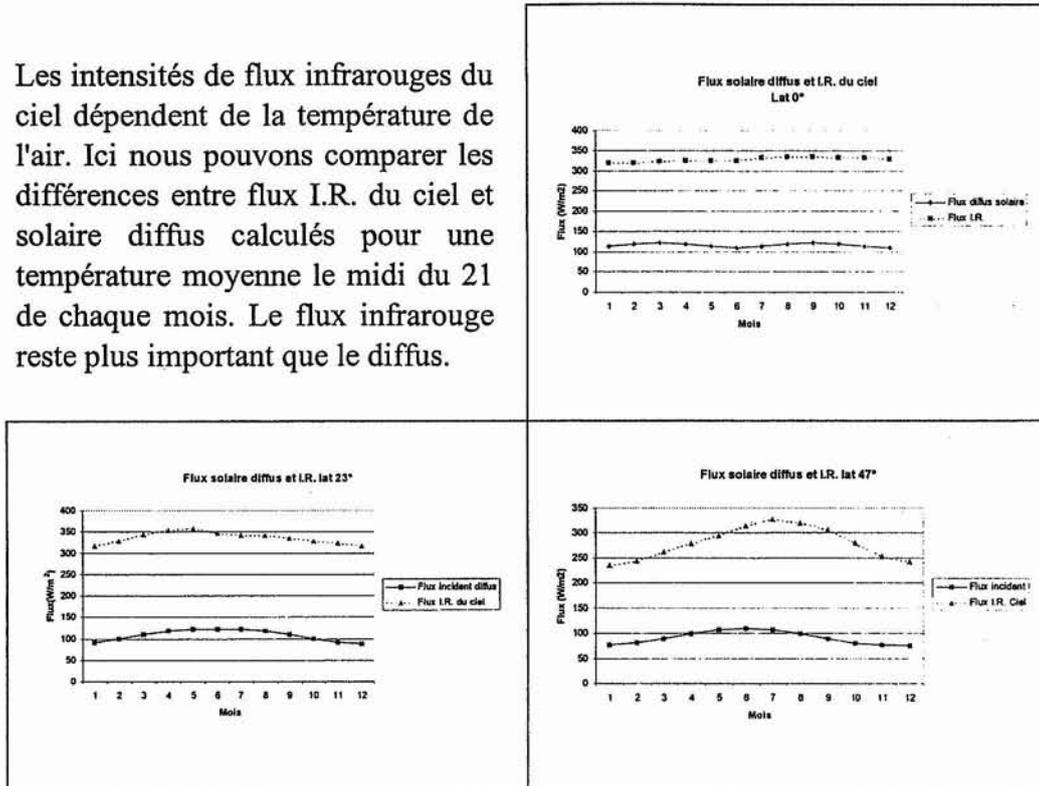


Tableau 5.17 Flux diffus solaires et infrarouges incidents sur une surface horizontale.

### **Obstruction du soleil**

L'échelle d'influence de l'obstruction solaire est plus importante que les précédentes (surface, ciel). Le soleil est la source primaire de réchauffement de surface. Son obstruction induit des chutes de températures de surface plus importantes par rapport à celles précédentes.

Les discontinuités observées dans les diagrammes ci-dessous (cf. tableau. 5.18) correspondent aux périodes d'équinoxe pour la latitude 0° et de solstice pour la latitude 23°. Le soleil accuse une hauteur de 90° et ne peut donc pas être masqué par une surface verticale.

Nous pouvons observer que pour la latitude 47°, l'influence thermique d'une surface ne dépasse pas 40% de celle du soleil.

Les cas extrêmes d'influence de ( $d$ ) par rapport au soleil correspondent aux situations où la surface masquée ( $r$ ) reçoit un apport solaire trop faible : angle d'incidence trop faible pour les paroi verticales quand le soleil est au zénith (lat. 23° et 0°). Dans ces cas les conditions solaires de surface peuvent être assimilées à celle se trouvant à l'ombre.

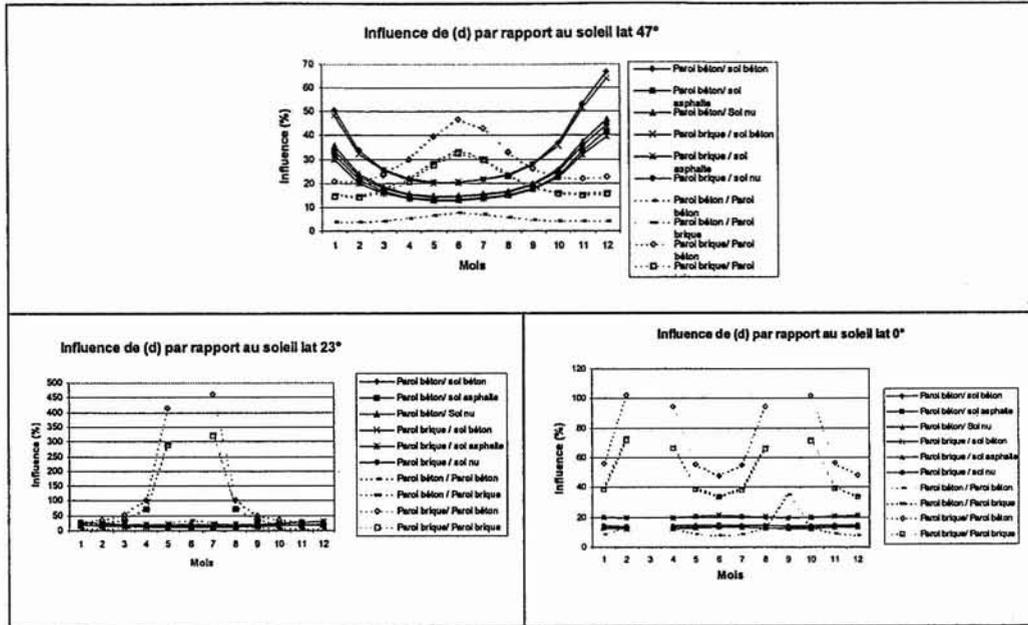


Tableau 5.18 Rapport entre influence de la surface ( $d$ ) étant ensoleillée et perte thermique par obstruction du soleil ( $F_{d,r}=0.2$ ).

Les influences sont néanmoins différentes selon les latitudes. En effet pour les basses latitudes, nous pouvons observer que les influences sont très importantes (la compensation de ( $d$ ) ne dépassant pas les 30%) contrairement à la latitude  $47^\circ$ . En effet, les flux incidents sur les parois verticales, dans les situations de latitudes nords, peuvent rivaliser avec ceux incidents sur un sol.

### Caractérisation des influences du sol

En remplaçant un type de revêtement asphalté par un autre en béton très réfléchissant, nous pouvons observer que les différences d'influence sont plus ou moins importantes selon la nature de la paroi influencée.

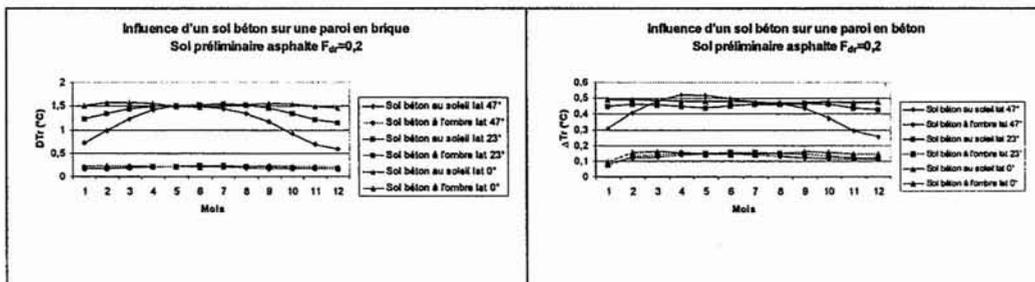


Tableau 5.19 Influence due à la variation des caractéristiques du matériau.

### Etude des bilans

Dans nos différents cas étudiés, hormis l'influence d'une surface horizontale sur une autre verticale, deux cas principaux peuvent être distingués :

- l'influence totale de ( $d$ ) qui n'opère qu'une obstruction par rapport au ciel,

- l'influence de (d) opérant une obstruction simultanée du ciel et du soleil.

Les influences ont été exprimées en température (°C).

*Influence de (d) obstruant le ciel*

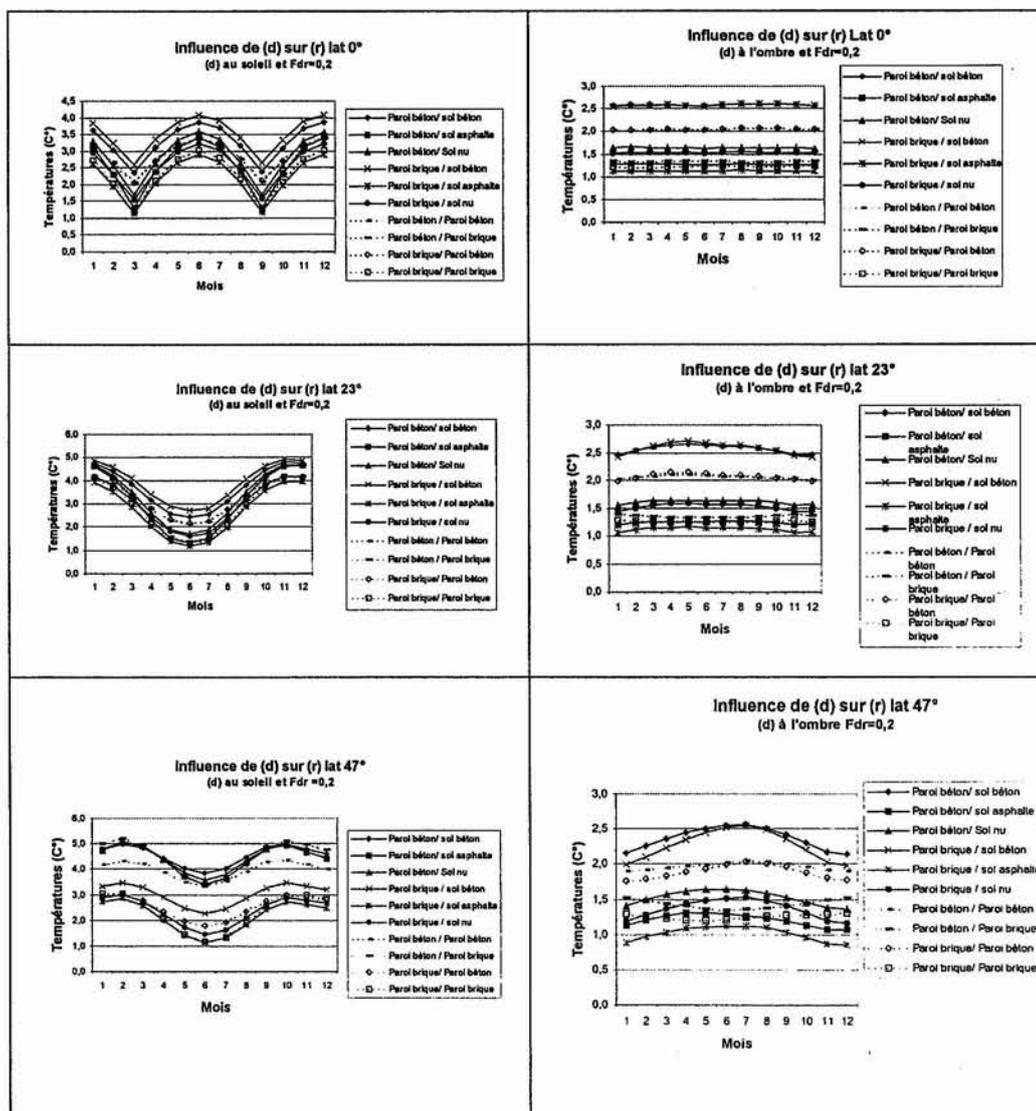


Tableau 5.20 Influence totale de (d) induisant une obstruction du ciel.

## L'influence de (d) obstruant le ciel et le soleil

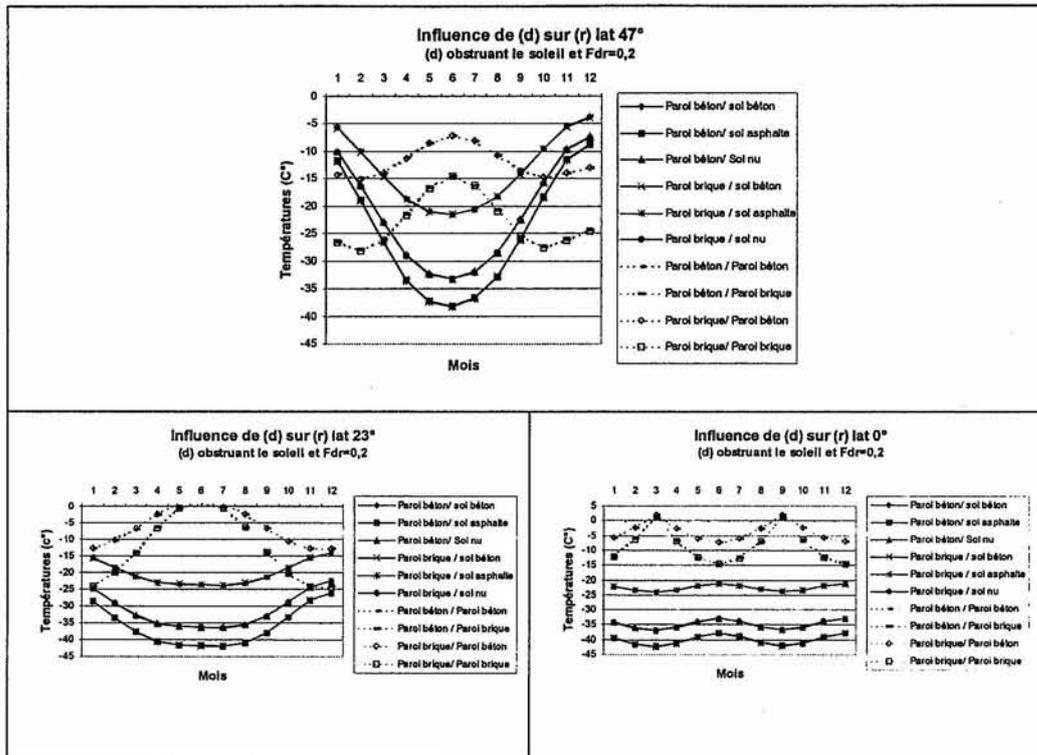


Tableau 5.21 Influence totale de (d) induisant une obstruction du ciel et du soleil.

La comparaison des deux situations rend compte du degré d'implication des masques solaires dans la caractérisation radiative du milieu urbain.

### 5.2.1.3 Coefficients

Lors des analyses précédentes, nous avons mis en relief les différents facteurs radiatifs principaux, influents sur les conditions de surfaces. Cependant, il est important d'aborder d'autres facteurs, qui ne jouent souvent pas un rôle secondaire par rapport aux influences radiatives thermiques entre surfaces.

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r\sigma\cdot 4\cdot T_m^3 + h_r + c)} + \frac{(\psi'_r - \psi_r)(L_r\downarrow + D_r\downarrow)}{(\varepsilon_r\sigma\cdot 4\cdot T_m^3 + h_r + c)} + \frac{(F'_{r,env} - F_{r,env})[\alpha_{env}(1-\alpha_r)\Phi_{env} + \varepsilon_{env}\sigma\cdot T_{env}^4]}{(\varepsilon_r\sigma\cdot 4\cdot T_m^3 + h_r + c)} + \frac{F_{r,u}[\alpha_u(1-\alpha_r)\Phi_u + \varepsilon_u\sigma\cdot T_u^4]}{(\varepsilon_r\sigma\cdot 4\cdot T_m^3 + h_r + c)}$$

Les différents facteurs intervenant sont :

- la conductance de la paroi, coefficient d'échange intérieur :

$$c = \frac{1}{\frac{x}{\lambda} + \frac{1}{h_{int}}} \quad (\text{W/m}^2\text{K})$$

- le coefficient de transfert convectif extérieur  $h_e$  ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )
- la température moyenne  $T_m$  définie comme température moyenne d'évolution de la surface (r) :  $T_m = (T_r + T'_r)/2$  qui sera également discuter au chapitre 6.

*Coefficient d'échange interne :*

Si on parle de matériaux urbains hors métal, la conductivité thermique varie entre 0.03(W/m.C) pour les isolants (matières plastiques alvéolaires) jusqu'à 3.5(W/m.K) pour la pierre.

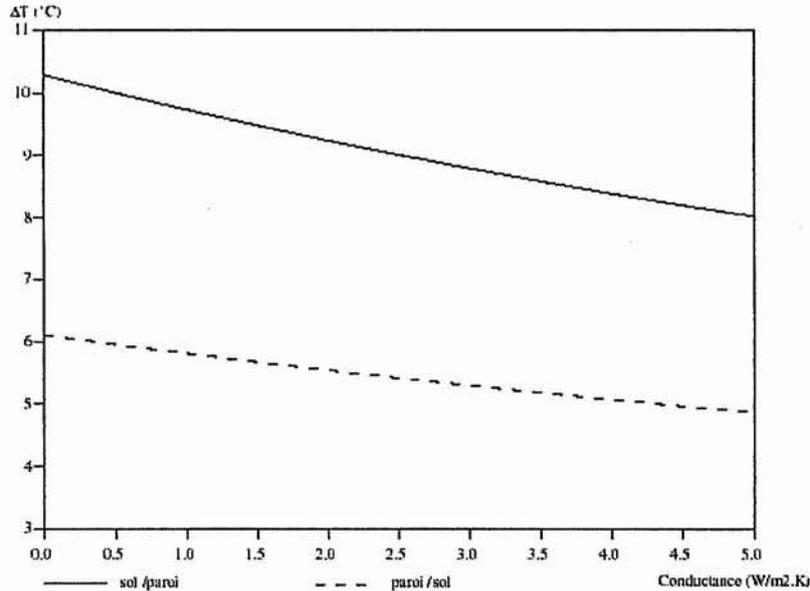


Figure 5.7 Variation des influences thermiques par rapport à la conductance de la paroi.  
Cas d'influence d'une paroi brique sur un sol à pavement en béton et inversement  
(lat.47°, le 21 juin à 12h)

Voici quelques ordres de grandeurs de conductivité en ( $W/m C$ ) de quelques matériaux (Mazria 1981) :

Pierre :	0.9- 3.5
Béton :	0.12-1.75
Enduits / Mortiers :	0.35-1.15
Fibres minérales :	0.05-0.23
Matières plastiques :	0.03-0.04
Verre :	1.15

Ceci induit un coefficient d'échange interne ( $c$ ) atteignant difficilement la valeur de 5 ( $W/m^2K$ ), sauf pour les métaux.

En effet, ces derniers sont utilisés principalement pour les bâtiments à vocation commerciale ou industrielle, et accusent des valeurs de conductivité thermique variant de 35-380  $W/mK$ .

La variation des coefficients d'échange interne, représentative de la variété matériaux urbain, induit des différences très peu significatifs en terme

d'influence. Il est cependant important de considérer la nature de ces estimations qui ont été effectuées en régime permanent.

Cependant, une étude effectuée par M.-J Antoine (1999) a démontré que les faibles conductivités thermiques induisent des différences négligeables de température de surfaces entre celles estimées en régime variable et permanent.

#### *Coefficient d'échange convectif externe*

Ce coefficient résulte des phénomènes de mouvement d'air, liés au vent et à la différences de températures entre la surface et l'air. Sa variation peut induire des conséquences non négligeable sur les influences. Plus le coefficient d'échange convectif est important, plus les influences radiatives thermiques sont faibles.

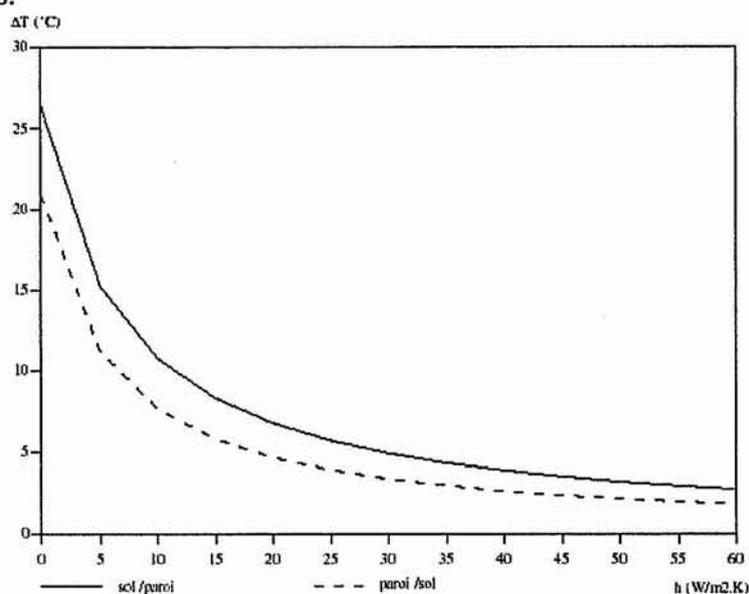


Figure 5.8 Variation des influences par rapport au coefficient de transfert convectif externe. Cas d'influence d'une paroi en brique sur un sol béton et inversement. (Lat. 47°, le 21 juin à 12h).

L'influence de la variation du coefficient d'échange convectif sur les impacts radiatifs thermiques est très importante, pour des valeurs de  $(he)$  faibles. Cette variation d'influence s'atténue très vite pour des conditions d'air de plus en plus turbulents.

#### *Température moyenne d'évolution de la surface ( $r$ )*

La température moyenne  $T_m$  en réalité n'est pas un coefficient, mais elle est introduite en tant que tel dans le modèle. Cela permet de réduire les procédures de calculs, dont la lourdeur est proportionnelle au nombre de faces à traiter.

Les erreurs d'estimation de  $T_m$  occasionnent des différences d'estimation des influences qui sont proportionnelles aux impacts. Plus l'impact thermique

d'une influence est important (ex. obstruction du soleil), plus il est important de définir  $T_m$  de manière précise (cf. fig.5.9). C'est pour cette raison, que nous estimons dans notre modélisation numérique des influences,  $T_m$  de manière différente suivant le type d'influence à déterminer. Dans le cas d'une obstruction solaire ce paramètre est défini comme température de surface moyenne entre les surfaces ensoleillées et celles à l'ombre. Ceci sera abordé de manière plus critique dans le chapitre 6 relatif à la discussion.

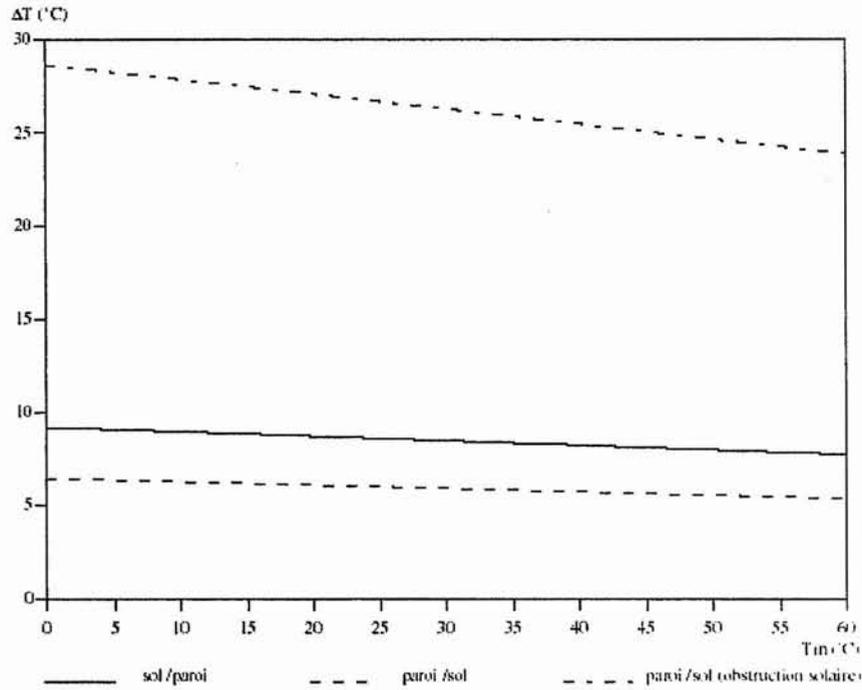


Figure 5.9 Variation des différences de températures par rapport aux températures moyennes d'évolution de ( $r$ ). Cas d'influence d'un paroi brique sur un sol béton et inversement. (Lat. 47°, le 21 juin à 12h). Les deux premiers cas considérant l'influence de la surface par ces réflexions en solaire et leur émission en IR. Le dernier cas prend seulement en considération l'obstruction du soleil.

### 5.3 Interprétation formelle des influences radiatives thermiques

L'étude du degré de transformation de la ville des conditions thermiques se caractérise par la définition de la situation de référence, en général celle de la rase campagne. Les études d'impacts radiatifs réalisées jusqu'à présent ont été définies pour une situation de référence où la surface fait face au sol et au ciel. Les transformations subites dépendront du degré d'impact des autres faces par rapport à sa situation de référence. Ce degré d'impact se résume dans les

différences existantes entre les contributions de ces faces par rapport aux pertes qu'elles ont pu occasionner. Ce rapport est lié à la situation de la face par rapport à son ancien et nouvel environnement, et des différences radiatives thermiques existantes entre l'environnement de référence et l'environnement urbain.

### 5.3.1 Les contributions

Suivant la situation d'une face et les conditions thermiques de l'environnement les influences peuvent varier.

Une face verticale subit de façon égale en terme de facteur d'influence ou facteur de forme l'effet du ciel et du sol, quelle que soit sa situation en hauteur. Ainsi, l'influence totale en terme de température par rapport aux deux cas de situation (élevée et basse) sont identiques (fig. 5.10 Cas 1). Ceci n'est vrai seulement quand les conditions radiatives thermiques du sol sont uniformes.

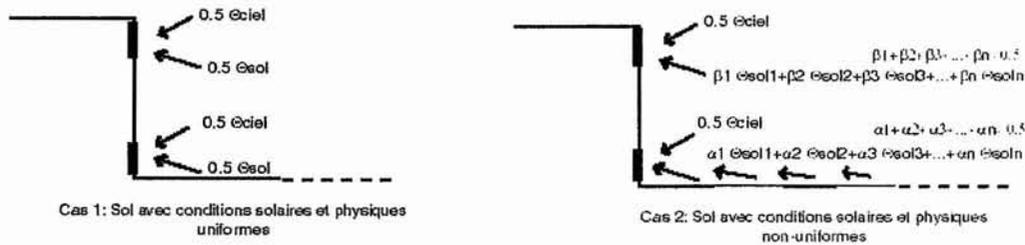


Figure 5.10 Différences de contribution thermique d'un sol présentant des conditions radiatives et thermiques homogène et variable.

Plus haut (§3.1.4.2), la non-uniformité des facteurs de forme entre deux faces perpendiculaires et parallèles, a été démontrée. L'optimum des échanges pour deux faces perpendiculaires s'effectue avec la face située à un angle de  $60^\circ$  (cf. fig.6.3).

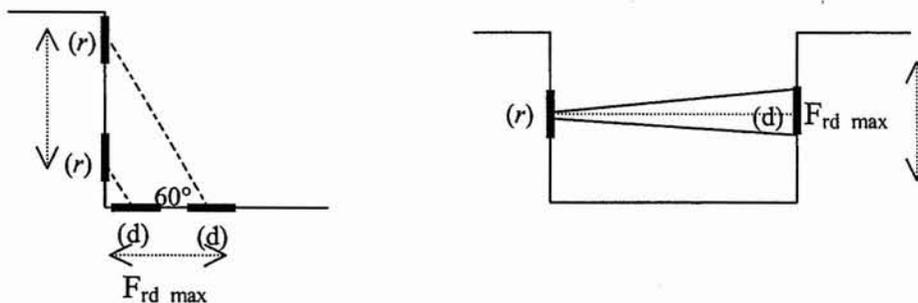


Figure 5.11 Les dispositions de faces induisant des échanges radiatives maximales.

Plus en s'éloigne de cette valeur maximale plus les échanges s'affaiblissent.

Ou encore, plus la face ( $r$ ) s'éloigne du sol, plus la face ( $d$ ) avec laquelle l'échange ( $rd$ ) est maximum s'éloigne. Les contributions du sol à la température de ( $r$ ) peuvent être différentes pour une paroi faisant face à un sol présentant des conditions thermiques non uniformes. Les différences des contributions sont d'autant plus importantes pour des conditions thermiques du sol contrastées, exemple : entre partie du sol à l'ombre et exposée au rayonnement solaire directe.

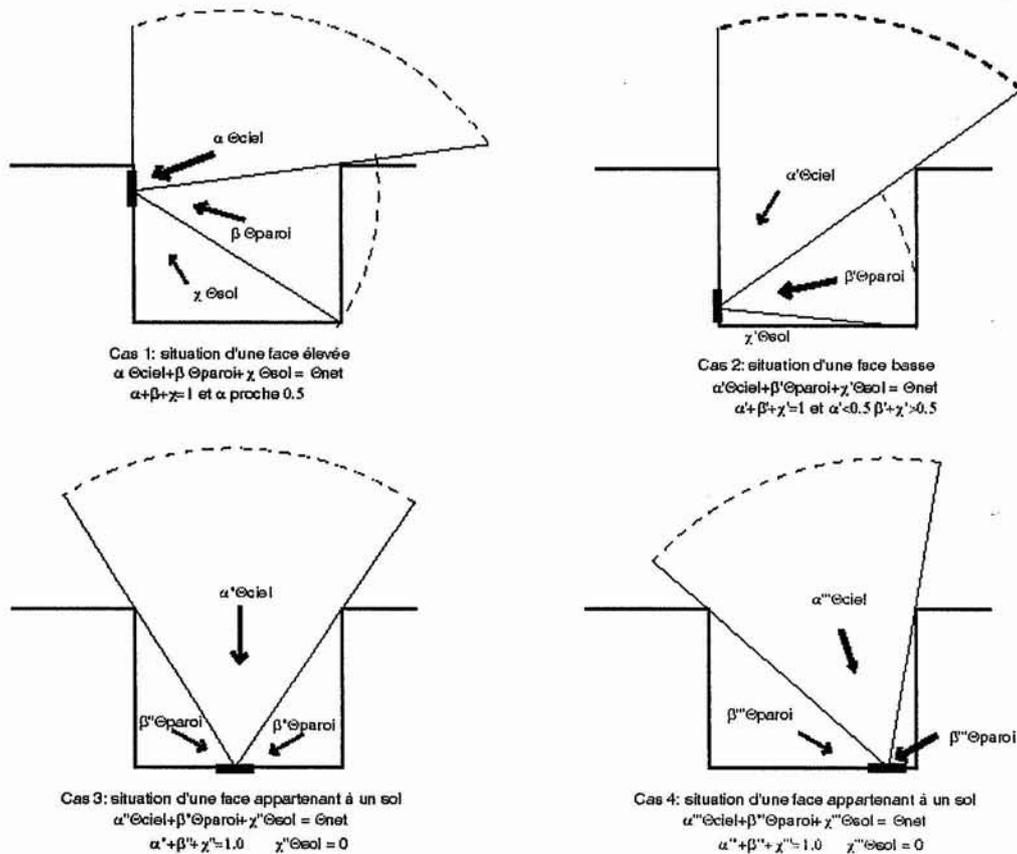


Figure 5.12 Facteur d'influence (ou Parties vues) suivant la situation de la face analysée dans un cas de rue.

Pour des géométries plus complexes, les contributions ont trois sources principales : le ciel, le sol et les parois. Suivant la situation de la face par rapport à ces trois environnements le facteur d'échange (facteur de forme) est différent.

Une face élevée (cf. fig. 5.12 cas1) subit davantage l'influence du ciel que celle du sol et des parois. Le phénomène inverse est observé pour une situation de face verticale proche du sol (cf. fig. 5.12 cas2).

La même remarque peut être appliquée pour une face appartenant à un sol. Cette dernière, quand elle est proche des parois, subit plus leur influence que celle du ciel (cf. fig. 5.12, cas3). Et quand elle s'en éloigne, elle a tendance à

plus échanger avec le ciel par rapport à la situation précédente (cf. fig. 5.12, cas 4).

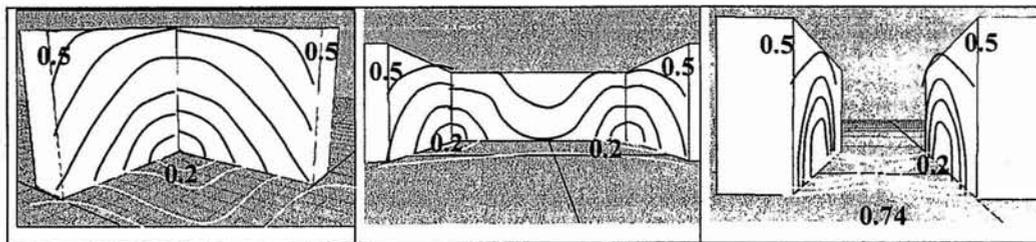


Tableau 5.22 Variation des facteurs de vue du ciel de trois configurations urbaines types

Mais pour le moment, nous n'analysons dans les influences, que les facteurs de forme. Le degré d'influence intègre également la qualité thermique de l'environnement influent. Afin d'illustrer ce dernier point, des analyses ont été effectuées sur trois configurations simples (U, L et rue) sur les influences radiatives thermiques. Les figures représentent le schéma de répartition des valeurs dont les lignes fléchées continues (→) définissent le sens d'augmentation des influences ou des quantités. Les lignes fléchées discontinues (—→) témoigne des contrastes existant entre grandeurs.

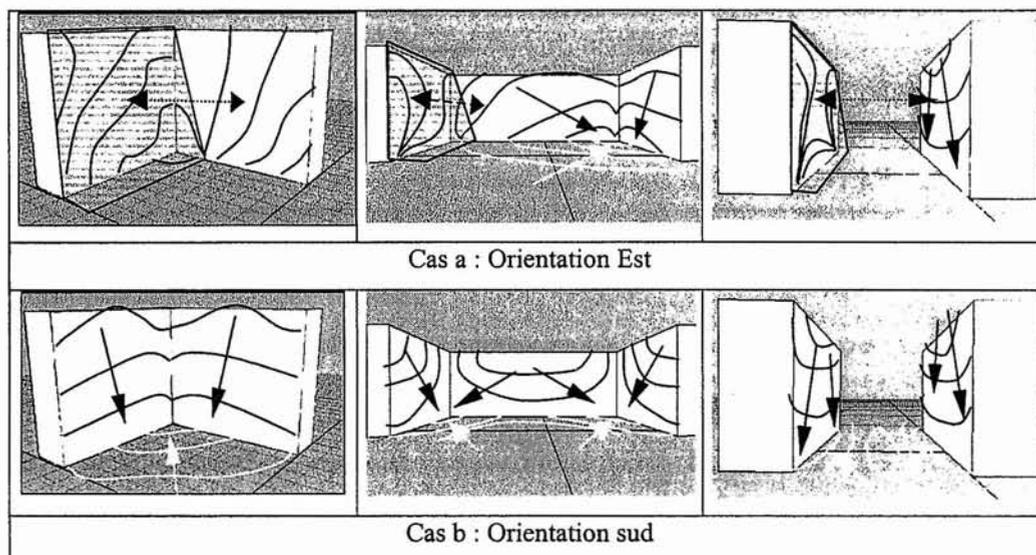


Tableau 5.23 Schémas de répartition des quantités d'énergies solaires incidentes sur trois configurations types orientées Est et Sud

Le facteur de forme entre une paroi et une autre peut être plus faible que son facteur de vue du ciel. Cependant, la face peut être influencée en terme de température plus par les parois que par le ciel. Ce dernier peut être considéré comme environnement froid (cf. §5.2.3.1). La situation devient plus complexe

quand il s'agit de définir les degrés d'influence. En effet il est possible d'observer dans les cas types présentés que le schéma de répartition des apports (cf. tableau 5.24) n'obéit pas à celui des facteurs de vue du ciel (cf. tableau 5.22), quand les zones de rayonnements incidents (tableau 5.23) sont contrastés (Cas a : faces ombrées et ensoleillées).

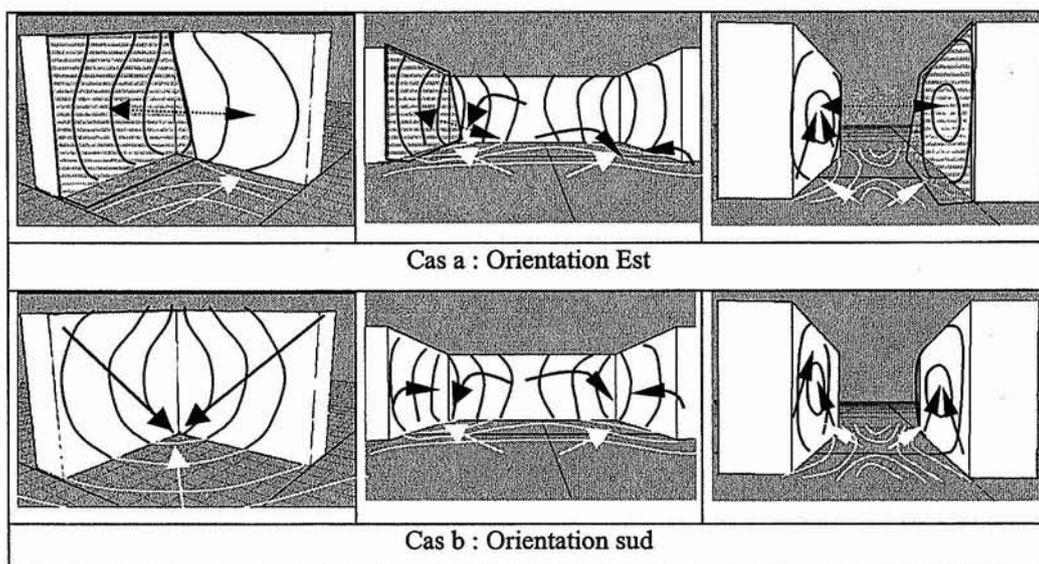


Tableau 5.24 Schéma de répartition des apports thermiques analysés sur trois configurations types orientées Est et Sud

### 5.3.2 Les pertes par obstruction

Les obstructions sont liées au potentiel des surfaces à masquer le sol et le ciel par rapport à une surface de référence. Suivant la configuration géométrique du lieu et la situation de la face étudiée cette dernière peut subir des influences différentes.

Il est important de noter que les faces les plus élevées sont plus influencées par l'obstruction du sol que par celle du ciel (cf. fig. 5.13). Le phénomène inverse est observé pour les faces proches du sol.

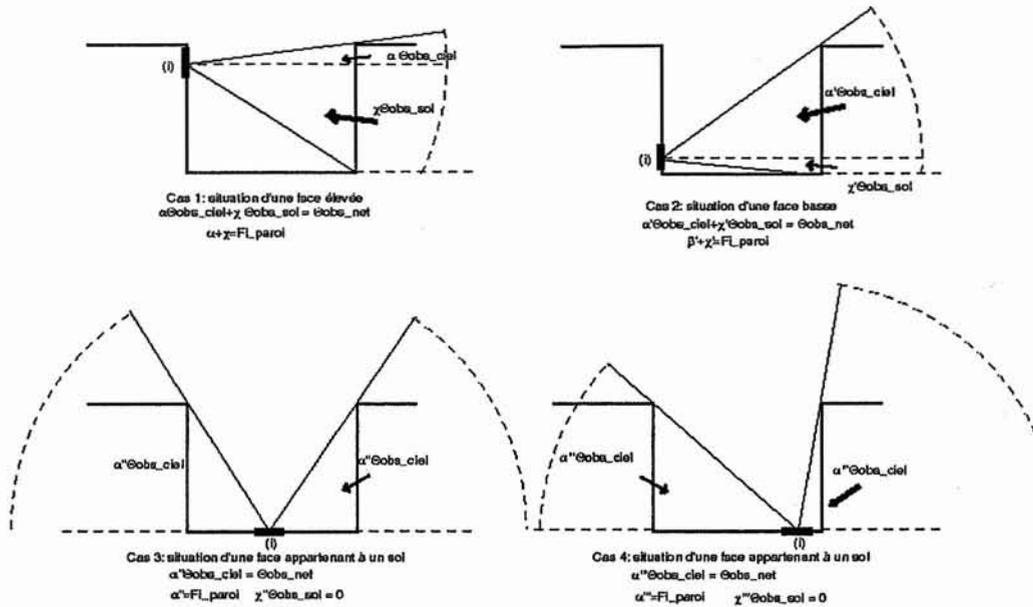


Figure 5.13 Variation du degré d'obstruction de l'environnement suivant la situation de (r) analysée dans une configuration type rue.

Si nous comparons les deux situations (fig. 5.13 : cas 1 et cas 2), nous pouvons observer que la surface la plus haute subit plus de pertes thermiques par rapport à celle la plus basse. L'obstruction du sol est également plus déterminante thermiquement que l'obstruction du ciel quand cette dernière ne met pas en jeux l'obstruction des rayonnements solaires directs. Les conditions thermiques d'un sol dégagé sont plus importantes que celles du ciel, particulièrement en émission infrarouge. La surface haute perd une plus grande partie vue du sol, que la surface peu élevée.

La surface appartenant à un sol, ne peut subir de pertes, que par l'obstruction du ciel qu'induiraient les surfaces environnantes. Notons cependant, que la partie masquée est remplacée par des conditions radiatives et thermiques de paroi qui sont plus importantes que celles du ciel. Les degrés d'influences sont importants quand les différences de conditions entre l'environnement de référence (ici le ciel) et l'environnement substituant sont importantes. Cela s'observe dans les bilans généraux et les rapports entre les pertes et les contributions.

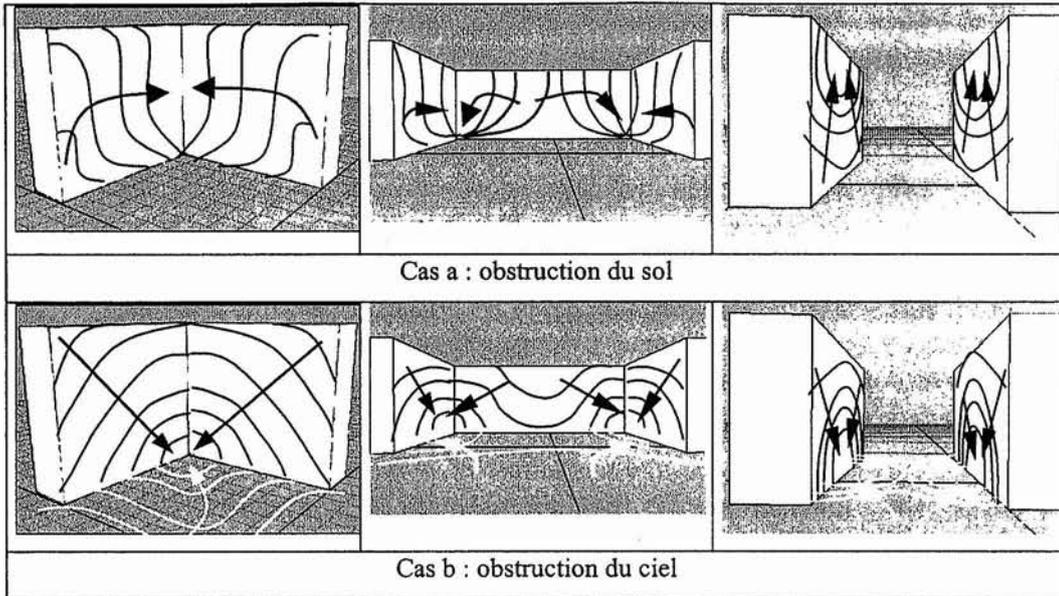


Tableau 5.25 Variation des influences par obstruction analysée sur trois configurations types.

Nous avons pu observer que suivant la position de la surface dans l'espace, celle-ci subit des influences radiatives thermiques différentes. Ces influences se distinguent de par leur nature : apports ou pertes par obstruction et le type d'environnement influent. Pour les surfaces les plus élevées, il est possible de conclure que ces dernières sont très sensibles aux influences par obstruction du sol alors que les moins élevées ou les proches des parois sont plus influençables par les pertes par obstruction du ciel et par les apports.

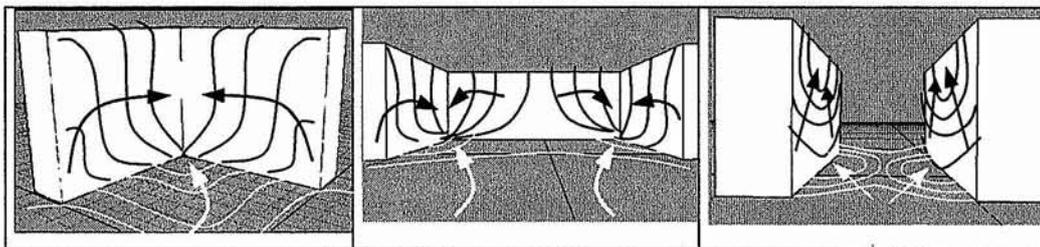


Tableau 5.26 Variation du bilan des obstructions (ciel + sol) analysés sur trois configurations types

### 5.3.3 Caractérisation radiative thermique de l'espace urbain

Après avoir parcourue les différents facteurs intervenant dans la définitions des impacts radiatifs thermiques, la question qui reste posée est : Serait-il possible de définir des figures d'influences caractéristiques d'un espace urbain ?

Les figures d'influences désignent une forme d'interaction radiative thermique spécifique à une situation donnée. Leur connaissance impliquerait la possibilité de reconnaître les zones les plus sensibles du point de vue des impacts radiatifs thermiques par la seule observation de l'espace urbain et de son exposition. Ceci découle en premier lieu, par la reconnaissance typologique de la forme de l'espace, et en deuxième lieu du type d'interaction radiative qu'elle peut induire.

L'organisation formelle de l'espace peut être aussi bien régulière qu'irrégulière. Il est cependant possible de distinguer des cas d'organisation qui restent récurrents, tels que les espaces publics qui ont une forme spécifique caractéristique de leur type, exemple : la rue, la place, etc. Ces espaces ont l'avantage d'avoir les mêmes principes généraux d'organisation et cela quel que soit le lieu. Ces principes n'empêchent pas la diversité formelle de ces espaces urbains (cf. tableau 5.28 & 5.29). L'analyse des impacts radiatifs thermiques de ces cas particuliers, permettrait de cerner les influences généralement rencontrées dans ces espaces.

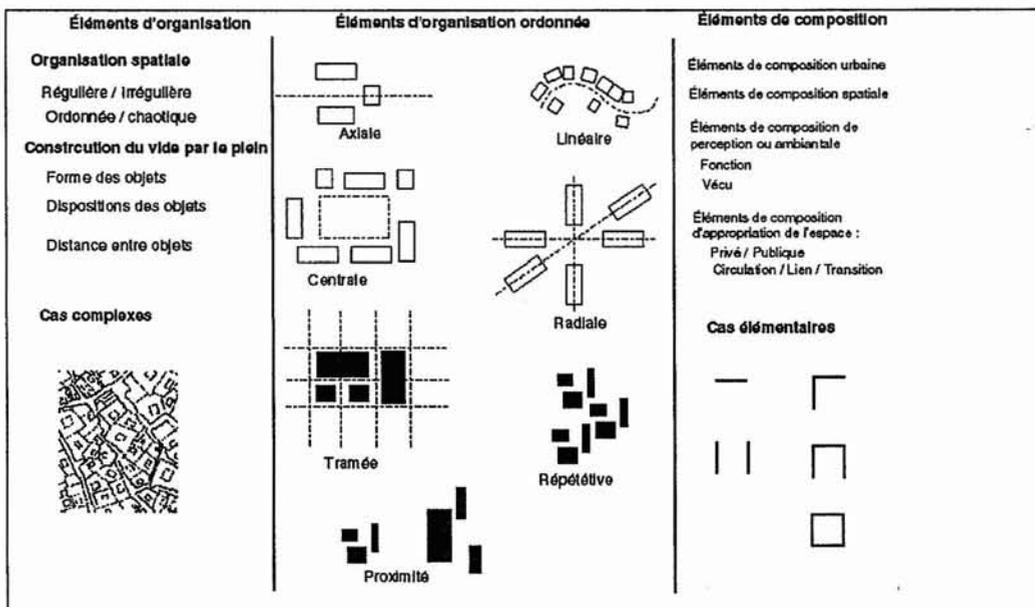


Tableau 5.27 Caractéristiques formelles des formes urbaines.

Les espaces urbains privés sont plus difficilement cernables du point de vue configurationnelle. Ce type d'espace est souvent défini comme espace résiduel de la parcelle.

La question de la caractérisation spécifique d'un type d'espace urbain pose le problème de la typologie radiative. Les interrogations morphologiques relatives au type ont été cependant posées par les morphologues italiens, et de manière générale par les morphologues urbains. Les réponses restent en suspens et cela à cause de la difficulté de généralisation du processus typologique sur tous les cas urbains. La typologie réside effectivement dans le fait de la récurrence des éléments distinctifs d'un espace urbain. La récurrence des caractéristiques

thermiques doit être posée parallèlement à la récurrence formelle, afin de cerner la spécificité radiative thermique de configuration urbaine dite type.

Une typologie formelle radiative thermique est réalisable seulement par l'analyse d'interactions physiques thermiques des surfaces urbaines. Les indicateurs physiques permettront de mesurer la récurrence des impacts radiatifs thermiques et cela sur des formes urbaines diverses.

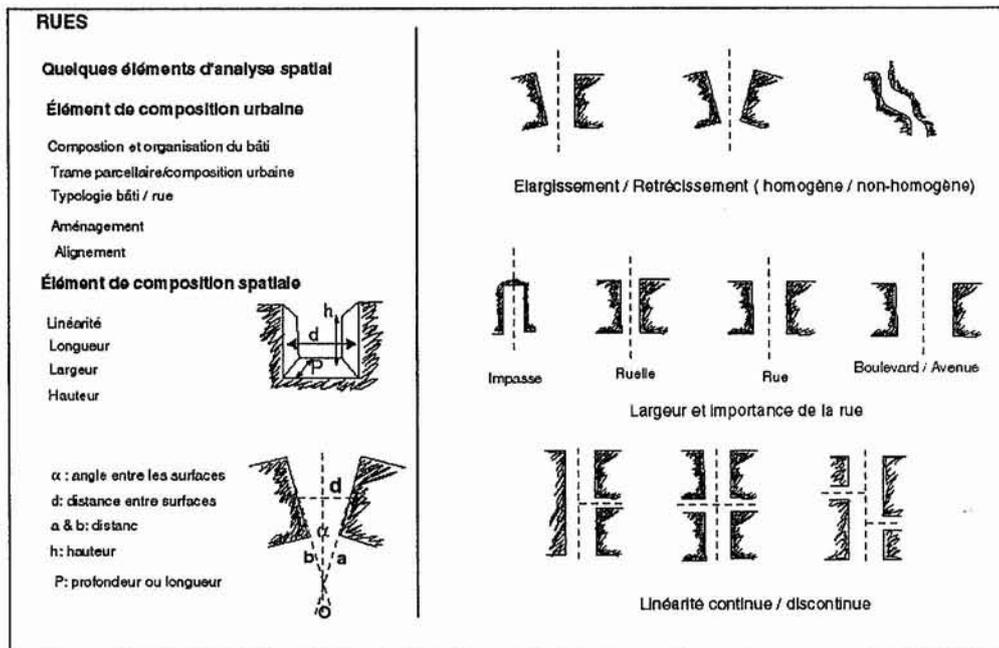


Tableau 5.28 Caractéristiques formelles de la rue

Cependant, avant de pouvoir affirmer l'existence d'une typologie urbaine climatique, des études radiatives thermiques doivent être effectuées sur des espaces urbains pertinents et diversifiées. La diversification ne réside pas seulement dans l'organisation générale de la forme de l'espace, mais également dans les caractéristiques physiques de l'environnement. En dehors, de la spécification formelle, il faudra tenir compte également de la spécificité climatique locale qui est lié aux facteurs météorologiques et solaires.

Nous avons pu définir à partir des analyses théoriques réalisées précédemment que les énergies solaires incidentes sont les facteurs les plus déterminants des impacts. En effet le rapport de surface entre les zones d'ombres et au soleil, définissent le rapport entre les surface influentes et influencées. Ceci peut nous amener à effectuer une première sélection des formes urbaines suivants les caractéristiques solaires définies en §5.1.1.1.: la latitude, l'accessibilité solaire, l'orientation des faces, etc. L'étroitesse du lieu ou son degré d'ouverture définit l'intensité des échanges. Cependant ce facteur s'oppose au premier, en effet *l'accessibilité solaire* est importante pour les *espaces ouverts*. Il est intéressant d'observer à travers des cas d'ouverture spatiale différentes les frontières des

impacts radiatifs thermiques entre l'accessibilité solaire et échange radiatifs. Il doit exister une situation optimum qui concilierait ces deux aspects. En s'éloignant de cette situation spatiale et solaire, les impacts deviennent moins importants avec l'ouverture ou la fermeture de l'espace. Par ouverture nous entendons, évidemment l'éloignement des bâtiments en rapport avec leur hauteur. Les matériaux, jouent un rôle secondaire, par rapport aux facteurs décrits ci-dessus. Cependant, il sera également intéressant d'observer différents cas d'aménagement présentant des caractéristiques physiques des matériaux contrastées. Le métal et le verre, jouent un rôle plus important dans la caractérisation des impacts. Toutefois, les outils actuels utilisés ne permettent pas de les modéliser.

Nous posons ici les questions relatives à la caractérisation des espaces urbains du point de vue des impacts radiatifs, c'est-à-dire par le potentiel des formes urbaines à transformer les conditions thermiques urbaines. Les différentes conditions climatiques autres que radiatives sont à considérer également, si l'objectif recherché réside dans la définition de typologie urbaine climatique. En effet, nous avons pu remarquer que les facteurs climatiques agissent de manière interdépendante et les conditions thermiques extérieures résultent de leur interaction. Ici, nous avons voulu délibérément isoler les facteurs radiatifs des autres afin de mieux les cerner. Ce travail ne constitue qu'une étape inévitable, vers la compréhension de cette interaction. Une construction typologique complète nécessiterait non seulement la compréhension des différents facteurs climatiques d'ambiance mais également celle de leur interaction.

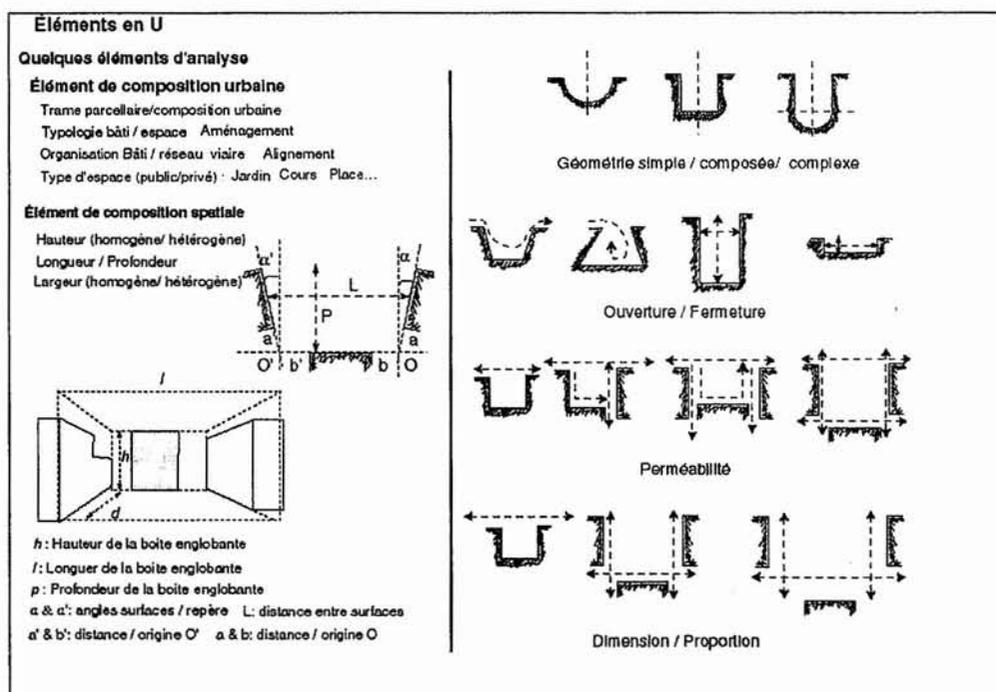
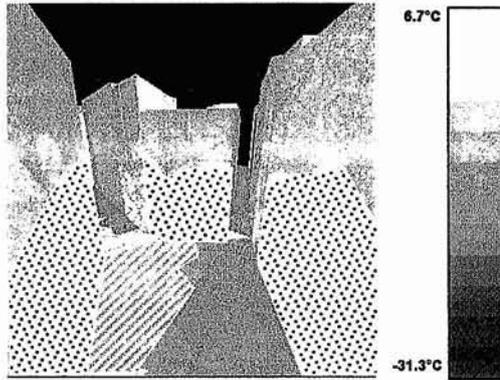


Tableau 5.29 Caractéristiques formelles d'un espace en forme de U

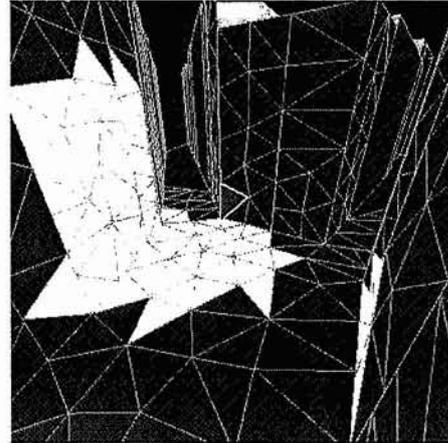
### 5.3.4 Analyse des influences radiatives thermiques et l'aide à la conception

L'intérêt de l'analyse des influences radiatives thermiques repose sur trois concepts fondamentaux que nous rappellerons ici :

La zone critique : à partir de la définition des surfaces les plus sensibles à leur environnement urbain, il est possible de définir les lieux présentant des problèmes microclimatiques locaux dus aux rayonnements.



Les zones sensibles à l'environnement urbain



Les zones responsables d'une situation thermique critique

Tableau 5.30 L'objectif du modèle

La zone d'influence : définissant l'air regroupant les surfaces responsables d'une situation thermique locale critique, elle définit par de même la zone d'intervention.

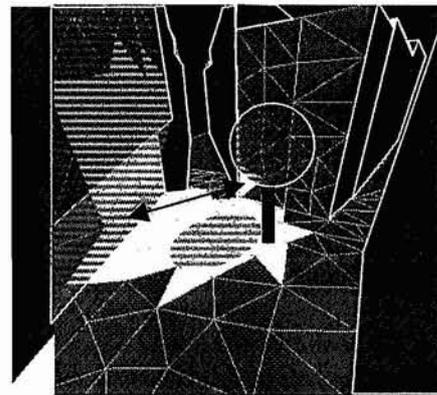
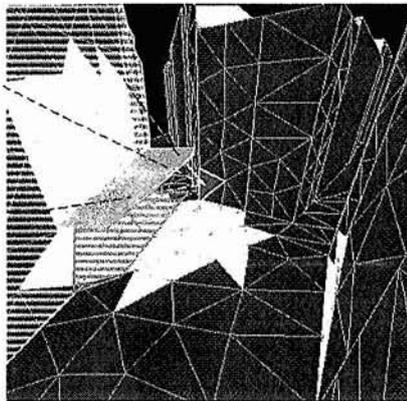


Tableau 5.31 Le contrôle des influences radiatives par la modification de la visibilité entre les surface ou par changement des qualités radiatives de la zone d'influence (ombrage)

Les grandeurs limites: permettent la mise en relief des caractéristiques formelles ou physiques limites nécessaires à une qualité radiative thermique

recherchée. Rappelons l'exemple du facteur de forme limite qui définit une distance limite entre deux façades à partir de laquelle nous pouvons considérer que l'influence résultante est négligeable.

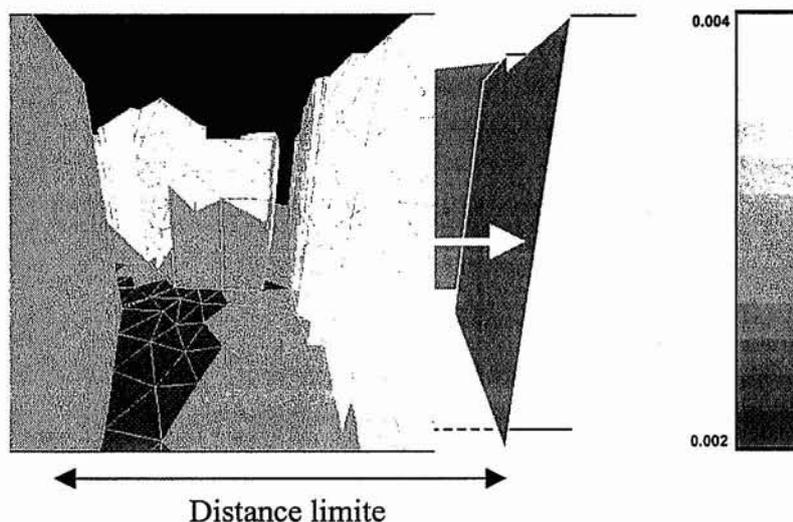


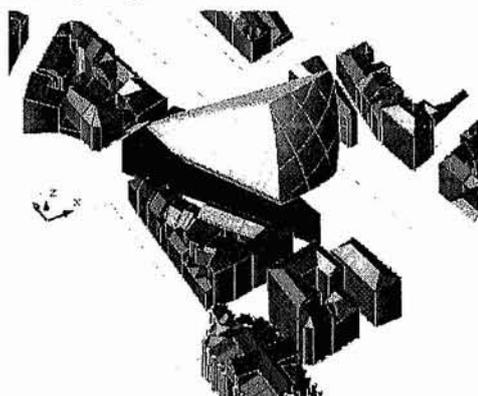
Figure 5.14 facteur de forme limite pour une influence seuil de 0.1°C

Nous soulignerons trois possibilités de modification des impacts radiatifs thermiques qui sont :

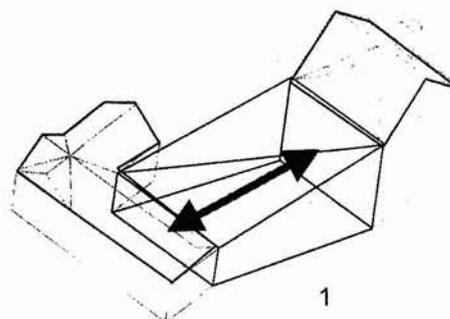
*Masques solaires* : le changement des qualités radiatives thermiques de la zone d'influence par l'obstruction solaire constitue le moyen le plus performant de contrôle des impacts radiatifs thermiques.

*La visibilité entre surfaces* : qui définit le degré d'échange entre surfaces. Cette visibilité peut être diminuée de par l'éloignement des surfaces ou même rompu par la création de masque entre la surface influencée et la zone d'influence (cf.fig).

*Matériaux* : par la modification des caractéristiques des matériaux principalement les réflectivités solaires de ces derniers définis par l'albédo limite (cf. §).



Masques solaire (© Siret et Houpert 2000)



Visibilité entre surfaces (© Nivet 1999)

Tableau 5.32 Visibilité solaire et entre surfaces

Notons que des travaux ont été entrepris par D. Siret et M.-L. Nivet concernant le développement d'outils d'aide à la conception basé sur les questions de visibilité et de masque solaire. Il serait intéressant d'étendre leur applicabilité à la problématique des échanges radiatifs thermiques. Cependant, il est important d'évaluer l'influence limite et cela par rapport aux conditions de confort extérieures. Les problèmes soulevés par ce dernier sont liés à la problématique de transposition des modèles de confort existants aux situations extérieures, que seul une enquête et des campagnes de mesure peuvent y répondre.

## 5.4 Conclusion

Avant d'aborder la discussion de la démarche mise en œuvre, nous tenterons de résumer ce qui a été abordé dans notre essai de caractérisation physique et spatiale des influences.

Nous dresserons, en premier lieu, une synthèse de ce qui a été abordé dans la partie consacrée à l'interprétation physique des influences radiatives thermiques. Nous avons en premier lieu tenté de cerner les différents types d'interprétation que permet l'étude de cas simplifiés. Les premiers cas analysés concerneront l'étude d'influence entre deux surfaces élémentaires dans des conditions de ciel clair et à midi. En effet, nous ne tentons pas d'aborder tous les cas d'influence possible, mais de présenter comment ce type d'investigation permettrait d'expliquer certaines situations thermiques urbaines.

Trois facteurs importants ont été abordé à travers les cas simplifiés présentés :

### *Les échanges radiatifs*

L'étude des influences radiatives entre surfaces, nous a permis de ressortir quelques éléments clés nécessaires à leur compréhension :

- Une surface urbaine influence d'avantage son environnement minérale par son émission infrarouge que par réflexion solaire.
- Les échanges par réflexion solaire dépendent des qualités absorptives des surfaces influencées et réfléchives de celle influentes.
- Les réflectivités et absorptivités solaires des surface sont moins déterminant des impacts radiatifs que les qualités thermiques et d'exposition solaire des surfaces.
- La variation des influences thermiques entre les sols et les parois dépend des latitudes. Pour les latitudes proches de l'équateur les sols interviennent de manière plus significative dans les impacts radiatifs thermiques. Les surfaces verticales interviennent dans les impacts, essentiellement pour les latitudes au nord ou au sud de  $\pm 66^\circ$ . La situation se trouvant entre  $\pm 23^\circ$  et  $\pm 66^\circ$  implique une amplitude de variation annuelle optimum, des influences radiatives comparées entre surfaces varticales et horizontales.
- Les échanges radiatifs s'effectuent de manières significatives qu'avec les surfaces les plus proches.

### *Les pertes par obstruction*

Deux types d'obstruction ont été mis en avant ; l'obstruction du ciel et celle du soleil. Cette dernière se révèle la plus influente.

L'obstruction du ciel clair peut rivaliser, du point de vue des influence, avec les apports de ( $d$ ), seulement quand cette surface se trouve à l'ombre.

Dans les autres situations, nous pouvons considérer que le phénomène d'obstruction du ciel induit le remplacement de celui-ci par un environnement qui lui est beaucoup plus influent.

Dans des condition de ciel clair, l'influence thermique du ciel est plus importante que son influence en solaire.

### *L'influence des coefficients*

Les coefficients abordés sont :

- Le coefficient d'échange interne

Les matériaux urbains traités, nous permettent de conclure que ces derniers affectent de manière très peu sensible les influences radiatives thermiques. Les métaux qui n'ont pas été abordé dans les différents cas analysés comportent des valeurs de conductivité importantes nécessitent une analyse spécifique.

- Le coefficient d'échange externe

Nous avons pu observer l'importance de ce facteur dans la définition des influences. Il fera l'objet de plus de développement en perspective.

- La température moyenne d'évolution ( $T_m$ ). L'étude celui tente d'introduire les discussions menées dans le chapitre qui va suivre.

La partie consacrée à l'analyse spatiale des influences tentent de mettre en relief, les relations entre la situation d'une surface et le type d'impact, qu'elle peut subir. Ces impacts ont été analysés en terme de contribution et de perte. En premier lieu, nous avons analysé l'implication des facteur de forme dans les impacts radiatifs thermiques. En effet plus une surface voit son environnement plus elle échange avec lui. La position d'une surface dans un espace donné induit donc des échanges qui privilégieront l'influence de la partie de l'environnement la plus vue. Elle induit également des pertes qui sont proportionnelles à la part obstruées par les autre surfaces. Ainsi les surfaces les plus hautes d'un bâtiment sont influencées davantage par l'obstruction du sol, que par celle du ciel. Le phénomène inverse est observé pour des situations de surfaces proches du sol. Les surfaces appartenant au sol, sont d'autant plus sensible aux influences de l'obstruction du ciel, quand celle-ci est proche d'une paroi.

La qualité radiative thermique des surfaces influentes sont à considérer parallèlement aux facteur de forme. Nous avons pu montrer, que l'organisation spatiale des influences thermiques ne respecte plus celle des valeurs des

facteurs de formes, quand l'espace accuse une exposition solaire définissant des zones d'ombre et au soleil. La qualité thermique et radiatives de ces dernières sont plus déterminantes des influences.

La construction de repertoire de figures d'influence radiative thermique caractéristiques d'un espace urbain, des analyses plus poussées doivent être effectués, prenant en compte la spécificité météorologique, physique et spatiale du lieu. Les facteurs à prendre en considération dans la définition des effets d'impact radiatif sont : l'accessibilité solaire et qualité d'exposition, ouverture/fermeture de l'espace, et les caractéristiques de paroi. Le croisement des descripteurs définissant ces facteurs avec les impacts radiatifs thermiques, permettra de mettre en exergue les effets d'impacts caractéristiques d'une espace. Ici seulement les facteurs radiatifs sont mis en exergue. Il est évident que d'autres conditions climatiques et physiques interviennent dans la définitions des ambiances thermiques urbaines. Ce travail tente seulement de poser les questions relatives à la caractérisation radiative des impacts urbains.

La définition des microclimats urbains repose pas seulement la compréhension des différents facteurs climatiques mais de leurs interactions. La mise en relief de ces interactions demande une gestion élaborée des différents paramètres ou indicateurs qui nous permettent de les identifier.

Le développement des analyses d'influence radiative thermique effectué à partir d'un modèle simple, soulève la question de la fidélité d'interprétation des manifestations observées. C'est ce que nous tenterons de cerner dans ce qui va suivre.



## **Chapitre 6**

### **Discussion**



Dans les parties précédentes, nous avons présenté des analyses d'impacts radiatifs thermiques, appliquées à des géométries complexes, simples et élémentaires. Nous avons tenté d'expliquer les différentes manifestations représentatives des impacts radiatifs thermiques, à travers le modèle de simulation développé. Ici, il s'agit de discuter de la pertinence du modèle et de sa validité.

Tout travail de construction de modèle doit être validé. La validation expérimentale in-situ, aurait été l'approche la plus intéressante à entreprendre. Cependant, cette méthode pose un certain nombre de problèmes, relatifs à la mesure d'impacts, qui seront soulevés dans cette partie. Nous projetons cependant, d'effectuer des travaux de validation sur terrain, nous poserons ainsi les éléments méthodologiques nécessaires à cette investigation.

A défaut d'une validation in-situ, nous mettons en place une technique de vérification basée sur la comparaison de résultats de simulation entre ceux du logiciel Solene et le modèle.

Il faut souligner que l'objectif premier de notre travail de validation, ne concernera pas la vérification de l'exactitude numérique du modèle. En effet, nous avons axé notre recherche, sur le développement d'un modèle qualitatif et non descriptif précis (cf. chap.1). Il s'agira pour nous, de valider la fidélité d'interprétation des phénomènes d'impact.

Dans la première partie du chapitre, nous aborderons les questions relatives à la modélisation des phénomènes thermiques extérieurs. Nous tenterons de cerner les principales difficultés de modélisation et de validation de ce type d'outil.

Nous développerons, par la suite, les tests comparatifs effectués, qui seront suivis d'une synthèse mettant en relief les principales limites du modèle proposés.

## **6.1 La validation des modèles de simulation thermique urbaine**

L'outil permettant l'estimation des différents échanges thermo-aérauliques d'un espace urbain fait l'objet d'études. Le milieu scientifique (physiciens, climatologues, etc.) tente de mettre en combinaison les différents types d'échange (convectifs, radiatifs, etc.) en relation avec les caractéristiques physiques et spatiales du lieu.

Trois types majeurs de difficulté peuvent être répertoriés, quand il s'agit de modélisation et de simulation numérique des phénomènes physiques climatiques :

### *1. Difficultés liées à la construction des équations de bilan,*

Les simplifications entreprises dans la construction des bilans sont nécessaires, compte tenu de la complexité de combinaison des expressions exprimant les

phénomènes physiques. Cette difficulté d'association se répercute dans le traitement numérique des phénomènes thermiques et aérauliques. Ceci donne lieu soit à une simplification des modes de transfert convectif et conductif supposés uniformes dans le temps et l'espace (Antoine 1997) soit à un pseudo-couplage entre les échanges thermiques et aérauliques (Pignolet 1998).

## *2. Difficultés liées aux données nécessaires aux simulations et de leurs correspondances avec la réalité étudiée.*

Deux types de données sont importants dans la simulation microclimatique : les données physiques climatiques et celles géométriques du site.

La modélisation géométrique induit principalement une simplification des données urbaines et un choix de leurs niveaux de détail. Pour une simulation précise des phénomènes, une discrétisation qui se veut homogène ou non homogène est appliquée. Le type de discrétisation adopté influence cependant, les résultats obtenus.

Le modèle développé dans ce rapport, repose sur un maillage définissant des facettes de même surface. Ceci est approximativement respecté quand le site a une forme géométriquement irrégulière.

Les données physiques introduites dans les modèles sont souvent issues de sources autres que celles du lieu simulé. En général ces données sont fournies par la littérature, ou par les services météorologiques.

A défaut de températures mesurées sur site, des températures moyennes du sol et de l'air mesurées en station météorologique sont utilisées. La définition du coefficient de recalage entre la température en station météorologique et le site reste problématique dans la mesure où il varie dans le temps et dans l'espace.

La simulation des ambiances thermiques extérieures est également tributaire de la connaissance des conditions internes des bâtiments. Souvent, celles-ci sont supposées représenter les situations de confort thermique intérieur. D'autres grandeurs dépendant de la connaissance de l'enveloppe du bâtiment (ex. conductivités) sont proposées à partir de la définition des composants de la paroi (quand cette dernière est connue), mais elles ne prennent pas en compte son altération avec le temps.

Verseghy D.L. et Munro D. S (1989) se sont intéressés à l'incidence d'un certain nombre de simplifications, sur les écarts entre les bilans calculés et la réalité mesurée. Des études comparées appliquées à une cour urbaine ont permis aux auteurs de définir les erreurs estimées. Quelques exemples de simplification et d'erreurs induites sont présentées (cf. tableau.6.1)

	Erreur estimée ( $W.m^{-2}$ )
Dans l'IR :	
L'émission de parois supposée proche de l'émission de l'air environnant.	> 35
Négligence de l'absorption et de l'émission de l'air entre deux parois	environ 10
Négligence des multiréflexions et l'émission du ciel est considérée comme isotrope.	environ 15
Utilisation des valeurs d'émissivité et de réflectivité prise dans la littérature au lieu de celles qui sont mesurées et l'hypothèse du corps noir.	>5
Dans le visible	
Négligence des réflexions spéculaires. (site comprenant 20% de surface vitrée)	de 5-10
Négligence des multiréflexions	< 15
Apport diffus du ciel isotrope	< 15
Utilisation des coefficients se trouvant dans la littérature	> 10

Tableau 6.1. Estimation des ordres de grandeur des erreurs dues aux hypothèses entreprises dans les bilans thermiques de surface (Verseghy et al. 1989)

### 3. Difficultés liées aux calculs numériques.

Les ordres de grandeur des termes physiques simulés, sont très faibles. Ceci induit des erreurs d'estimations que nous rencontrons par exemple dans le calcul des facteurs de formes. Des difficultés majeures peuvent apparaître pour certaines situations géométriques.

Les erreurs numériques sont à considérer, car les scènes géométriques comportent très facilement un nombre de facettes assez conséquent. Ceci est nécessaire à la caractérisation spatiale des échanges. Les variations numériques rencontrées dans les calculs des facteurs de forme et des températures sont d'un ordre de grandeur très faible et peuvent occasionner des erreurs qui augmentent avec le nombre des facettes traitées dans la scène.

Donnons l'exemple de modélisation de la place du Piloni, qui comporte un total de 1544 facettes.

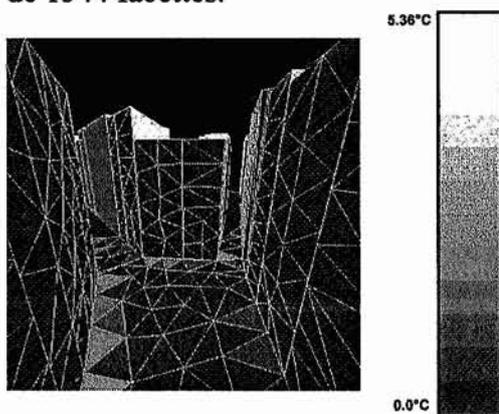


Figure 6.1 Les contributions maximums des facettes

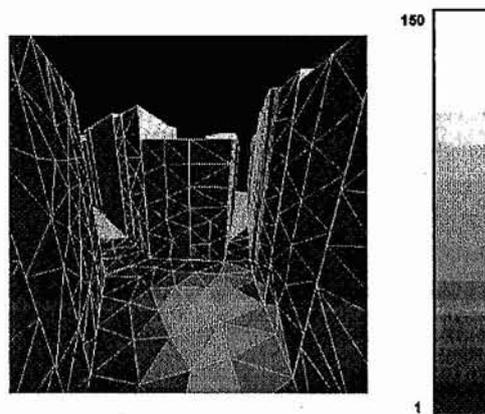


Figure 6.2 Les facettes de la scène dont le nombre de contributeurs à 50% des influences totales est inférieur à 10% du nombre total des surfaces.

L'interprétation des résultats du modèle développé dans ce rapport, tient compte des contributions maximales reçues (cf. fig. 6.1) et le nombre de facettes participant à 50% de l'influence totale (cf. fig. 6.2). Cette dernière observation, nous permet de déterminer les facettes, dont les influences sont tributaires de somme de contributions très faibles. Elles sont en effet, plus susceptibles d'accuser des erreurs numériques.

Dans l'objectif d'analyse des phénomènes radiatifs thermiques, le modèle, à ce jour, ne tient pas compte de la chaleur latente et des variations d'échanges convectifs dues aux formes urbaines. Des perspectives de recherche seront formulées dans ce sens dans le prochain chapitre. Nous aborderons ici principalement la représentativité qualitative du modèle explicatif mis en œuvre.

Nous avons émis des choix d'interprétation algorithmique des modèles physiques, par rapport à la résolution de la question d'influence, qui jouent un rôle important dans la précision numérique des résultats. C'est ce que nous mettrons en relief dans ce qui va suivre.

Dans notre discussion, nous posons le problème non pas des erreurs numériques, mais de la fiabilité des interprétations qualitatives que peut induire l'approche d'analyse des influences.

## **6.2 Discussion de l'approche qualitative des influences**

Il était possible d'observer, à travers les exemples d'analyse présentés, les avantages de cette démarche explicative des phénomènes radiatifs, que nous classerons en deux intérêts principaux :

- la possibilité d'observation et de caractérisation de l'influence du cadre bâti sur les échanges thermiques radiatifs,
- la caractérisation spatiale des influences thermiques permettant de situer les phénomènes et cela aussi bien physiquement que spatialement. Il s'agit de répondre aux questions : Qu'est-ce qui influence ? Comment ? Dans quelle condition ?

Cette recherche a pour objectif de développer une approche qualitative de caractérisation des impacts des formes urbaines, sur les échanges thermiques radiatifs. La recherche qualitative s'avère pertinente dont la mesure où est sollicitée essentiellement une logique de compréhension des phénomènes étudiés. Cette approche bien que reposant sur une démarche quantitative favorise la compréhension par rapport à la description numérique précise du phénomène. Notons cependant, l'interdépendance des approches quantitatives précises et qualitatives dans l'étude des phénomènes microclimatiques. Elles entretiennent des rapports complémentaires nécessaires aux démarches de constatation et d'interprétation.

La modélisation précise des échanges thermiques est nécessaire à la description des phénomènes. C'est une démarche que nous nommons donc *quantitative*, car elle est soucieuse de la précision numérique, et elle permet d'assurer la fiabilité des études microclimatiques. La démarche qualitative veut dépasser le domaine de l'observation vers l'interprétation de ces phénomènes. C'est dans un besoin conciliant précision et possibilité d'interprétation des phénomènes microclimatiques, que réside l'interdépendance des approches qualitatives et quantitatives.

L'approche qualitative des influences, reposant sur des estimations de température de plus en plus développées, représente un compromis entre représentation précise et expression simplifiée des phénomènes thermiques urbains. La représentativité est réalisée dans la définition des types de manifestations radiatives thermiques.

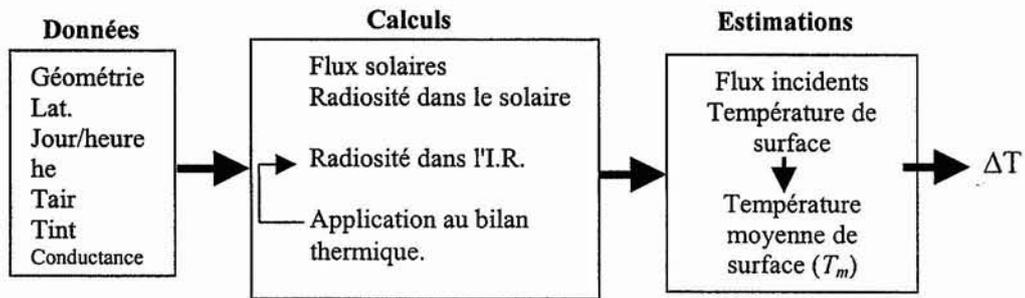


Figure 6.3 Calculs actuels nécessaires aux études d'influence.

La représentation complexe des échanges, qui intégrerait les liens existant entre les différentes manifestations climatiques, ne permettrait pas l'analyse isolée des relations entre les différents facteurs intervenant dans les espaces urbains. Pour une estimation plus fidèle des influences, la démarche logique aurait été d'effectuer :

- deux calculs itératifs de température de surface en situation de référence, et en présence de la surface influente ( $d$ ),
- le calcul des différences entre les deux situations,
- calcul réitéré pour chaque face ( $d_j$ ) puis ( $r_j$ ) de la scène géométrique.

Cette démarche est beaucoup trop complexe pour être appliquée à un site discrétisé.

Cependant, elle permettrait la prise en compte du phénomène le plus complexe : le soleil. Bien que nous connaissions de manière précise ses comportements diurnes et saisonniers, son mouvement crée des conditions solaires urbaines en perpétuel changement, particulièrement celles de l'influence de ( $d_j$ ) sur ( $r_i$ ).

L'approche qualitative proposée tente d'appliquer un modèle de relation linéaire sur une réalité plus complexe. La surface ( $r$ ) est considérée réceptrice (influencée) et ( $d$ ) distributrice (influyente). Ceci peut rester vrai pour des conditions thermiques de ( $d$ ) plus importantes que ( $r$ ), mais dans le cas inverse, ( $r$ ) devient influente et ( $d$ ) influencée.

Ces questions de linéarité et de dissymétrie feront l'objet de tests afin de statuer sur la fidélité des résultats, par rapport à une situation climatique donnée. Rappelons que la précision recherchée par ce travail ne réside pas dans l'exactitude numérique des résultats mais dans l'exactitude de représentation des influences.

La validation est une démarche nécessaire après la construction d'un modèle. En effet, elle permet de déterminer la cohérence du modèle et les sources d'écarts entre la situation réelle et simulée afin d'y remédier.

La validation expérimentale est la démarche la moins discutable.

Dans le cadre de la simulation des influences, il est cependant difficile d'isoler, par les grandeurs mesurées, l'influence d'une construction par rapport aux autres. La validation expérimentale peut cependant s'effectuer par deux méthodes :

- à partir de mesures effectuées sur le long terme, dans un espace urbain, susceptible d'être transformé. Cette démarche se révèle intéressante dans la mesure où elle permet la construction d'une base de données d'informations climatiques sur un site qui évolue dans le temps.
- à partir de comparaisons de mesures entre deux sites présentant des particularités climatiques similaires et géométriquement complémentaires. C'est-à-dire que l'un des deux sites représente la situation primitive de l'autre, en considérant l'évolution de la forme urbaine. Les sites correspondant à cette description peuvent être répertoriés, cependant, ils ne satisferont pas toutes les exigences de similarités, formelles ou météorologiques auxquelles ils devront répondre.

Toute validation nécessite un déploiement physique et matériel important qui se multiplie avec les sites étudiés et la résolution spatiale désirée. En dehors de ces difficultés, la réalisation des deux propositions présentées ci-dessus, demande une mise en place de campagne de mesure d'impact, évoluant avec l'espace, et demandant une gestion de comparaison des données conséquente.

Dans cette étude, à défaut de validation sur terrain, nous avons opté pour des tests comparatifs des résultats de simulation de deux modèles : Solene et le modèle d'analyse des influences développé.

Les tests que nous entreprenons, repose sur des simulations effectuées par le logiciel Solene. Solene réalise des simulations solaires et thermiques en régime permanent, dont les résultats constituent les données du modèle d'estimation

des influences développé. Ces mêmes résultats sont traités, afin d'exprimer les impacts, cela à travers l'estimation des différences de température entre deux situations géométriques. Ces investigations seront présentées dans ce qui va suivre.

### 6.2.1 Tests comparatifs : Comparaison de modèles

Les tests sont basés sur l'estimation des différences de température de surface, avant et après transformation d'une situation géométrique, grâce à Solene. Ces dernières sont donc comparées aux résultats du modèle des influences (cf. équation 6.1). Le choix d'une géométrie simple permet de décrire plus lisiblement les critères et les causes de transformation. Une rue canyon de longueur limité comportant deux éléments de construction (1) et (2) constitue notre géométrie test.

$$\Delta T_r = \frac{(1-\alpha_r)\Delta\Phi_r}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h e_r + c_r)} + \frac{(\psi'_{rs} - \psi_{rs})(L_s \downarrow + D_s \downarrow)}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h e_r + c_r)} + \frac{(F'_{r_{env_n}} - F_{r_{env_n}})[\alpha_{env_n} \cdot (1-\alpha_r)\Phi_{env_n} + \varepsilon_{env_n} \cdot \sigma \cdot T_{env_n}^4]}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h e_r + c_r)} + \dots$$

$$\frac{F_{r_{d_j}}[\alpha_{d_j} \cdot (1-\alpha_r)\Phi_{d_j} + \varepsilon_{d_j} \cdot \sigma \cdot T_{d_j}^4]}{(\varepsilon_r \cdot \sigma \cdot 4 \cdot T_m^3 + h e_r + c_r)}$$

(6.1)

La démarche de calcul des influences à partir de Solene s'effectue sur plusieurs étapes :

- calcul de la température de surface de (1) en absence de (2). (fig.6.4)
- calcul de la température de surface de (1) en présence de (2). (fig.6.5)
- différence des températures de surface calculées dans les étapes 1 et 2.

Ces différences seront donc comparées à l'aide de diagrammes aux résultats du modèle d'analyse des influences.

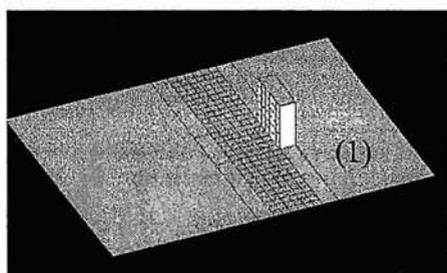


Figure 6.4 Situation de référence

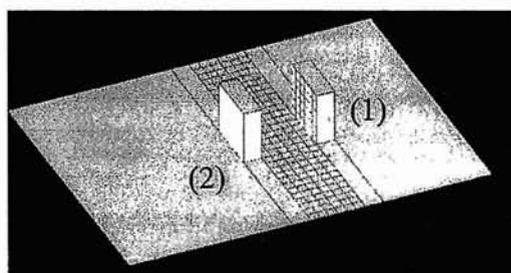


Figure 6.5 Situation analysée

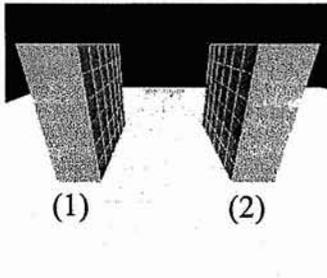
La linéarisation du bilan et l'estimation de la température moyenne ( $T_m$ ) de manière simplifiée (cf. équation 6.2), pose le problème de la surestimation ou de la sous-estimation des influences quand les écarts de température de ( $r$ ) avant et après influence sont importants.

$$T_m = (T_r + T'_r)/2 \quad (6.2)$$

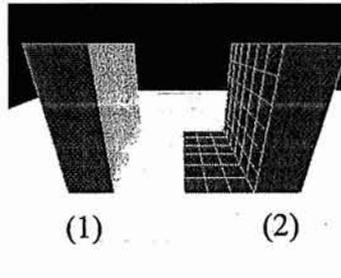
$T_r$  température de surface de ( $r$ ) avant l'influence de ( $d$ )  
 $T'_r$  température de surface de ( $r$ ) après l'influence de ( $d$ ).

C'est pour cette raison, que les tests ont été effectués sur plusieurs cas d'orientation qui sont (cf. tabl.6.2) :

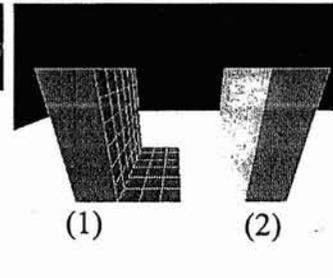
- Nord-Sud, pour un ensoleillement méridien. Les conditions de température des surfaces de la rue sont quasi semblables.
- Est-Ouest : en orientant le bâtiment de référence, face au soleil puis à l'ombre.
- Nord Est – Sud Ouest : en orientant le bâtiment de référence, face au soleil puis à l'ombre.



Cas 1 : Orientation Nord-Sud

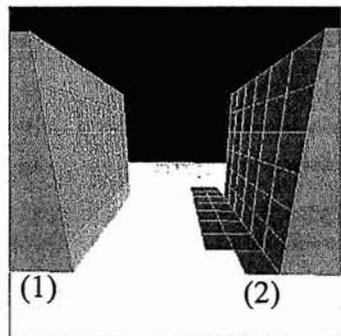


Cas 2 : Orientation Est-Ouest dont (1) au sud

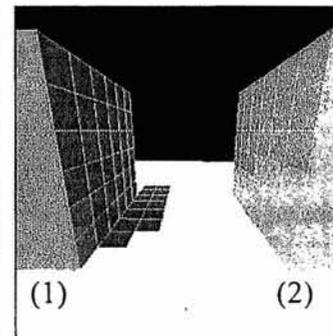


Cas3 : Orientation Est-Ouest dont (1) au Nord.

Lat. 47, 21juin à 12h  
 $T_{air} : 25^{\circ}\text{C}$   
 $T_{int} : 20^{\circ}\text{C}$ , dans le sol (1m de profondeur) :  $15^{\circ}\text{C}$   
 Conductance :  $1(\text{W}/^{\circ}\text{K})$   
 $h_e$  (considéré homogène) :  $14(\text{W}/^{\circ}\text{K})$   
 Albédo : 0.2  
 Réflectivité I.R. : 0.1



Cas 4 : Orientation Nord Est-Sud Ouest dont (1) au soleil



Cas5 : Orientation Nord est - Sud ouest dont (1) à l'ombre.

Tableau 6.2 Les différentes situations et orientations analysées

Ces types d'orientation adoptés, permettent de disposer les constructions (1) et (2) de manière à réaliser, un contraste de flux incidents et de température de surface accentué (orientation Est-Ouest) et atténué pour les orientations Nord-Sud. L'orientation Nord Est – Sud Ouest, a été testée comme situation intermédiaire.

Pour tous les cas, les calculs ont considéré :

- les températures de l'air comme température moyenne ( $T_m$ ),
- $T_m$  égale à la température moyenne des surfaces du site.

Dans le cas où ( $d$ ) induit une obstruction solaire pour ( $r$ ), la température moyenne utilisée dans l'estimation de l'impact solaire, est considérée comme température de surface moyenne entre les facettes ensoleillées et à l'ombre.

Pour chaque cas, l'impact de la présence du bâtiment (2) sur la température de l'environnement (les faces du bâtiment (1) et le sol), sera donc estimée de deux façons différentes.

Nous discuterons, dans ce qui va suivre, chaque cas simulé et nous tenterons de dresser les limites du modèle comme conclusion de la partie test.

### Cas1 : Orientation Nord-Sud

Le cas étudié présente un changement de situation thermique, crée par le masquage de (2) d'une partie du sol et du ciel. Les faces (1) et (2) présentent les mêmes conditions d'ensoleillement et donc le contraste entre leur température de surface est inexistant. La température des faces du bâtiment (2) est beaucoup moins élevée que celle du sol.

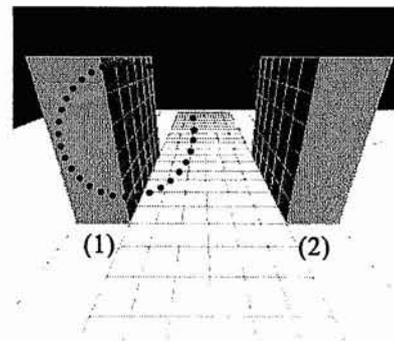


Figure 6.6 Cas 1

Nous noterons que, les parties encadrées dans les figures et les diagrammes qui vont suivre représentent les facettes du bâtiment (1).

Nous pouvons observer que, les faces de (1) accusent des influences négatives. Une partie du sol vue par (1) a été masquée par (2). Ce dernier présente des conditions thermiques plus faibles que celles du sol.

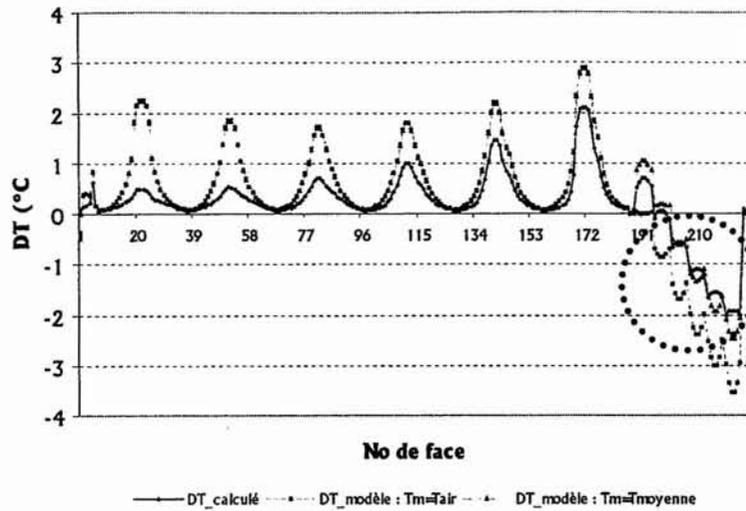


Figure 6.7 Comparaison des influences (exprimées en différences de températures) calculées par Solene et estimées par le modèle d'analyse des influences.  
Cas 1 : les faces (1) et (2) ont les mêmes conditions d'ensoleillement.

Les parties du sol se trouvant entre (1) et (2) accusent de faibles influences positives dues aux réflexions de (2) du rayonnement et à son occultation d'une partie du ciel présentant une émission plus faible. Les influences sont légèrement plus importantes, pour les facettes se trouvant plus proches des deux bâtiments.

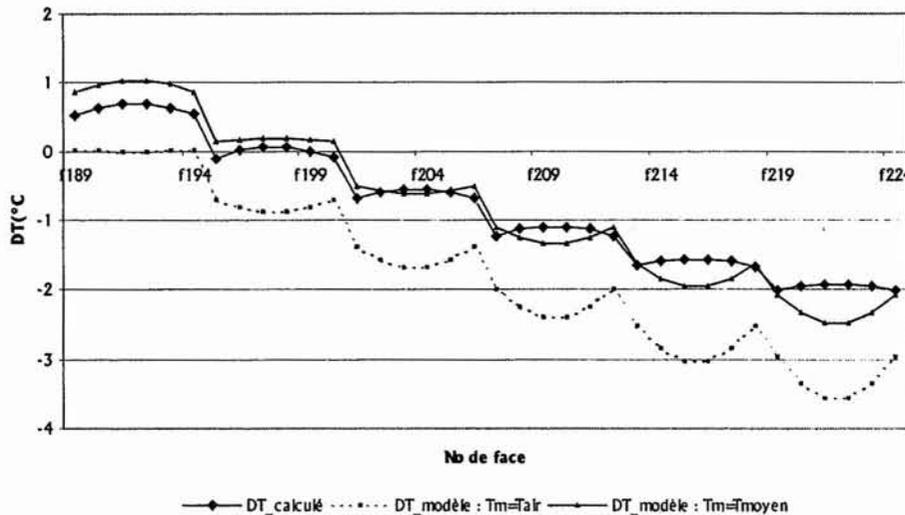


Figure 6.8 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle appliquée à la façade (1).

Le modèle utilisant ( $T_m$ ) comme température moyenne respecte les résultats calculés de manière satisfaisante.

Les résultats du modèle, prenant en compte une température moyenne égale à celle de l'air, s'éloignent des estimations calculées par Solene. Cela est dû aux sous-estimations de la température de changement moyenne des surfaces ( $T_m$ ), qui ont tendance à surestimer les impacts négatifs de (2) sur (1).

Nous pouvons observer également, que le modèle ne suit pas le même schéma d'influence que celui des estimations calculées. En effet, les influences calculées sont très légèrement plus importantes sur les côtés de la face (1) qu'au milieu de la face (cf. fig. 6.8). Le modèle quant à lui accuse un comportement inverse, c'est-à-dire, une influence négative plus importante au milieu, que sur les côtés de la face.

Du point de vue logique, ce sont les facettes qui se trouvent au milieu de la façade (1), qui subissent le plus de pertes par obstruction, aussi bien du ciel que du sol. Elles subissent également, davantage l'influence des surfaces de la façade (2).

Il est possible que dans les bilans, les influences en terme d'obstruction soient compensées par l'influence de la face (2) due aux échanges qui sont plus importants. Cela, peut nous amener à conclure que le modèle peut effectivement surestimer les pertes par obstruction, et/ou sous estimer les apports de la face (1). Cela serait dû à la sous-estimation éventuelle de ( $T_m$ ) dans le calcul des influences par obstruction. ( $T_m$ ) étant défini comme température de surface moyenne des bâtiments.

En revanche, il est important de noter que le modèle des influences considère le sol à l'infini, bien que ce dernier n'ait pas été modélisé en sa totalité. Le modèle prend en compte les pertes thermiques par obstruction du sol de la partie restante non modélisée (prise en compte des facteurs de forme entre surfaces), alors que les calculs ne considèrent que le sol existant.

Il est important de noter également, que les pertes par obstruction du sol, sont importantes par rapport à l'influence de (2). Malheureusement, ce dernier point ne peut être observé à travers les résultats de Solene.

Ce type d'orientation, est très sensible aux erreurs de calcul numérique dues à la confusion de la direction du rayonnement solaire avec l'orientation des façades. Les sources d'erreurs sont liées aux angles nuls entre normales induites par cette superposition, qui se répercutent dans le calcul des flux normaux incidents.

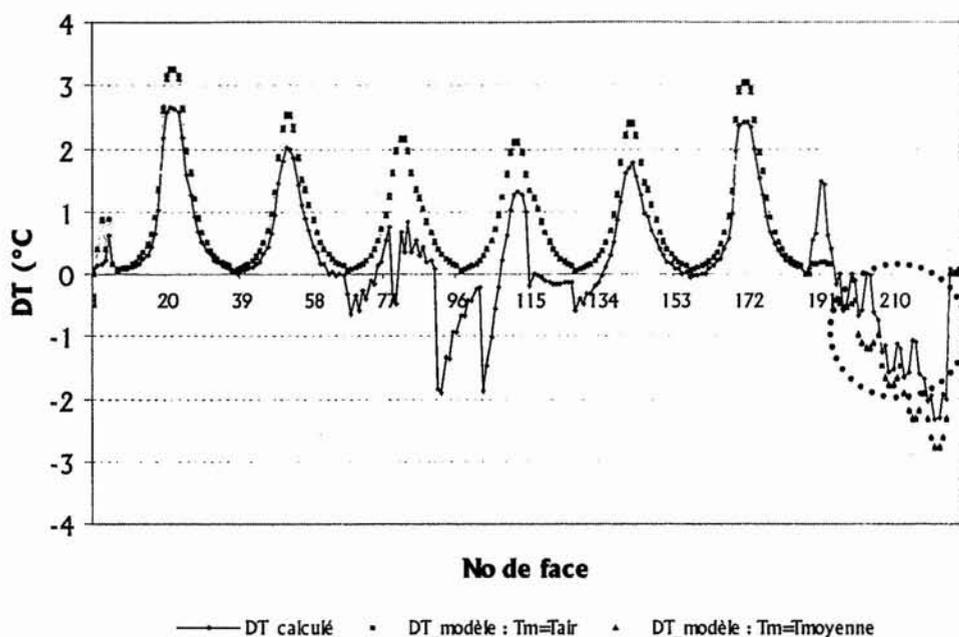


Figure 6.9 Les influences calculées par Solene et estimées par le modèle pour une orientation de  $0^\circ$  par rapport au méridien.

L'exemple ci-dessus (cf. fig. 6.9), a été présenté afin d'illustrer la faiblesse des calculs numériques, appliqués à un site présentant une orientation se confondant avec celle des rayonnements solaires (correspondant ici à celle du méridien). Le changement d'orientation et cela de manière très peu significative, par exemple de  $1^\circ$  du méridien, semble résoudre le problème.

### Cas 2 : Orientation Est-Ouest avec (1) orienté Sud

Les changements de conditions thermiques les plus importants subis par le sol, sont dus au masquage par (2), du soleil et d'une partie du ciel. Les changements subis par les faces de (1), sont moins significatifs et sont liés à l'obstruction d'une partie du sol et du ciel.

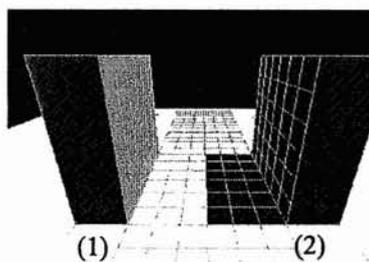


Figure 6.10 Cas 2

Les influences sont négatives sur la face (1) et cela est dû au remplacement d'une partie du sol par la face (2), présentant des conditions thermiques et solaires plus faibles que ceux du sol.

Nous pouvons également observer, des chutes de température pour la partie du sol à l'ombre. Le modèle prenant comme ( $T_m$ ), la température moyenne de surface semble très bien respecter les estimations de Solene, des influences subies par le sol.

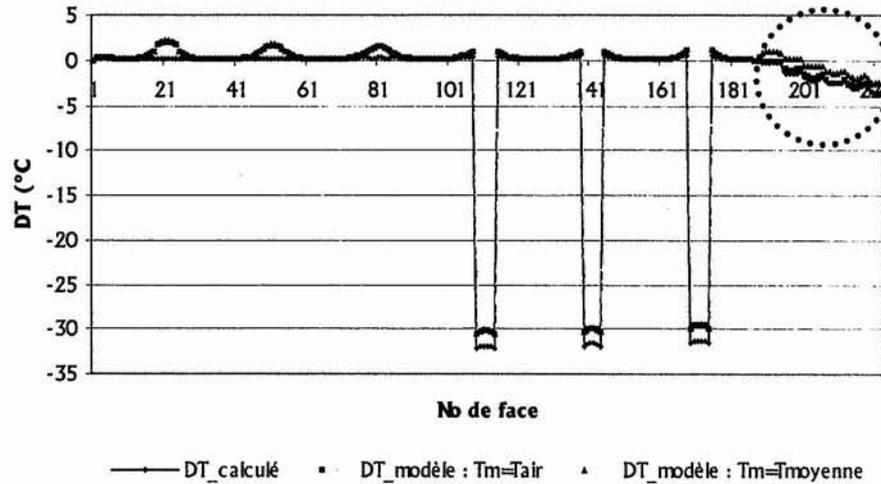


Figure 6.11 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle d'analyse des influences. Cas 2 : face (1) au soleil et (2) à l'ombre.

Pour la face (1), le modèle intégrant ( $T_m$ ) égale à la température de l'air, semble mieux respecter les estimations calculées. Dans le cas où  $T_m$  est égale à la température moyenne, le modèle semble surestimer les influences en bas de la façade.

La température moyenne de surface ( $T_m$ ) est faible par rapport aux changements occasionnés sur la partie basse de la façade (1). Ces changements résultent principalement des apports par réflexion et émission infrarouge de la face (2). Et inversement, la température moyenne, est plus importante par rapport aux changements occasionnés en haut de la façade, qui résultent principalement de l'obstruction du sol.

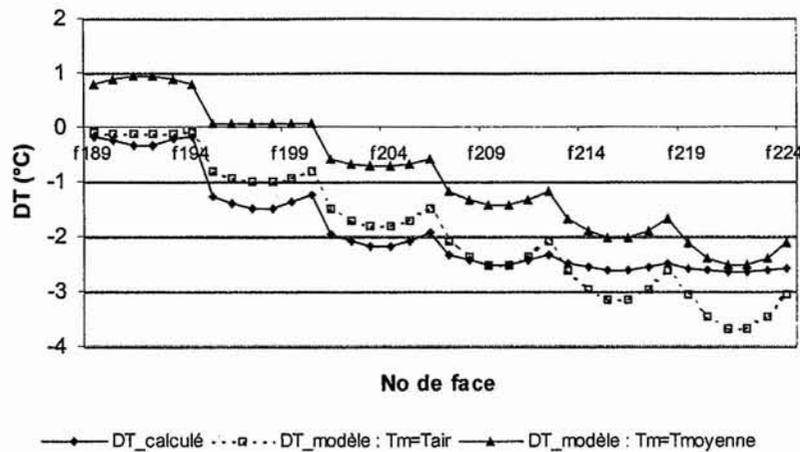


Figure 6.12 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle appliquée à la façade (1).

La définition de la température moyenne de changement : ( $T_m$ ), ne semble pas être la seule mise en cause dans le décalage entre les influences estimées par les calculs et par le modèle. Il est important de ne pas négliger les erreurs numériques, que peuvent induire le fait de sommer, les flux incidents et les températures de chaque facette de la scène, pondérés par le facteur de formes entre la facette de référence et celle influente.

L'une des raisons serait liée aux calculs numériques de sommes d'expressions dépendant des facteurs de formes, qui ne permettent pas la réalisation de façon précise des égalités suivantes :

$$F_{ij} = F_{i(j1+j2)} = F_{i\_j1} + F_{i\_j2} \text{ et } \sum F_{ij} = 1 - F_{i\_ext}$$

### Cas3 : orientation Est-Ouest avec (1) orienté Nord

L'orientation nord de (1) intervient sur les influences observées. En effet, une partie du sol est à l'ombre, cette obstruction ne dépend pas de la présence de (2). Donc, aucune perte thermique importante, ne pourra être décelée dans le diagramme des influences qui va suivre (cf. fig.6.14).

Nous pouvons observer que dans ce cas, les estimations d'influences, prenant en compte ( $T_m$ ) égale à la température moyenne de surface, respectent les résultats calculés.

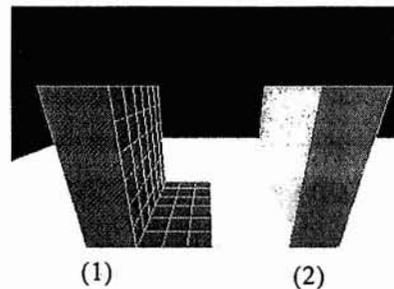


Figure 6.13 Cas 3

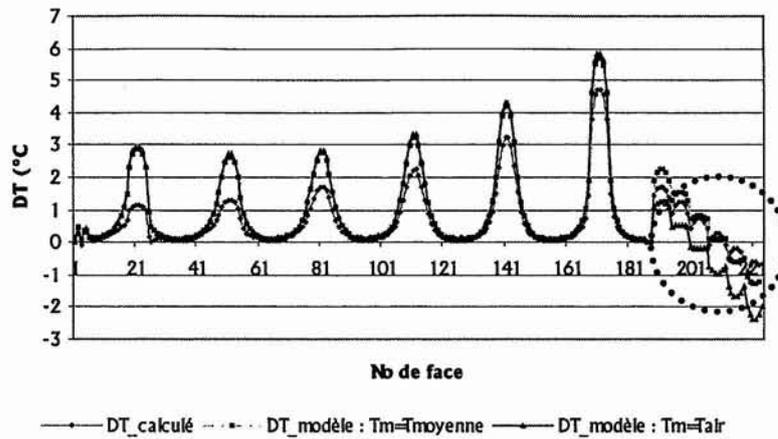


Figure 6.14 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle d'analyse des influences. Cas 3 : face (1) à l'ombre face (2) au soleil.

Les facettes inférieures de la façade (1), confrontées aux conditions de surfaces ensoleillées de (2), accusent des influences positives. Les facettes les plus hautes sont plus influencées par l'obstruction du sol que par l'apport des surfaces de (2). En effet, le sol présente des conditions solaires et thermiques bien plus importantes que celles de (2). Les surfaces les plus hautes d'une rue canyon d'égale hauteur, sont plus sensibles aux changements de conditions thermiques et solaires du sol, alors que les plus basses sont plus sensibles aux changements dus au recouvrement d'une partie du ciel. (cf. §5.3.1.2.)

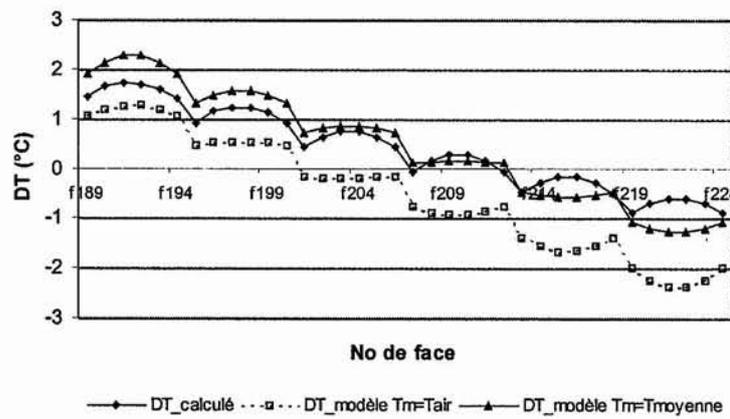


Figure 6.15 Comparaison des influences, calculées par Solene et estimées par le modèle, appliquée à la façade (1).

#### Cas4 : orientation Sud Ouest - Nord-Est, avec (1) au soleil

La présence de (2) dans ce cas, induit deux influences. La plus importante est l'obstruction du soleil, d'où les chutes de températures observées sur une partie du sol dans le diagramme de comparaison (cf.6.17).

La deuxième influence s'exerce sur les températures de la face (1). Cette influence s'effectue par contribution de la face (2) (émission et réflexion) et par obstruction d'une partie du ciel et du sol.

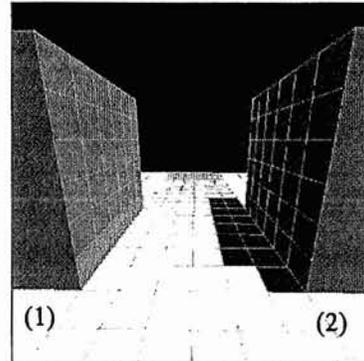


Figure 6.16 Cas 4

Les influences observées sur la face (1) sont généralement négatives. En effet, (1) étant ensoleillée, elle contribue au réchauffement de la face (2), qui se trouve à l'ombre. Le modèle nous permet de constater que la surface (1), reçoit très peu d'énergie de la part de (2), et qu'elle en perd plus par obstruction.

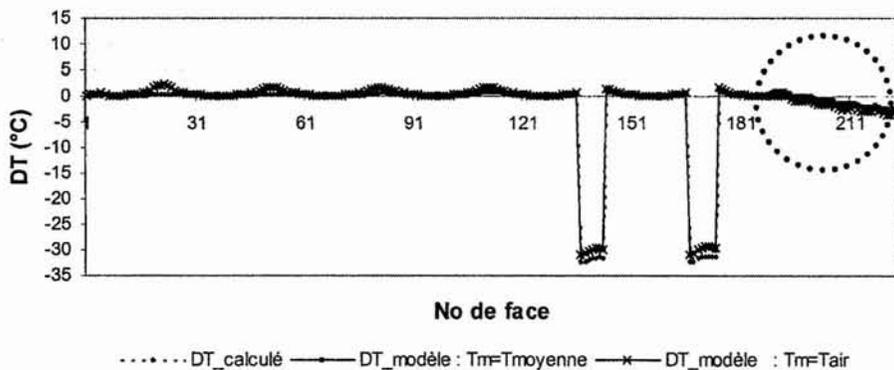


Figure 6.17 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle d'analyse des influences. Cas 4 : face (1) au soleil, face (2) à l'ombre.

Cet exemple, nous permet de réaliser, que les écarts d'estimation des influences du modèle sont moins importants pour un contraste de température entre les faces (1) et (2) plus faible. Cela en comparaison avec le cas 2.

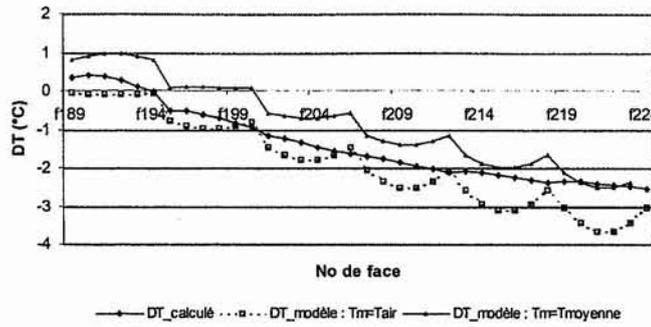


Figure 6.18 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle, appliquée à la façade (1).

### Cas 5 : Orientation Nord Ouest - Sud-Est, avec (1) à l'ombre

Il est important de noter que dans ce cas l'obstruction du soleil sur une partie du sol est indépendante de (2). Elle n'est donc pas prise en considération dans l'estimation des influences. Ce qui explique l'absence de grandes différences de températures du sol dans le diagramme des influences (cf.fig.6.20). Cet état est similaire au cas 3.

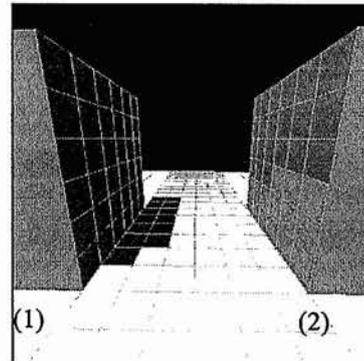


Figure 6.19 Cas 5

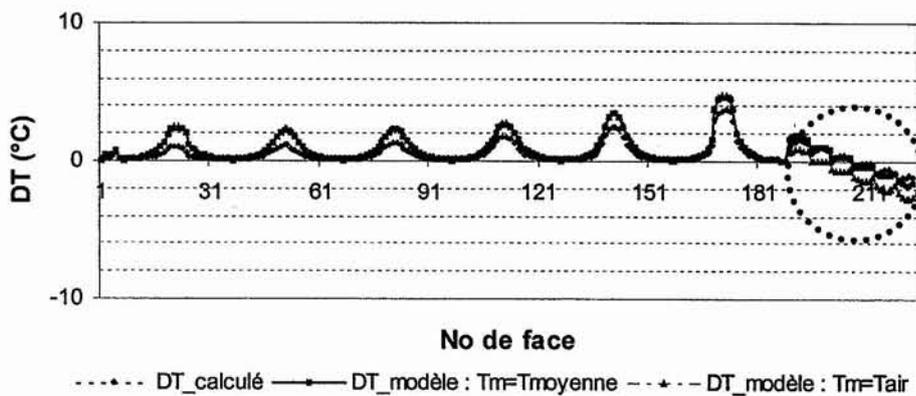


Figure 6.20 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle d'analyse des influences. Cas 5 : face (1) à l'ombre, face (2) au soleil.

Les résultats du modèle concordent, de manière satisfaisante, avec les calculs des différences de température. Nous notons cependant, une légère surestimation des pertes pour les faces en position hautes et se trouvant au milieu de la façade (1). Nous pensons que cela est dû principalement à la surestimation des influences par obstruction du sol. Car ce dernier s'étend à l'infini pour le modèle, alors que l'estimation par Solene, prend en compte le sol, dans sa forme modélisée, c'est-à-dire, limitée.

Le modèle des influences, prend en compte l'influence négative par obstruction, de toute la partie non modélisée du sol.

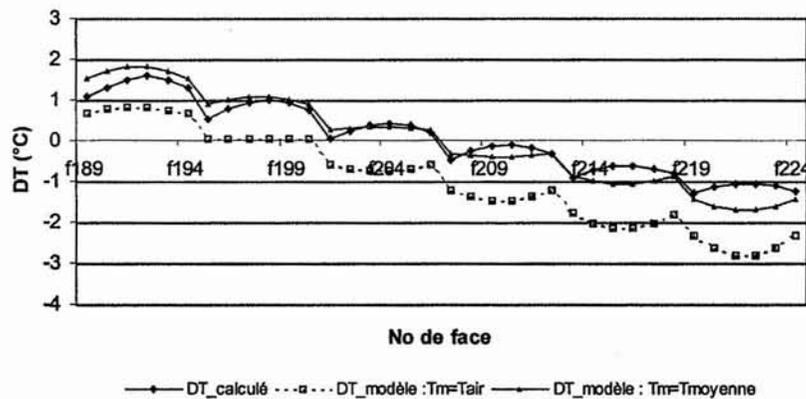


Figure 6.21 Comparaison des influences calculées et estimées par le modèle appliquée à la façade (1).

### 6.2.1.1 Synthèse

Nous avons présenté précédemment les différents cas testés. Nous avons tenté d'expliquer, les écarts observés entre les calculs de Solene et ceux du modèle d'analyse des influences. Il est important de dresser une synthèse des observations, avant d'aborder les limites du modèle.

En observant les écarts relatifs, calculés comme suit :

$$Ecart\_relatif = \frac{(T'_{r\_modèle} - T'_{r\_Solène})}{T'_{r\_Solène}} \quad (6.3)$$

$$Ecart\_relatif = \frac{(\Delta T_{r\_modèle} - \Delta T_{r\_Solène})}{T_{r\_Solène}} \quad (6.4)$$

et le tableau (6.3), il est possible de résumer les problèmes d'estimation du modèle comme suit :

- Les influences négatives, observées en haut de la face de référence, sont surestimées. Cela est peut être dû, à la considération du sol dans le modèle à l'infini, alors que Solene ne prend en compte que le sol modélisé. En effet,

l'obstruction est considérée à partir de la définition du facteur de forme entre la surface obstruante et la surface influencée.

- Suivant la situation thermique de ( $I$ ), la surestimation et la sous-estimation de ( $T_m$ ) induit respectivement la sous-estimation et la surestimation des influences.

- Ces écarts d'estimation sont plus importants pour les cas où l'élément ( $I$ ) est ensoleillé.

Il est important de noter que les ordres de grandeur des influences sont très faibles. Le modèle reste généralement fidèle dans son interprétation des impacts thermiques.

<i>Observations</i>	<i>Remarques</i>
<i>Nord Sud</i>	
Réponse satisfaisante du modèle avec $T_m = T_{moyen}$ Sous-estimation les influences pour les faces se trouvant en milieu de façade	Contraste quasi- inexistant entre $T_r$ et $T_d$ $T_m = T_{moyen} \approx T'_r \approx T_r$ - Surestimation les pertes : sol considéré à l'infini - Sous-estimation des apports
<i>Est-Ouest avec (1) orienté sud</i>	
Le modèle donne une réponse plus ou moins satisfaisante	Contraste important entre $T_r$ et $T_d$ $T'_r \gg T_d$ et $T'_{r, bas} > T'_{r, haut}$
Surestimation les influences positives pour les parties basses de (1)	- Surestimation les apports $T_m = T_{moyen} < T'_{r, haut}$ Partie basse
Sous-estime les influences pour la partie haute de (1)	Surestimation les pertes : sol considéré à l'infini $T_m = T_{moyen} > T'_{r, bas}$ Partie hausse
<i>Est Ouest (1) orienté nord</i>	
Réponse satisfaisante du modèle pour $T_m = T_{moyen}$ Surestimation les influences négatives pour la partie haute de la face	Contraste important entre $T_r$ et $T_d$ $T_m = T_{moyen} \approx T'_r \approx T_r$ - Surestimation les pertes : sol considéré à l'infini
<i>Sud Ouest Nord Est avec (1) au soleil</i>	
Réponse plus ou moins satisfaisante du modèle	$T'_r \gg T_d$ et $T'_{r, bas} > T'_{r, haut}$
Surestimation des influences pour la partie basse de (1)	$T_m = T_{moyen} > T'_r$ Partie hausse - Surestimation les apports $T_m = T_{moyen} < T'_r$ Partie basse
<i>Orientation nord ouest sud est avec (1) à l'ombre</i>	
Réponse satisfaisante du modèle pour $T_m = T_{moy}$ Surestimation des influences négatives pour les faces se trouvant en milieu et en haut de façade	$T_m = T_{moyen} \approx T'_r \approx T_r$ - Surestimation les pertes : sol considéré à l'infini

Tableau 6.3 Synthèse des observations et remarques des tests comparatifs.

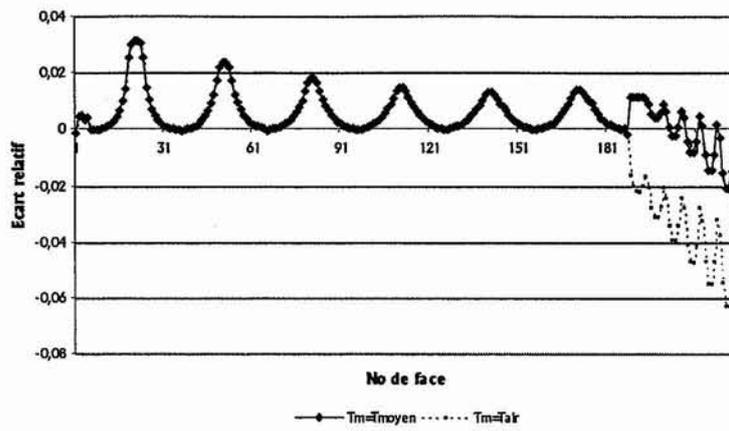


Figure 6.22 Les écarts relatifs du cas 1

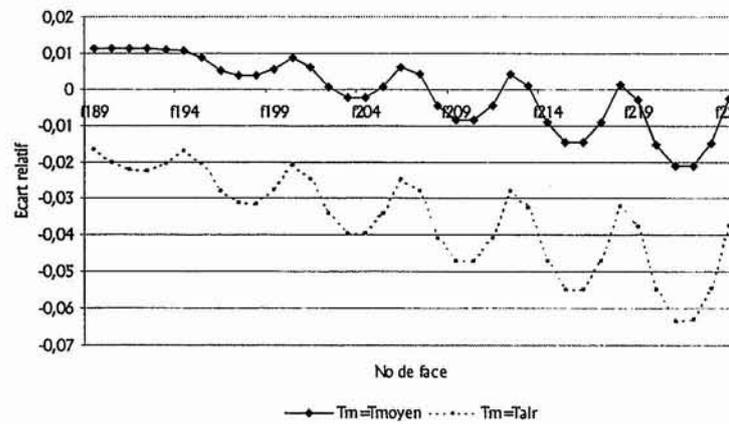


Figure 6.23 Les écarts relatifs de la façade (1) : cas 1

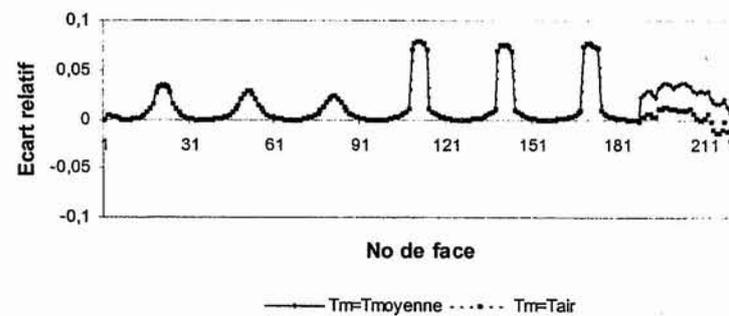


Figure 6.24 Les écarts relatifs du cas 2

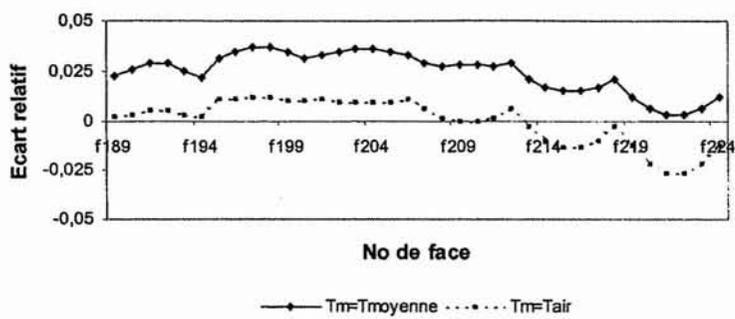


Figure 6.25 Les écarts relatifs de la façade (1) : cas 2 (faces au soleil).

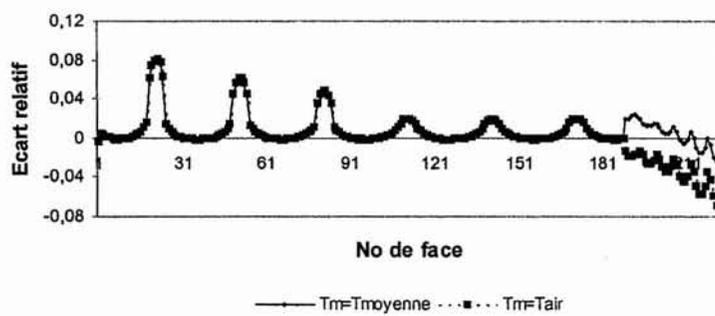


Figure 6.26 Les écarts relatifs du cas 3

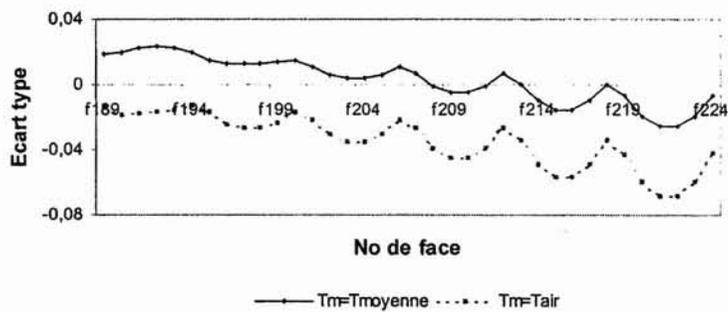


Figure 6.27 Les écarts relatifs de la façade (1) : cas 3 (faces à l'ombre).

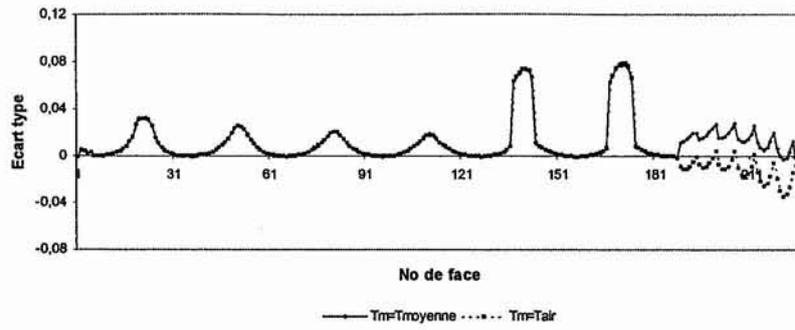


Figure 6.28 Les écarts relatifs du cas 4

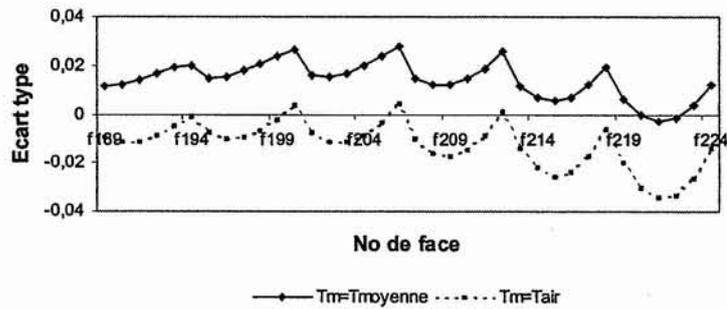


Figure 6.29 Les écarts relatifs de la façade (I) : cas 4 (faces au soleil).

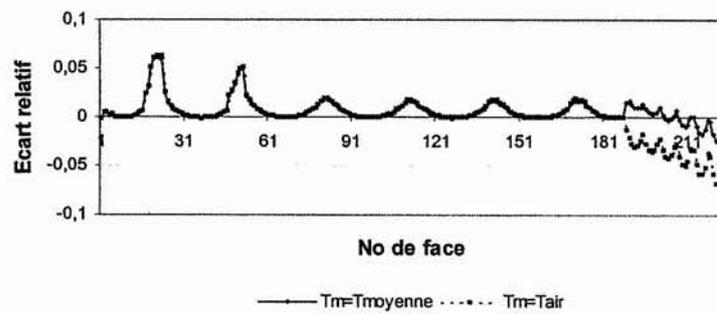


Figure 6.30 Les écarts relatifs du cas 5

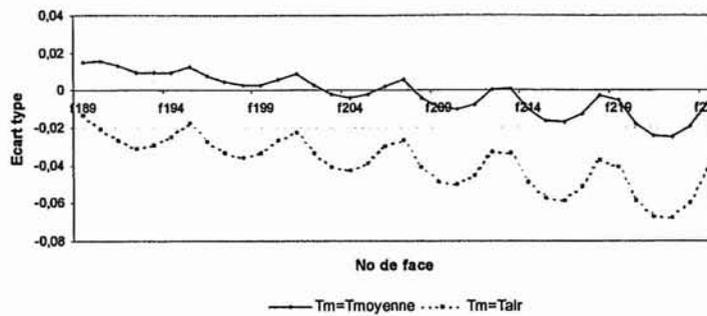


Figure 6.31 Les écarts relatifs de la façade (I) : cas5.(faces à l'ombre)

## 6.2.2 Limites du modèle

L'étude comparée des différents cas présentés, nous permet d'apprécier les limites du modèle, ainsi que quelques éléments d'incohérence qui sont principalement liés aux facteurs suivants :

- La dissymétrie du modèle

Le modèle dans sa conception numérique des influences, traite des échanges comme des phénomènes de cause à effet : dans le sens de l'influence de ( $d$ ) sur ( $r$ ). Les échanges sont cependant, des phénomènes d'interaction, où ( $r$ ) peut s'auto-influencer à travers ( $d$ ) : par réflexion, par exemple. Ainsi, l'influence de ( $r$ ) sur elle-même est considérée ici comprise dans celle de ( $d$ ).

Cette dissymétrie est réalisée par la prise en compte de la température moyenne d'évolution ( $T_m$ ) égale à la température moyenne de surface. Ceci induit les principales limites du modèle que nous présenterons dans ce qui va suivre.

Cependant, avant cela, il est important de clarifier ce que nous entendons par interaction dans notre analyse.

L'interprétation des interactions se fait en terme de gains dus à une surface et de pertes dues aux obstructions. Dans le cas d'analyse thermique d'un environnement donné, les échanges physiques entre faces peuvent induire aussi bien des pertes que des gains de chaleur. Cela s'effectue de par la seule interaction radiative entre surfaces chaudes avec d'autres plus froides. Les surfaces chaudes auraient tendance à perdre de la chaleur, tandis que les plus froides ont plutôt tendance à en gagner.

Dans une situation d'analyse, où serait comparé l'impact différencié de deux environnements différents, les gains et les pertes n'auraient plus la même signification que celle du cas précédent. Pour une meilleure interprétation des impacts, les gains et les pertes que nous mettons en relief dans le modèle, désignent des manifestations représentatives des changements d'environnement. Ces termes utilisés dans ces deux cas de figures d'interaction, peuvent amener à la confusion des deux réalités observées.

- L'estimation de la température moyenne de changement de condition thermique de ( $r$ ) :  $T_m$  induit une surestimation et une sous-estimation des influences, cela suivant la situation thermique de la surface influencée.

La prise en compte de la température de l'air comme  $T_m$ , induit généralement des erreurs plus importantes, que celles dans le cas où  $T_m$  est égale à la température moyenne de surface.

La considération de la température de l'air comme température moyenne d'évolution de celle de la surface ( $r$ ), revient à négliger les différences de température induites par la présence de ( $d$ ).

Les écarts d'estimation sont faibles pour des cas de température de surface proche de celle de l'air. Ils sont plus grands, pour des cas de température de surface importante ou d'impact importants (telle que l'obstruction solaire), qui induisent des influences plus remarquables. La prise en compte de  $T_m$  égale à la température moyenne entre les zones ensoleillées du sol et celles à l'ombre, a participé à la réduction de cet écart de manière perceptible.

- Erreurs numériques de calcul,

Les erreurs de calculs interviennent à deux niveaux : au niveau des calculs (angles entre normales, facteurs de forme, etc.) et au niveau de la somme de grandeurs numériques faibles.

Des incohérences ont été observées, quand les flux incidents sont parallèles aux faces par exemple.

Le développement numérique des relations géométriques, rend également ces deux expressions difficilement réalisables :

$$F_{ij} = F_{i(j1+j2)} = F_{i-j1} + F_{i-j2} \text{ et } \sum F_{ij} = 1 - F_{i-cl}$$

Le modèle des influences est basé, sur la somme de grandeurs numériques infiniment petites (températures et flux), qui peut mener à des erreurs qui sont proportionnelles aux nombres de facettes traitées dans une scène.

- Le fait que le sol soit limité dans sa modélisation géométrique, alors que le modèle d'analyse considère qu'il est à l'infini.

En effet, une sous-estimation des influences est observée pour les valeurs calculées sur les facettes fortement soumises aux obstructions du sol (les facettes les plus hautes).

L'une des limites également du modèle, réside dans le fait de considérer les différences d'échange radiatif, en supposant que les changements de configuration formelle induiront une différence non-significative, dans les facteurs d'échange convectif externe de la surface influencée. Ce point n'a pas été traité ici, cependant, il est important de le considérer. Afin d'y remédier, il faudrait analyser, parallèlement aux impacts radiatifs thermiques, les impacts convectifs dus principalement aux différences de comportement des

mouvements d'air en présence d'obstacle. Plusieurs cas devront être analysés, afin de mettre en forme une expression, peut être statistique, mettant en relation la direction du vent, les proportions de l'espace et la différence de vitesse et de turbulence de ce dernier. Les variations d'échanges convectifs naturels dues aux impacts radiatifs thermiques pourraient être estimées par l'introduction de l'expression du coefficient d'échange convectif, prenant en compte l'impact thermique calculé par le modèle des influences. Il s'agira de mettre en place un calcul itératif des influences radiatives thermiques, considérant comme inconnues les impacts thermiques et les échanges convectifs naturels exprimés par ces derniers.

Le modèle d'analyse des influences, repose sur des estimations de flux solaires incidents, de facteurs de forme et de températures, qui sont calculés par Solene. Ce dernier continue à faire l'objet de développements, dont l'objectif est de permettre la prise en considération des phénomènes d'inertie, et de couplage thermo-aérodynamique. Ainsi, l'estimation des influences peut reposer sur des grandeurs dont le calcul sera de plus en plus maîtrisé. Cependant, Solene a fait l'objet de très peu de validation.

### 6.3 Conclusion

Lors des tests effectués sur le modèle d'estimation des influences des questions sont posées et demeurent en suspend.

En effet, les tests ont été effectués en comparaison avec un modèle de calcul solaire et thermique (Solene) qui n'est pas encore validé. Des mesures in-situ doivent s'effectuer afin de valider, aussi bien le modèle Solène que celui du modèle d'influence. Ceci permettrait de déterminer les différentes faiblesses des deux modèles en terme de traitement géométrique et physique des phénomènes thermiques et solaires.

Les écarts obtenus, par les tests comparatifs réalisés dans ce chapitre, sont liés aux hypothèses simplificatrices considérées dans le modèle d'influence. Ces simplifications induisent :

- la dissymétrie du modèle ; c'est-à-dire que ce dernier considère les influences dans l'équation de bilan orientées dans le sens où ( $d$ ) agit sur ( $r$ ) mais pas dans l'autre. La face ( $r$ ) considérée comme réceptrice est également distributrice.
- le problème de l'estimation de la température moyenne d'évolution :  $T_m = (T_r - T_d) / 2$  que pose la dissymétrie du modèle
- la somme de grandeurs numériques très faibles qui favorisent l'accumulation des erreurs.

En terme, d'observation des influences, et leur relation avec la configuration géométrique du lieu, le modèle reste fidèle de manière générale aux interprétations. Cependant, les phénomènes d'inertie et d'échanges convectifs restent à développer.

## **Conclusion et perspectives**



## **Éléments de conclusion**

La prise en compte des phénomènes climatiques en milieux urbains, peut s'effectuer par plusieurs moyens :

- la simulation, qui permet de prédire les conditions environnementales,
- les mesures, qui permettent de les vérifier,
- les savoirs empiriques (résultant de l'observation et de l'expérience) et scientifiques.

La nature de chacun de ces moyens, implique une utilisation particulière dans le processus du projet. Ce processus passe par les phases de réflexion, de décision, et de réalisation souvent de façon non-linéaire. La mesure et la simulation ne sont pas pertinentes en phase de premières réflexions, où seulement quelques grandes lignes d'intervention sont esquissées. Elles ne peuvent être effectuées que sur environnement physique déterminé, alors que ce dernier, se révèle au départ, plutôt flou. Les savoirs, quant à eux, peuvent permettre d'intégrer les phénomènes physiques environnementaux très tôt dans l'approche réflexive et conceptuelle.

Les outils de simulation climatique, de plus en plus complexes et performants, permettent de décrire les situations climatiques de manière localisée. Ils sont plus adaptés à l'analyse d'une proposition de mise en forme, qui justifierait une investigation lourde et pointue.

La réflexion sur l'introduction de la simulation, dans les premières phases de la conception, mène vers deux investigations primordiales :

- développement d'outils très souples (du point de vue de la complexité et du nombre de paramètres à introduire et de la lourdeur des calculs) afin de permettre de travailler de manière interactive entre propositions formelles et effets environnementaux climatiques,
- développement d'une interface ciblée vers des utilisateurs non-avertis. Des outils qui doivent être compréhensibles et simples d'utilisation.

Un certain nombre de questions reste d'actualité, à propos de la mise à la disposition des professionnels, des outils de simulation. Ces questions sont liées à :

- l'utilité et l'intégration d'un outil de simulation pendant le processus du projet,
- la définition du type d'utilisateur : averti ou non-averti ?

Dans le cadre de cette recherche, nous nous positionnons principalement dans la perspective de construction de connaissances microclimatiques urbaines.

Cependant, nous avons répondu dans ce présent rapport, à la question d'aide du concepteur à la prise en compte des aspects climatiques dans la conception urbaine que partiellement. En effet, la quasi-absence de connaissances sur le rapport entre proposition urbaine et impact thermique particulièrement pour les phénomènes radiatifs oriente notre étude vers la proposition de méthode et modèle nous permettant de les analyser.

Les effets radiatifs urbains définissent des comportements physiques mettant en relation les configurations spatiales et le degré d'échange thermique radiatif. La méthode proposée dans ce rapport, participe à la réflexion sur le développement de répertoires d'effets climatiques et de paramètres qui aideraient à la prise en compte des phénomènes microclimatiques. Ces paramètres qui peuvent être aussi bien des figures d'effets que des indicateurs d'effets, permettraient au concepteur, de comprendre et de mieux contrôler les manifestations climatiques caractéristiques d'un espace donné.

L'objectif de cette recherche, réside dans la modélisation d'une démarche d'analyse du rapport entre phénomènes physiques et formes urbaines. L'intérêt de cette étude est de permettre de dépasser la description des effets climatiques (températures d'air, températures de surface, etc.), et de pouvoir, en dehors de la situation des effets locaux, définir leurs causes.

Ainsi, par le modèle, il s'agit de permettre des études pertinentes, qui aideront à dégager des effets radiatifs et pourquoi pas jusqu'à permettre la proposition d'indications ou de prescriptions pour l'amélioration des conditions climatiques.

Nous pensons que ce type de démarche, reposant sur la modélisation d'une approche explicative -ici proposée pour les aspects radiatifs- pourrait être également appropriée à l'étude du confort et des aspects climatiques intégrant des phénomènes plus complexes (humidité, végétation, ...).

Le modèle que nous avons nommé *modèle d'analyse des influences*, est basé sur la construction d'une expression relationnelle des différentes manifestations exprimées en effets reconnaissables et identifiables concrètement par le concepteur. Ces effets résultent de l'interaction des facteurs radiatifs et du cadre bâti. Ils sont identifiés physiquement par des pertes et des gains, et spatialement par l'occultation de l'environnement de référence et par sa substitution.

En effet, l'analyse d'impact repose sur la comparaison de deux situations thermiques : une situation urbaine donnée comparée à une autre, prise comme référence, souvent définie par celle de rase campagne.

Les facteurs intervenant dans la caractérisation radiative des impacts sont : les surfaces, le ciel et le soleil. Ces manifestations sont exprimées de manière

relative, et définissent le degré d'influence d'une transformation physique d'un milieu urbain. Les types d'influences ressortis se caractérisent soit par leurs aspects positifs (apports, contributions) ou négatifs (pertes). Ils s'expriment également en terme de bilan ou bien d'influence isolée d'un paramètre physique climatique. Ces influences nous permettent de déterminer la nature et le degré d'impact de l'urbain et son implication dans la définition radiative et thermique des surfaces.

L'analyse d'impact repose également, sur la définition de grandeurs physiques ou géométriques qui expriment cette évolution de situation radiative ; entre situation de référence et situation urbaine analysée. Certaines grandeurs expriment l'impact thermique par la différence de température subie par une surface et occasionnée par le changement d'environnement urbain. D'autres tentent de définir une situation physique ou spatiale à partir de laquelle, nous pourrions considérer une influence radiative négligeable ou suffisante. Ainsi sont définis les facteurs de forme limites, les albédos limites, etc.

Ces grandeurs nous permettent de délimiter une zone d'influence, que nous définissons par une aire spatiale regroupant les faces qui ont une influence dite effective sur une face de référence.

L'application de cette analyse à des configurations urbaines existantes (Place du Piloni) ou théoriques, nous a permis d'illustrer les différentes interprétations des impacts climatiques urbains qui en découlent. Ceci nous a permis également d'esquisser quelques formes d'impact radiatif, mettant en relief le rôle joué par la situation physique et spatiale d'une surface. La situation radiative et thermique d'une surface est le facteur le plus important dans la définition des influences. Les réflectivités et absorptivités des surfaces restent des facteurs modifiants et non déterminants des impacts radiatifs thermiques. Deux caractéristiques géométriques d'un espace sont à observer afin de mettre en relief les relations entre formes urbaines et impacts : ouverture/ fermeture de l'espace. En effet, ces derniers ont une influence sur l'accessibilité solaire des espaces urbains et sur l'intensité des échanges radiatifs thermiques. L'accessibilité solaire définit le rapport entre zone influente (au soleil) et influencée (à l'ombre). Les impacts radiatifs dépendent des différences de qualités thermiques et radiatives entre environnement influent urbain et celui substitué (le sol, le ciel, le soleil).

Nous soulignons cependant, que la mise en relief de figures d'effet, repose sur la définition de formes d'interaction radiative caractéristiques et récurrentes. Ceci demande une analyse poussée des impacts, appliquée à des formes spatiales et climatiques variées et pertinentes.

La mise en exergue des relations entre phénomènes physiques et impacts radiatifs de la forme urbaine, n'était possible que par l'application d'une démarche favorisant le traitement qualitatif, plutôt que quantitatif précis des influences. Ceci constitue la limite principale du modèle défini. Afin de vérifier la fiabilité d'interprétation des phénomènes d'impacts observés, nous avons effectué, à défaut de validation in-situ, des tests comparatifs entre nos résultats

et ceux calculés par Solene. Ces tests nous ont permis de constater, de manière générale, un respect des phénomènes physiques rencontrés en milieu urbain. Cependant, nous posons quelques limites du modèle définies principalement par sa dissymétrie. Ceci est lié au fait qu'on considère une influence unidirectionnelle entre une surface réceptrice et distributrice, ou entre surface influencée et influente. Ces limites sont définies principalement, par la détermination de la température moyenne d'évolution  $T_m$  dans une scène donnée.

Nous posons les problèmes de la validation in-situ, qui dépendent principalement de la mesure d'impact. Les propositions formulées, seront à mettre en œuvre dans le long et le moyen terme.

Le modèle développé, jusqu'à présent, prend en compte certains paramètres qui pourraient faire l'objet de meilleurs développements. C'est en partie, ce que nous proposerons dans la formulation ci-après de quelques perspectives de recherche. Nous tenterons également, de proposer l'introduction des impacts convectifs dans le modèle. Son éventuelle utilisation, pour l'analyse des impacts thermiques urbains sur le confort, est également envisagée.

## **Perspectives de recherche**

Quatre principales perspectives de recherche sont proposées ici. La première tentera de répondre aux principales limites de cette recherche, et mettre en place les développements nécessaires à son évolution. Deux autres perspectives tentent d'intégrer le modèle développé dans l'étude du confort et l'aide à la proposition formelle d'un projet urbain. La dernière proposition qui clot ce rapport, soulève les questions relatives à l'utilisabilité et l'interprétabilité des descripteurs d'impact et climatique, et les investigations nécessaires à leur développement.

### **Développement du modèle d'analyse**

L'estimation des influences, telle qu'elle est développée actuellement, soulève trois limites principales qui peuvent faire l'objet de développement :

- les températures de surfaces qui n'intègrent pas les phénomènes d'inertie et de couplage thermo-aéraulique,
- la prise en considération des variations des échanges convectifs en présence de ( $d$ ),
- l'intégration du végétal et de la chaleur latente dans le bilan des influences.

Solene effectue des calculs de température de surface en régime permanent. Ces estimations n'intégrant pas le phénomène d'inertie, prennent en compte des paramètres d'échange convectif et cela de manière non-homogène dans une scène géométrique donnée. Cela s'effectue par deux estimations distinctes entre les outils de simulation thermique et ceux de la mécanique des fluides. Les

développements de Solene se concentrent sur l'amélioration de deux limites du logiciel : inertie, couplage thermo-aéroulrique (Vinet 1998).

Il est possible d'intégrer l'impact de la chaleur latente dans le modèle développé, en définissant l'effet énergétique du milieu végétal et de l'humidité. Le milieu végétal et les points d'eau peuvent être intégrés également comme des surfaces ayant des températures spécifiques ou supposées proches de celle de l'air.

Tous ces développements nécessiteraient des tests de validation qui permettront la mise en relief de la pertinence de ce type d'outil, en terme d'interprétation des impacts.

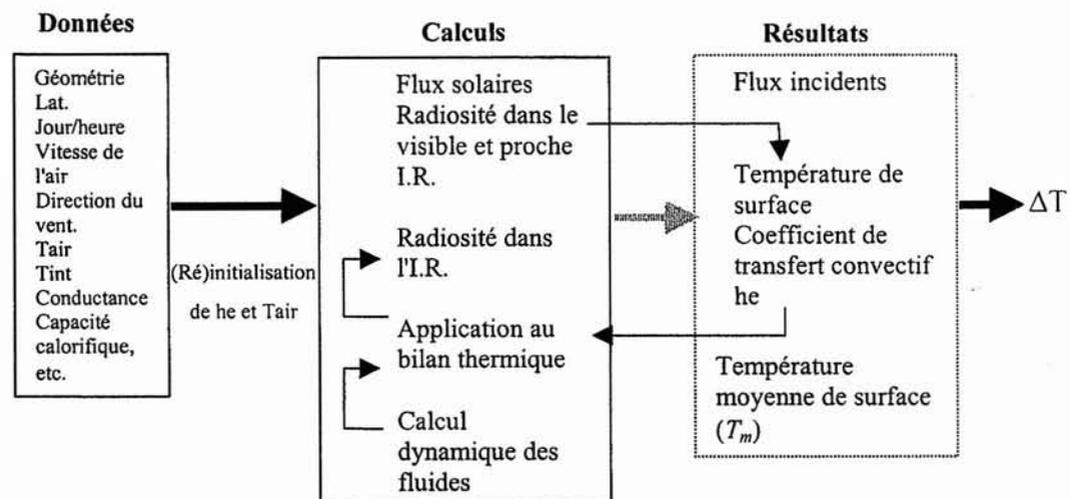


Figure 0.1 Perspectives d'amélioration des calculs du modèle des influences.

La recherche présentée ici, se concentre principalement sur l'analyse des influences radiatives en considérant les influences convectives négligeables. Cependant, il est important de considérer les différences de comportements convectifs dues aux impacts des formes urbaines par la prise en compte :

- des différences de température entre l'air et la surface (particulièrement dans des conditions d'obstruction solaire),
- des différences de mouvement d'air que les formes urbaines peuvent occasionner.

Les différences d'échange convectif naturel existantes entre une situation de référence et une autre urbanisée, ne sont pas négligeables particulièrement quand la surface subit une importante variation de température.

L'introduction de la variation des échanges convectifs reposera principalement sur l'expression des impacts convectifs dans le bilan des influences (cf.§6.2.2 ).

$$\Delta T_{r\_d\_total} = \Delta T_{conv} + \Delta T_{r\_d} - \Delta T_{r\_env} - \Delta T_{r\_soleil} - \Delta T_{r\_ciel}$$

Le nouveau terme  $\Delta T_{conv}$  peut être défini à partir des  $\Delta he_{rad}$ ,  $\Delta he_{forcé}$ .  $\Delta he_{rad}$  considèrera  $\Delta T_{r\_d\_total}$  par la mise en place d'un calcul réitéré entre une première estimation de ce dernier paramètre et la réinitialisation des coefficients d'échange. L'expression des changements de comportement convectif forcé sera plus complexe, car plusieurs paramètres interviennent, notamment les changements de direction, de vitesse du vent, etc. Il s'agit d'étudier la possibilité d'une expression simplifiée, peut être statistique, exprimant les différences de comportement convectif, suivant l'orientation et les proportions d'une configuration urbaine donnée par rapport à la direction et la vitesse du vent.

Intégration du confort dans le modèle d'analyse des influences

Afin de tester l'impact qualitatif sur la perception des ambiances thermiques climatiques, il est important d'intégrer les conditions de confort extérieur.

Le modèle met en exergue les différences de températures de surface dues aux changements de l'environnement physique de l'espace urbain. Nous pouvons également parler, des différences de conditions de confort que peut induire la variation des températures de surface. Ces variations sont exprimées par les impacts ou les influences thermiques et radiatives.

Nous pourrions distinguer la différence de température moyenne radiante qui est égale à :

$$\Delta T_{mrt}^* = T'_{mrt} - T_{mrt} = f(F_{si}, \Delta T_i, T_i')$$

et qui exprime l'impact d'une configuration sur la température moyenne radiante.

L'impact peut être défini en terme de différence de température due à la présence de bâtiment, ou due à l'obstruction du ciel, du sol et même du soleil, qui interviendrait en premier lieu sur les températures de surface et par delà sur la perception du confort.

Ainsi, il sera possible de déduire un  $\Delta PMV$  en fonction de  $\Delta T_{mrt}$  et  $\Delta \phi$  ou de  $\Delta OUT\_SET^*$  ( $\Delta T_{mrt}$ ,  $\Delta \phi$ ).

$\Delta \phi$  serait la différence de flux de courte longueur d'onde atteignant un individu. Elle est due à l'impact d'un environnement donné par rapport à un environnement dit de référence. Nous pourrions par exemple comparer la situation de confort en rase campagne par rapport à celle en milieu urbain.

Ce modèle d'analyse nous permettra de définir de manière locale, les raisons d'inconfort.

Cependant, la question de la définition du niveau de confort, en milieu extérieur, reste toujours posée.

## Proposition formelle à partir de la contrainte d'influence radiative thermique

Nous avons défini, parmi les descripteurs des influences radiatives thermique, le facteur de forme limite. Ce dernier est estimé à partir des caractéristiques d'influence radiative thermique des surfaces. En effet, il constitue la valeur minimale, à partir de laquelle une influence ne dépasserait pas une valeur seuil ( $\Delta T_{rd\_seuil}$ ). Par la spécificité géométrique de la définition des facteurs de forme (surfaces, angles solides et distances), il est possible de proposer une approche déclarative (Siret 1997), permettant à partir de la valeur du facteur de forme limite, de proposer de nouvelles dispositions de constructions respectant une influence seuil. Cette dernière sera définie soit par des critères de confort ( $\Delta PMV$ ,  $\Delta OUT\_SET^*$ ) ou par des critères d'îlot de chaleur ( $\Delta T_{urbain\_rural}$ ). La nouvelle géométrie peut être définie à partir des nouvelles distances ou orientations entre facettes, que peut exprimer une valeur de facteur de forme. La valeur limite des facteurs de forme dépendra de la définition de l'influence limite, c'est-à-dire, qu'il faudra définir la limite thermique à partir de laquelle nous pouvons affirmer que la situation thermique engendrée sera inconfortable ou induira des phénomènes d'îlot de chaleur.

## Développement de descripteurs climatiques urbains

L'analyse microclimatique urbaine dépend de la définition de descripteurs ou d'indicateurs qui permettraient d'évaluer une situation donnée. Nous avons discuté de l'interprétabilité des descripteurs développés dans le cadre d'évaluation d'impacts radiatifs.

Cependant une investigation plus poussée permettrait de définir un tableau de bord d'indicateurs climatiques qui auront comme rôle :

- d'observation et de diagnostics,
- d'analyse et de contrôle,
- d'aide à la décision.

La prise en compte des phénomènes climatiques par la définition d'indicateurs environnementaux climatiques, nous permettra de communiquer simplement et de manière plus pertinente les préoccupations climatiques.

La prise en compte actuelle des phénomènes environnementaux, s'effectue dans les études d'impacts. Ces dossiers sont nécessaires au contrôle environnemental d'un projet. Les études d'impacts lors de la présentation de l'étude d'instruction des projets d'aménagement recouvrent les transformations qui peuvent affecter les espaces naturels, la qualité de l'air, et la modification du paysage, c'est-à-dire toutes questions rentrant dans le cadre de la limitation des nuisances et de l'amélioration des cadres de vie.

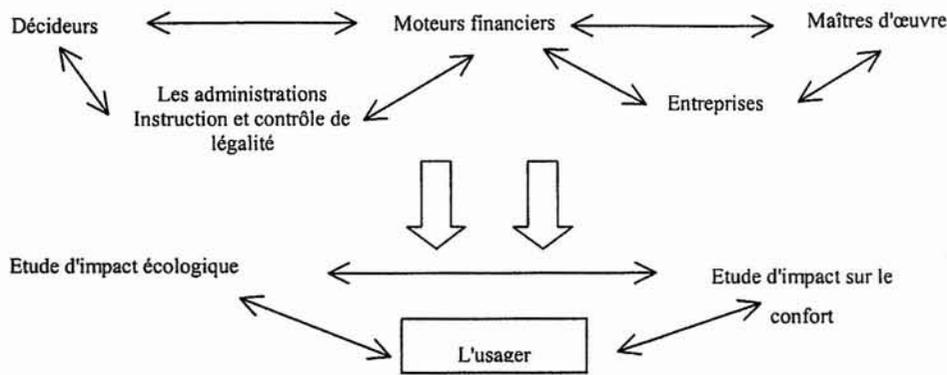


Figure 0.2 Schéma relationnel entre les différents moteurs du projet

Il existe deux grands types d'indicateurs (Dequiedt 1996), suivant le domaine auquel il est destiné :

- Indicateurs de suivi opérationnel : destinés au suivi d'action ou d'état d'un système. Ce sont des données quantitatives proches du phénomène de base.
- Indicateurs de pilotage destinés aux acteurs du projet qui permettent de :
  - Suivre les stratégies et de juger de leur efficacité,
  - Ajuster et réorienter.

Les principales caractéristiques des indicateurs définies par l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) sont : la représentativité, la réutilisabilité, l'accessibilité, l'intégration et la cohérence par rapport aux objectifs définis.

Les descripteurs climatiques à développer, auront une expression et une interprétation différente suivant le domaine et l'objectif visé par le milieu de la pratique et celui de la recherche urbaine. Afin de pouvoir communiquer entre ces deux domaines, il est important de développer l'interface entre les indicateurs climatiques physiques et les indicateurs de pilotage.

Domaine d'interaction	Recherche scientifique	Interface	Acteurs du projet
Indicateurs	Indicateurs de suivi opérationnel Quantitatifs	Représentation	Indicateurs de pilotage Qualitatifs
États observés	Phénomènes physiques et milieux	Aspects subjectifs et socio-économiques	Appréciation du lieu ou de l'état
Objectifs	De connaissance, de diagnostics	Interprétation des prédictions d'impacts et des types d'intervention	Aide à la décision

Tableau 1 Types d'indicateurs

Cette proposition de recherche a pour objectifs :

- En premier lieu, de mettre en place un tableau de bord d'indicateurs climatiques physiques qui traduirait de manière plus synthétique et ciblée :

- les phénomènes physiques climatiques qui permettent de définir les phénomènes thermiques, aérauliques, hygrométriques et radiatifs de manière plus pertinente et plus ciblée vers les aspects de confort ou de phénomènes d'îlot de chaleur.
- le confort en milieu extérieur, qui permet de situer les zones thermiques critiques.
- les degrés d'influence et d'intervention de chaque phénomène climatique, dans la caractérisation thermique de l'espace et du confort hygrométrique. Ils permettront de définir les acteurs les plus importants dans les ambiances climatiques d'un espace donné. Les indicateurs d'influence peuvent permettre également de cerner la stratégie d'action et de contrôle des phénomènes climatiques.

<b>INDICATEURS</b>		
Diagnostics	Contrôle	Décision
<p>Détermination des états environnementaux exp. Climatique.</p>	<p><b>Analyse:</b> Détermination des acteurs principaux de la dégradation environnementale</p> <p><b>Contrôle et maîtrise :</b> Détermination et estimation des évolutions éventuelles à partir de transformations locales. Mesures des écarts de situations entre les situations avant et après</p>	<p>Analyse de faisabilité et de pertinence : Socio-économique et environnementale.</p>

Tableau 2 Synthèses des différents types d'indicateurs et leurs rôles.

Il s'agira également de promouvoir des outils qui pourraient, de manière simplifiée et interactive, estimer les grandeurs exprimant ces indicateurs, ainsi pouvoir tester l'efficacité d'un dispositif architectural et urbain du point de vue de la maîtrise des impacts climatiques.

- En deuxième lieu, d'aborder la question de la représentativité spatiale et physique de ces indicateurs dans le cadre de la pratique et de la prise de décision architecturale et urbaine. Il s'agit de favoriser la construction d'indicateurs de pilotage ou de méthode de qualification et de représentation des ambiances climatiques. La mise à l'épreuve de différents types de représentations qualitatives des ambiances climatiques, dans le champ de la pratique urbaine, sera primordiale.

Ces deux axes imposent la définition des rôles, enjeux et intérêts des acteurs du projet par rapport aux aspects climatiques. Il s'agit de mieux cibler les moyens de communication des phénomènes climatiques, à travers des aspects concrets du projet tels que : les conditions d'usage de l'espace, la qualité du site, etc.

Ils imposent également la mise en relation des conditions de confort avec les enjeux économiques et sociaux d'un projet. En dehors d'une définition des indicateurs climatiques, il est important de les tester et de les mettre en œuvre dans des projets urbains. Une collaboration avec les collectivités locales sera nécessaire.

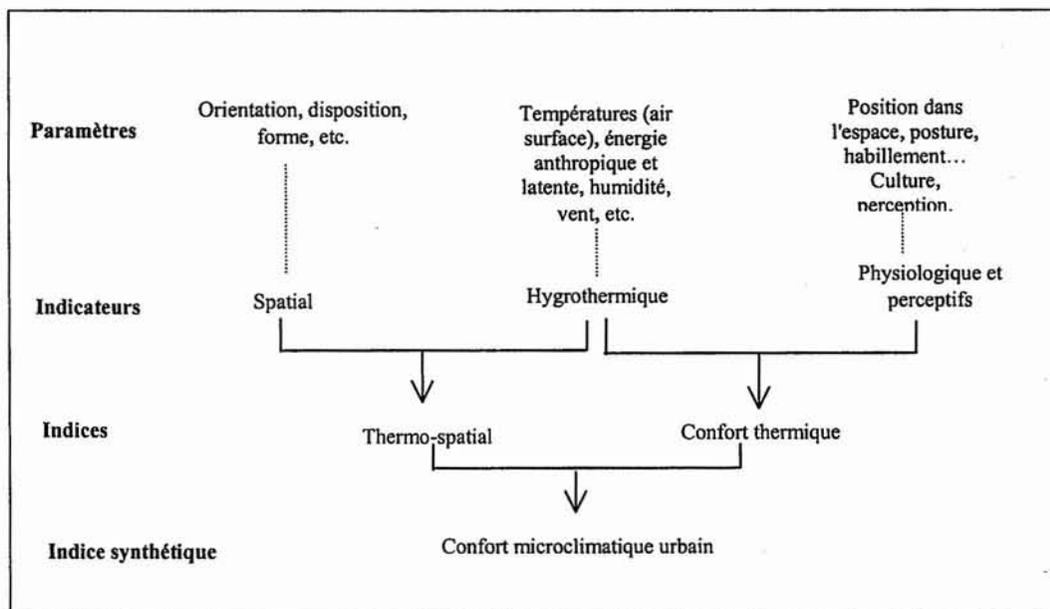


Tableau 3 La définition d'indicateurs synthétiques microclimatiques

## Nomenclature



## Chapitre 2

$A_r$	surface radiative effective du corps ( $m^2$ ),
$A_{Du}$	surface du corps calculée suivant l'expression de Du Bois ( $m^2$ )
$A_{eff}$	surface radiante effective du corps habillé égale à $0.7 f_{cl} A_{Du}$ ( $m^2$ )
$A_p$	surface du corps habillé projetée sur un plan perpendiculaire aux flux incidents ( $m^2$ )
$C$	pertes par convection ( $Wm^{-2}$ )
$C_{res}$	pertes par respiration ( $Wm^{-2}$ )
$C^*$	nouvelle expression des échanges convectifs
$C_p$	capacité calorifique ( $J/KgK$ )
$CLO$	courtes longueurs d'onde
$e$	pression de vapeur d'eau (Pa)
$D_{(\alpha,\beta)}$	rayonnement diffus dans la direction $(\alpha,\beta)$ du soleil ( $Wm^{-2}$ )
$D$	rayonnement solaire diffus ( $Wm^{-2}$ )
$D_p$	rayonnement diffus reçu effectivement ( $Wm^{-2}$ )
$E$	pertes par évaporation ( $Wm^{-2}$ )
$E_{is}$	perte par diffusion de vapeur à travers la peau ( $Wm^{-2}$ )
$E_{sw}$	perte due à la sudation ( $Wm^{-2}$ )
$E_{res}$	pertes par évaporation due à la respiration ( $Wm^{-2}$ )
$ET$	température effective ( $^{\circ}C$ )
$ET^*$	nouvelle température effective ( $^{\circ}C$ )
$F$	efficacité de refroidissement de la sueur (sans dimension).
$F_{si}$	facteur de forme entre le corps et la surface d'indice $i$ (sans dimension)
$F_{ciel}$	facteur d'angle entre le corps et le ciel (sans dimension)
$F_{pf}$	facteur de forme entre une surface plane se trouvant au point testé et la fenêtre.
$f_{cl}$	facteur de surface de vêture, est égal au rapport de la surface extérieure de la personne vêtue sur la surface du corps nu
$f_{eff}$	facteur de surface effective de rayonnement
$f_p$	facteur de surface projetée
$g$	accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ )
$GLO$	grandes longueurs d'onde
$h_{cg}$	coefficient de transfert convectif pour une sphère ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )
$h_r$	coefficient d'échange radiatif ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )
$h$	coefficient d'échange convectif ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )
$I$	rayonnement direct de courte longueur d'onde reçu sur une surface perpendiculaire aux rayons ( $Wm^{-2}$ )
$I_N$	flux solaire normal incident ( $Wm^{-2}$ )
$I_{cl}$	résistance thermique du vêtement (sans dimension)

$L\downarrow, L$	rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde ( $Wm^{-2}$ )
$L_i$ et $Li\downarrow$	rayonnement de grandes longueurs d'onde reçu par la surface d'indice i ( $Wm^{-2}$ )
$L_i\uparrow$	rayonnement de grandes longueurs d'onde émise par la surface d'indice i ( $Wm^{-2}$ )
$L^*$	bilan radiatif de grandes longueurs d'onde ( $Wm^{-2}$ )
$K\downarrow$	flux de courtes longueurs d'onde reçu par une surface ( $Wm^{-2}$ )
$K\uparrow$	rayonnement de courtes longueurs d'onde émise par la surface d'indice i ( $Wm^{-2}$ )
$K^*$	bilan radiatif de courtes longueurs d'onde ( $Wm^{-2}$ )
$K_{cl}$ et $a$	coefficients dépendant de la tenue vestimentaire
$K_{pe}$	coefficient dépendant de la position et du site
$M$	métabolisme, la chaleur produite par le corps ( $Wm^{-2}$ )
$n$	rendement métabolique
PET	<i>Physiologically Equivalent Temperature</i> ( $^{\circ}C$ )
$Q$	changement de la quantité de chaleur du corps ( $Wm^{-2}$ )
$Q_{conv}$	chaleur transmise par convection radiatif ( $Wm^{-2}$ )
$Q_{cond}$	chaleur transmise par conduction radiatif ( $Wm^{-2}$ )
$Q_E$	chaleur latente nécessaire à l'évaporation ou à la condensation ( $Wm^{-2}$ )
$Q_G$	chaleur transmise par conduction radiatif ( $Wm^{-2}$ )
$Q_H$	chaleur transmise par mouvement d'air radiatif ( $Wm^{-2}$ )
$Q_{rad}, Q^*$	bilan radiatif ( $Wm^{-2}$ )
$Q$	bilan énergétique ( $Wm^{-2}$ )
$R$	pertes radiatives ( $Wm^{-2}$ )
$R^*$	nouvelles expression des échanges par rayonnement
$R\downarrow$	rayonnement de grandes longueurs d'onde réfléchi ( $Wm^{-2}$ )
$R_{i\_env}$	rayonnement solaire réfléchi par la surface d'indice i ( $Wm^{-2}$ )
$R_{env\_i}$	rayonnement solaire réfléchi par l'environnement et reçu par la surface d'indice i ( $Wm^{-2}$ )
RT	température résultante de Missenard ( $^{\circ}C$ )
$S$	taux de sudation requis ou équivalent ( $Wm^{-2}$ )
$S\downarrow$	rayonnement solaire direct incident ( $Wm^{-2}$ )
$S_{str}$	densité de flux moyenne absorbée par le corps ( $Wm^{-2}$ )
$S_1, S_2$	surfaces des éléments 1 et 2.
SET	température effective standard ( $^{\circ}C$ )
SET*	nouvelle température effective standardisée ( $^{\circ}C$ )
$T_{air}$	température de l'air ( $^{\circ}C$ ou K)
$T_s$	température équivalente du ciel ( $^{\circ}C$ ou K)
$T_c$	température des surfaces de la pièce non chauffée ( $^{\circ}C$ )
$T_{cl}$	température moyenne de surface de la personne vêtue ( $^{\circ}C$ )
$T_{cl}^*$	nouvelle expression de la température du vêtement ( $^{\circ}C$ )
$T_{corps}$	température du corps ( $^{\circ}C$ )
$T_f$	température de la fenêtre ( $^{\circ}C$ )

$T_g$	température de globe (°C ou K)
$T_i$	température de la surface d'indice i (°C ou K)
$T_{mrt}$	température moyenne rayonnante de l'ambiance (°C ou K)
$t_{mrt}$	température radiante moyenne (°C)
$T_s$	température de la peau (°C ou K)
$T_{s\_ext}$	température de la surface externe de la paroi (°C)
$T_u$	température de la surface chauffée (°C)
$T_v$	vecteur de température radiante
$v, vm$	vitesse (moyenne) de l'air (m/s)
$W_i$	facteur de pondération des flux mesurés
$W$	énergie métabolique transformée en travail mécanique ( $Wm^{-2}$ )
$\alpha$	angle azimut mesuré sur un plan horizontal par rapport à la direction entre le corps et le flux (degrés°)
$\alpha_{cl}$	réflectivité du vêtement (sans dimension)
$\alpha_{CLOi}$	coefficient de réflexion de courtes longueurs d'onde de la surface d'indice i (sans dimension)
$\alpha_{GLOi}$	coefficient de réflexion de grandes longueurs d'onde de la surface d'indice i (sans dimension)
$\alpha_{sol}$	réflectivité solaire du sol (sans dimension)
$\beta$	hauteur angulaire mesurée par rapport à une surface horizontale et la source (degrés°).
$\delta$	coefficient de dilatation volumique ( $K^{-1}$ )
$\Delta R_{CLO}$	échanges radiatifs de courtes longueurs d'onde
$\Delta R_{GLO}$	échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde
$\epsilon$	émissivité de la peau (sans dimension)
$\epsilon_{ciel}$	émissivité du ciel
$\epsilon_{sol}$	émissivité du sol
$\epsilon_{corps}$	émissivité du corps
$\epsilon_i$	émissivité de la surface d'indice i (sans dimension)
$\phi$	flux solaire incident ( $W/m^2$ )
$E_{I2}$	flux émis par $S_1$ et qui atteint $S_2$ (W)
$E_I$	flux total émis par $S_1$ (W)
$\phi_{I2}$	densité de flux émis par $S_1$ et qui atteint $S_2$ ( $Wm^{-2}$ )
$\phi_I$	densité de flux émis par $S_1$ ( $Wm^{-2}$ )
$\mu$	masse volumique ( $Kg/m^3$ )
$\lambda$	conductivité thermique ( $W/mK$ )
$\theta 1$ et $\theta 2$	angles entre normales
$\rho_{CLO}$	coefficient d'absorption solaire du corps habillé (sans dimension)
$\rho_{GLO}$	coefficient d'absorption thermique du corps habillé (sans dimension)
$\rho_{sk}$	absorptivité de la peau

$\rho_{cl}$	absorptivité du vêtement
$\tau_{cl}$	transmittivité du vêtement
$\tau$	transmittivité
$\nu$	viscosité (Kg/ms)

### Coordonnées solaires

$\gamma$	angle entre normale du plan récepteur avec celui du méridien
$a$	azimut
$h$	hauteur
$i$	angle entre le plan formé par la normale et le plan récepteur
$\varphi$	latitude du lieu
$\delta$	déclinaison solaire
$AH$	angle horaire

### Chapitre 3,4,5,6

$c$	coefficient d'échange intérieur : $c = \frac{1}{\frac{x}{\lambda} + \frac{1}{h_{int}}}$ (W/m <sup>2</sup> K)
$c_r, c_{ri}$	conductance des paroi ( $r$ ) et ( $d$ )
$D_s \downarrow$	flux solaire diffus incident
$F$	facteur de forme
$F_{limit}$	facteur de forme limite
$F_{r,d}$	facteur de forme entre les surfaces ( $r$ ) et ( $d$ )
$F_{max}$	valeur de facteur de forme maximale entre deux surfaces
$F_{r,d,limit}$	facteur de forme limite entre les surfaces ( $r$ ) et ( $d$ )
$F_{R,D}$	facteur de forme entre les surfaces ( $r$ ) et ( $D$ )
$F_{r,d,moy}$	facteur de forme moyen entre les surfaces ( $r_i$ ) et ( $d_i$ )
$F_{r,env}$	facteur de forme entre ( $r$ ) et ( $env$ )
$F'_{r,env}$	facteur de forme entre ( $r$ ) et ( $env$ )
$h_{r,limit}$	coefficient de transfert convectif limite (W/m <sup>2</sup> K)
$he_r, he_{ri}$	coefficient d'échange convectif extérieur de ( $r$ ) d'indice $i$ (W/m <sup>2</sup> K)
$h_{int}$	coefficient d'échange convectif intérieur (W/m <sup>2</sup> K),
$Infl_{total}$	influence radiative thermique totale de ( $d$ ) sur ( $r$ )
$Infl_{dj,total}$	influence radiative thermique totale de ( $d$ ) d'indice $j$ sur ( $r$ )
$Infl_{ciel}$	influence radiative thermique due à l'obstruction du ciel de ( $r$ ) par ( $d$ )
$Infl_{env}$	influence radiative thermique due à l'obstruction de l'environnement de ( $r$ ) par ( $d$ )
$Infl_{flux,direct}$	influence radiative thermique due à l'obstruction du soleil de ( $r$ ) par ( $d$ )

$Infl_{dj}$	influence radiative thermique de ( $d$ ) d'indice $j$ sur toute surface ( $r$ )
$Infl_{dj\_ri}$	influence radiative thermique de ( $d$ ) d'indice $j$ sur ( $r$ ) d'indice $i$
$L_s \downarrow$	émission I.R. du ciel ( $W/m^2$ )
$S_r S_d$	surfaces de ( $r$ ) et ( $d$ ) ( $m^2$ )
$T_r$	température de ( $r$ ) ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$T'r$	température de ( $r$ ) due en présence de ( $d$ ) ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$T_{env}$	température de l'environnement ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$T_m$	température moyenne d'évolution de ( $r$ ) ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$T_{mi}$	température moyenne d'évolution de ( $r$ ) d'indice $i$ ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$T_s$	température de surface ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$x$	épaisseur de la paroi (m)
$\alpha_r, \alpha_d$	albédo ou réflectivité de ( $r$ ) et ( $d$ )
$\alpha_{r\_limit} \alpha_{d\_limit}$	albédo ou réflectivité limite de ( $r$ ) ou ( $d$ )
$\alpha_i \alpha_j$	albédos des surfaces d'indice ( $i$ ) et ( $j$ ).
$\epsilon_r, \epsilon_d$	émissivité de ( $r$ ) et ( $d$ )
$\Delta F_{r\_env\_limit}$	variation du facteur de forme entre ( $r$ ) et ( $env$ ) due à la présence de ( $d$ )
$\Delta T_r, \Delta T_{ri}$	variation de la température de ( $i$ ) ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$\Delta T_{max}$	variation de température maximale ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$\Delta T_{r\_env}, \Delta T_{ri\_env}$	variation de la température de ( $r$ ) d'indice ( $i$ ) due à l'obstruction de l'environnement par ( $d$ ) ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$\Delta T_{r\_ciel}, \Delta T_{ri\_ciel}$	variation de la température de ( $r$ ) d'indice ( $i$ ) due à l'obstruction du ciel par ( $d$ ) ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$\Delta T_{r\_d}, \Delta T_{ri\_dj}$	variation de la température de ( $r$ ) d'indice ( $i$ ) due à ( $d$ ) ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$\Delta T_{r\_\Phi_r}, \Delta T_{ri\_i}$	variation de la température de ( $r$ ) d'indice ( $i$ ) due à l'obstruction du rayonnement solaire direct par ( $d$ ) ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$\Delta T_{seuil}$	différence de température seuil ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$\Delta T_{seuil\_rd}$	différence de température de surface de ( $r$ ) due à ( $d$ ) seuil ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$\Delta T_{ville\_campagne}$	différence de température entre ville et campagne ( $^{\circ}K$ ou $^{\circ}C$ )
$\Delta \psi_{rs\_limit}$	la variation du facteur de vue du ciel entre ( $r$ ) et le ciel due à la présence de ( $d$ )
$\Phi_{conv}$	flux convectif ( $W/m^2$ )
$\Phi_{cond}$	flux conductif ( $W/m^2$ )
$\Phi_{rad}$	flux radiatif ( $W/m^2$ )

$\Phi_{solaire}$	flux solaire ( $W/m^2$ )
$\Phi_{IR}$	flux infrarouge ( $W/m^2$ )
$\Phi_r$	flux incidents sur ( $r$ ) ( $W/m^2$ )
$\Phi_d$	flux incidents sur ( $d$ ) ( $W/m^2$ )
$\Phi_{env}$	flux incidents sur ( $env$ ) ( $W/m^2$ )
$\Phi_j$	flux nets incidents sur ( $j$ ) ( $W/m^2$ )
$\lambda$	conductibilité thermique du matériau ( $W/mK$ )
$\sigma$	coefficient de Stefan Boltzmann
$\psi_{limit}$	facteur de vue du ciel limite
$\psi_{rs}$	facteur de vue du ciel de la paroi ( $r$ )
$\psi'_{rs}$	facteur de vue du ciel de la paroi ( $r$ ) en présence de ( $d$ )

## Bibliographie



- [1975] Estimation des ressources énergétiques solaires en France / Cahiers AFEDES vol. supplément n°1 juillet 53p.
- [1980] Memosol, Mémento d'héliotechnique / Cahiers A.F.E.D.E.S. 237p.
- [1989] Analyse climatique du site (2), Abbeville : Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie 1989 111p.
- [1991] Solene et la simulation solaire / Nantes : Laboratoire CERMA 1991 50 p.
- [1992] Maisons solaires, maison d'aujourd'hui. A la recherche des ambiances, Avignon : Les presses de Provence 1992 36p.
- [1997] Règles TH-K. Règles de calcul des caractéristiques thermiques utiles des parois de construction. Document Technique Unifié (DTU), TH\_K97/ CSTB.
- [1999] Haute qualité environnementale: un projet qui concerne tous les acteurs de la construction / Le moniteur: Cahier de l'environnement vol.4968 pp.16-17.
- [ADEME 1996] ADEME  
Journée d'échanges méthodologiques sur l'élaboration d'indicateurs de l'environnement urbain / Sophia Antipolis : ADEME 1996  
Dossier remis aux participants
- [ADEME 1997] ADEME  
Programmation haute qualité environnementale. Eléments pour un cahier des charges. ADEME 1997 12p.
- [ADEME 1998] ADEME  
Haute qualité environnementale / Le bulletin du bâtiment et des collectivités vol.1 sep. 52p.
- [Aida 1982] Masaru Aida  
Urban albedo as a function of the urban structure .Part1:a model experiment / Boundary-Layer Meteorology vol.23 405-413p.
- [Aida, Gotoh 1982] Masaru Aida, Kiyoshi Gotoh  
Urban albedo as a function of the urban structure. Part 2: A two dimensional numerical simulation / Boundary-Layer Meteorology vol.23 pp.415-424.
- [Alberti 1965] L. B. Alberti  
Ten books on architecture, London : Alec Tiranti 1965 344p.
- [Alvarez Dominguez, Cejudo Lopez, Guerra Macho et al. 1992] S. Alvarez Dominguez, J. Cejudo Lopez, J.J. Guerra Macho et al.  
Control climatico en espacios abiertos. Proyecto Expo'92 / Sevilla : Universidad de Sevilla 1992 195p.
- [Amphoux 1999] P. Amphoux  
Cultures urbaines et mode de vie in : Cité à venir, Rennes, 15-16 novembre 1999 [s.l.] : [s.n.] 1999. Communication orale.
- [Antoine 1997] M.-J. Antoine  
Calcul des températures de parois pour des facettes du modèle géométrique d'un espace urbain ouvert. Contribution à

- l'établissement d'un modèle microclimatique urbain. Nantes : Laboratoire CERMA 1997 34p.  
Rapport intermédiaire
- [Antoine 1999] M.-J. Antoine  
Note sur programme de calcul aux différences finies pour la résolution d'un problème de conduction 1 D. Nantes : Laboratoire CERMA 1999 15p.  
Rapport interne
- [Arnfield 1982] A.J. Arnfield  
An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities / *Physical Geography* vol.3 n°2 pp.97-122.
- [Arnfield 1988] A.J. Arnfield  
Validation of an estimation models for urban surface albedo / *Physical Geography* vol. 4 n°4 pp.361-372.
- [Arnfield 1990] A.J. Arnfield  
Street design and urban canyon solar access / *Energy and building* vol. 14 pp.117-131.
- [Arnfield 1990] A.J. Arnfield  
Canyon geometry. The urban fabric and nocturnal cooling: a simulation approach / *Physical geography* vol. 11 n°3 pp.220-239.
- [Arnfield, Mills 1994] A.J. Arnfield, G.M. Mills  
An analysis of the circulation characteristics and energy budget of a dry asymmetric east-west urban canyon. II. Energy Budget / *International Journal of Climatology* vol. 14 pp.239-261.
- [Arnfield, Mills 1994] A.J. Arnfield, G. Mills  
An analysis of the circulation characteristics and energy budget of a dry asymmetric, east-west urban canyon. I. Circulation characteristics / *International Journal of Climatology* vol. 14 pp.119-134.
- [Ashie, Aseada, Ca 1997] Y. Ashie, T. Aseada, V.T. Ca  
An ecological development with a predictive tool of urban climate in : *The 14th International conference on Passive and Low Energy Architecture : sustainable communities and Architecture - Bioclimatic design in Cold Climates*, Kushiro (JP), 8-10 January 1997 / Tokyo (Jp) : PLEA97 Japan Committee, Building research Institute 1997 pp. 69-74
- [Assoc. des Ing. de Chauff. et de Vent. de France 1977] Assoc. des Ing. de Chauff. et de Vent. de France  
Guide de chauffage, ventilation, conditionnement d'air. Fascicule 2: Méthode de calcul des apports thermiques dans les bâtiments, Paris : Publication de la société d'Édition pour l'Information Technique des Ingénieurs de Chauffage 1977 195p.
- [Auriault 1979] J.-P. Auriault  
Construire avec le climat, Paris : Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie 1979.
- [Bardet 1943] G. Bardet  
Le facteur soleil en urbanisme / *Technique et Architecture* vol. 7-8 pp.202-206.
- [Blazejczyk, Tokma, Bortkiewicz et al. 1999] K. Blazejczyk, H. Tokma, A. Bortkiewicz et al.  
Solar radiation and thermal physiology in man in : *Proceedings of the International Congress of Biometeorology & International Conference on urban climatology*, Sydney 8-12 Nov. Australia. Australia [CD-ROM]/ Sydney: Macquarie University, 1999 6p.
- [Beaujeu-garnier, Chabot 1963] J. Beaujeu-Garnier, G. Chabot

- Traité de géographie urbaine, Paris : Librairie Armand Collin 1963 493p.
- [Bernard, Menguy, Schwartz 1979] R Bernard, G Menguy, M Schwartz  
Le rayonnement solaire conversion thermique et application, Paris : Technique et Documentation 1979 215p.
- [Bertrand 1980] M.J Bertrand  
Architecture de l'habitat urbain, la maison, le quartier, la ville, Paris : Dunod 1980 230p.
- [Bertrand, Listowski 1984] M. J. Bertrand, H. Listowski  
Les places dans la ville, Lecture d'un espace public, Paris : Dunod 1984
- [Bonn, Rochon 1993] F. Bonn, G Rochon  
Précis de télédétection. Volume 1 : Principes et méthodes, Québec : Presse universitaire du Québec 1993 485p.
- [Borie, Micheloni, Pinon 1987] A. Borie, P. Micheloni, P. Pinon  
Analyse morphologique et composition architecturale, Paris : Ecole d'architecture de Paris-la défense 1987 83p.
- [Brüh, Zdunkowski 1983b] Ch. Brüh, W. Zdunkowski  
An approximate calculation method for parallel and diffuse solar irradiances on inclined surfaces in the presence of obstructing mountains or buildings / Arch. Met. Geoph. Biocl. Serie b pp.111-129.
- [Bouleau 1999] N. Bouleau  
Qualité et pragmatique des modèles. Ecole thématique : modélisation de la ville Nantes : 20-24 septembre 1999. Communication orale
- [Bouleau 1999] N. Bouleau  
Philosophies des mathématiques et de la modélisation. Du chercheur à l'ingénieur. Paris : l'Harmattan, 1999, 363 p.
- [Ca, Aseada, Ashie 1997] V. T. Ca, T. Aseada, Y. Ashie  
Effects of different pavement materials of the urban thermal environment / Summaries of technical papers of annual meeting of architectural institute of Japan pp.1025-1026.
- [Castex, Depaule, Panerai 1975] J. Castex, J.-C. Depaule, Ph. Panerai  
Evolution comparée des modèles architecturaux et des modèles culturels dans la ville industrielle d'Hausmann à Le Corbusier, Principe d'analyse urbaine, Versailles : Association pour le Développement de la Recherche sur l'Organisation Spatiale (ADROS) 1975 127p.  
Rapport de recherche
- [Chabot 1958] G. Chabot  
Les villes, Paris : Librairie Armand Colin 1958 222p.
- [Chandler 1976] T.J. Chandler  
Urban climatology and its relevance to urban design / World Meteorological Organization. Technical note n°.149 61p.
- [Chelkoff, Thibaud 1992] G. Chelkoff, J.-P. Thibaud  
Les mises en vue de l'espace public, Grenoble : CRESSON 1992 231p.
- [Chemillier ] P. Chemillier  
Sciences et bâtiments. La démarche scientifique appliquée à la construction, Paris : Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussée 447p.
- [Claval 1981] P. Claval  
La logique des villes, Paris : LITEC 1981 633p.
- [Clément, Guth 1994] P. Clément, S. Guth  
La densité dans ses rapports aux formes architecturales et urbaines, Paris : IPRAUS 1994 44p.  
Rapport provisoire

- [CSTB 1995] CSTB  
Traité de physique du bâtiment. Tome1: Connaissance de base, Nantes : C.S.T.B. 1995 832p.
- [DAU-STU 1994] DAU-STU  
Composition urbaine - Projets, Paris : STU 1994 53p.
- [Dehausse ] R. Dehausse  
Energétique des bâtiments. 1. Situation, besoins, Paris : PYC éditions 275 p.
- [Dehausse 1988] R. Dehausse  
Energétique des bâtiments. 2.Calcul des enveloppes, Paris : PYC édition 1988 353p.
- [Dequiet 1996] F. Dequiet  
L'élaboration d'un tableau de bord de l'environnement urbain. Les indicateurs de l'environnement urbain. / Paris : Université de Paris 7 1996  
DESS Gestion et Génie de l'Environnement
- [Deschiller, Evans 1996] S. Deschiller, J.M. Evans  
Training architects and planners to design with urban microclimates / Atmospheric Environment vol.30 n°3 pp.449-454.
- [Duchène-Marullaz 1980] Ph. Duchène-Marullaz  
Recherche exploratoire en climatologie urbaine, Nantes : C.S.T.B. 1980
- [Duport, Trotignon ] L. Duport, R. Trotignon  
Indicateurs et tableaux de bord de l'environnement urbain. Réflexion méthodologique et proposition de cahier des charges / ADEME 10p.
- [Eliasson 1996] I. Eliasson  
Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use / Atmospheric Environment vol.30, n°3 pp.379-392.
- [Escourrou 1978] G. Escourrou  
Climatologie pratique, Paris : Masson 1978 172p.
- [Escourrou 1981] G. Escourrou  
Climat et environnement: les facteurs locaux du climat, Paris : Masson 1981 182p.
- [Escourrou 1991] G. Escourrou  
Le climat et la ville, Paris : Nathan 1991 190p.
- [Fontoynt 1994] M. Fontoynt  
Fluctuations du gisement lumineux et milieu urbain. Les saisons dans la ville / Les annales de la Recherche Urbaine vol.n°61 pp. 100-105.
- [Frommes 1982] B. Frommes  
Urban and building climatology in practice and in professional education / Energy and Building vol.5, pp.31-37.
- [Fuggle, Oke 1976] R. F. Fuggle, T. R. Oke  
Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere. I. Above roof level / Boundary-Layer Meteorology vol. 10, n°2 pp.113-120.
- [Gandemer, Guyot 1976] J. Gandemer, A. Guyot  
Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti, Paris : Ministère de l'Equipement Direction de l'Aménagement Foncier et de l'Urbanisme 1976 130p.
- [Gao, Ojima 1997] W. Gao, T. Ojima  
Prediction of thermal environment of urban area / Summaries of technical papers of annual meeting of architectural institute of Japan pp.881-883.
- [Garnier 1982] M. Garnier

- Données et statistiques sur les températures dans le sol en France, Paris : Ministère des Transports direction de la météorologie 1982 198p.
- [George 1961] P. George  
Précis de géographie urbaine, Paris : Presses Universitaires de France 1961 279p.
- [Gerosa 1993] P. G. Gerosa  
Éléments pour une histoire des théories sur la ville comme artefact et forme spatiale (18e-20e siècles), Strasbourg : Université des Sciences Humaines de Strasbourg 1993 284p.
- [Givoni 1978] B. Givoni  
L'homme, l'architecture et le climat, Paris : Moniteur 1978 460p.
- [Golany 1996] G.S. Golany  
Urban design morphology and thermal performance / Atmospheric environment vol.30 n°3 455-465p.
- [Groupe ABC 1997] Groupe ABC  
Morphologie végétale et microclimats urbains. Vol. II. Les mesures / Marseille : Ecole d'Architecture de Marseille Luminy 1997 169p.
- [Groleau 1987] D. Groleau  
Modélisation des interaction entre formes urbaines et les facteurs physiques de l'environnement in : European Conference on architecture, Munich 6-10 April 1987 / Bedford (GB) : H S Stephens and Associates 1987
- [Groleau, Marenne 1995] D. Groleau, C. Marenne  
Environmental specificities of the urban built forms in : Rebuild-Rebuilding the European City. Integration of Renewable Energies in Established Urban Structures, Corfoue, 29-30 Jul.
- [Groupe ABC 1997] Groupe ABC  
Morphologie végétale et microclimats urbains. Vol. I. Le contexte, analyse urbaine / Marseille : Ecole d'Architecture de Marseille Luminy 1997 42p.
- [Hernot, Porcher 1984] D. Hernot, G. Porcher  
Thermique appliquée aux bâtiments, Paris : Les Editions Parisiennes CFP 1984 168p.
- [Heschong 1981] L. Heschong  
Architecture et volupté thermique, Paris : Editions Parenthèses 1981 93p.
- [Hierry 1987] P. Hierry  
Utilisation des techniques de synthèse d'image pour la visualisation des phénomènes solaires et énergétiques / Nantes : Ecole d'Architecture de Nantes 1987 48p.
- [Hoffmann 1994] J. B. Hoffmann  
Ambiances climatisées et confort thermique, [s.l.] : COSTIC 1994 120 p.
- [Houdas 1973] Y Houdas  
Neutralité thermique. Confort thermique in : Chauffage électrique et mieux être, Paris 29-30 nov. vol.1-2, 26p.
- [Hunter, Johnson, Watson 1992b] L.H. Hunter, G.T. Johnson, I.D. Watson  
An investigation of three dimensional characteristics of flow regimes within urban canyon / Atmospheric Environment. Serie B vol.26 n°4
- [Hunter, Johnson, Watson 1992b] L.J. Hunter, G.T. Johnson, I.D. Watson  
An investigation of three dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon / Atmospheric Environment. Serie B vol.26
- [IAURIF, IPRAUS 1996] IAURIF, IPRAUS

- Maîtrise d'ouvrage et formes urbaines, Paris : IAURIF 1996 no. Pag.
- [Iino, Hoyano 1996] A. Iino, A. Hoyano  
Development of a method to predict the heat island potential using remote sensing and GIS data / Energy and Buildings vol. 23 pp.199-205.
- [Irani Behbani, Mahrour 1987] H. Irani Behbani, K. Mahrour  
L'acte de lecture de la transformation d'un tissu et l'aspect théorique de sa transformation, in : Les tissus urbains, Colloque international, Oran, 1-3 décembre 1987 / Oran : République Algérienne Démocratique et populaire, Ministère des affaires Etrangères 1987 pp. 239-263
- [Issad 1992] A. Issad  
Ilot de chaleur : effets et atténuation dans les villes méditerranéennes / Nantes : Ecole d'Architecture de Nantes 1992 37 p.
- [Jendritzky, Grätz 1998] G. Jendritzky, A. Grätz  
Mapping human bioclimates in various scales with particular reference to urban environment in : 2nd Symposium on urban environment, 2-6 Nov. Albuquerque, New Mexico / Boston Ma (USA) : American Meteorological Society 1998 pp.168-171.
- [Johnson, Oke, Lyons et al. 1991] G. T. Johnson, T. R. Oke, T. J. et al. Lyons et al.  
Simulation of surface urban heat islands under ideal conditions at night. Part 1: Theory and tests against field data / Boundary-Layer Meteorology vol.56, pp.275-294.
- [Johnson, Watson 1984] G. Johnson, D. Watson  
The determination of view factors in urban canyons / American Meteorological Society. Journal of Climate and Applied Meteorology. vol.23, pp.329-335.
- [Kay 1964] JM Kay  
Introduction à la mécanique des fluides et la transmission de la chaleur, Paris : Dunod 1964 406p.
- [Ibn Khaldûn 1997] Ibn Khaldûn  
Discours sur l'histoire universelle, trad. V. Monteil, Thesaurus Sindbad 1997 1132p.
- [Laborde 1994] P. Laborde  
Les espaces urbains dans le monde, Paris : Nathan 1994 239p.
- [Lavigne, Fernandez, Brejon 1992] P. Lavigne, P. Fernandez, P. Brejon  
Architecture climatique : Une contribution au développement durable . Tome 1: Bases et approche physique, [s.l.] : [s.n.] 1992 167p.
- [Lévy 1992] A. Lévy  
La qualité de la forme urbaine. Tome1, Nantes : Ville Recherche et Diffusion 1992 158p.
- [Lüttgen, Pressman 1994] A. Lüttgen, N. Pressman  
Internationalisation et ville anti-climatique un pari pour l'avenir? / Architecture et Comportement vol.10 n°1, pp.13-25.
- [Manceau 1981] D. Manceau  
Echantillon d'espaces urbains de l'agglomération nantaise, Nantes : CERMA 1981 117p.
- [Mangin, Panerai 1988] D. Mangin, Ph. Panerai  
Le temps de la ville, l'économie raisonnée des tracés urbains, Paris : Ecole d'Architecture de Versailles 1988 242p. Laboratoire de recherche d'"Histoire Architecturale et Urbaine - sociétés"
- [Martien, Akbari, Rosenfeld et al. P. Martien, H. Akbari, A. Rosenfeld et al.  
Approaches to using models of urban climate in build in-energy simulation in : Proceedings of workshop on saving energy and

- reducing atmospheric pollution by controlling summer heat islands, February 23-24, Berkley California, 1989 pp.150-173.
- [Matzarakis, Mayer 1998] A. Matzarakis, H. Mayer  
Investigations of urban climate's thermal component in Freidburg, Germany in : 2nd Symposium on urban environment, 2-6 Nov. Albuquerque, New Mexico / Boston Ma (USA) : American Meteorological Society 1998 pp.140-143.
- [Mayer 1998] H. Mayer  
Human-Biometeorological assessment of urban microclimates according to the German VDI-Guideline 3787 part II in : 2nd Symposium on urban environment, 2-6 Nov. Albuquerque, New Mexico / Boston Ma (USA) : American Meteorological Society 1998 pp.136-139.
- [Mazria 1981] E. Mazria  
Le guide de l'énergie solaire passive, Paris : Editions Parenthèses 1981 339p.
- [McIntyre 1980] D.A. McIntyre  
Indoor climate, London : Applied Science Publishers 1980 443p.
- [Meir, Pearlmutter, Etzion 1995] I.A. Meir, D. Pearlmutter, Y. Etzion  
On the microclimatic behavior of two semi-enclosed attached courtyards in hot dry region / Building and Environment vol. 30 n°4, 563-572p.
- [Merlin, Choay 1988] P. Merlin, F. Choay  
Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement, Paris : Presses Universitaires de France 1988 723p.
- [Merlin, D'Alfonso, Choay 1988] P. Merlin, E. D'Alfonso, F. Choay  
Morphologie urbaine et parcellaire, Saint-Denis : Presses Universitaires de Vincennes 1988 292p.
- [Mestayer, Anquetin 1994] P. Mestayer, S. Anquetin  
Climatology of cities in : Diffusion and transfer of pollutants in atmospheric Mesoscale flow fields / [s.l.] : Kluwer Academic Publisher
- [Miguet 1995] F. Miguet  
Ciel : Modèles permettant de simuler l'éclairage naturel (voûte céleste et soleil) / Nantes : Laboratoire CERMA 1995 38p.
- [Miguet 1996] F. Miguet  
Eclairage énergétique en milieu urbain / Nantes : Laboratoire CERMA 1996  
Rapport interne
- [Miguet 1996] F. Miguet  
Eclairages énergétiques et lumineux en milieu urbain / Nantes : Laboratoire CERMA 1996 67 p.
- [Miller-Chagas, Paul 1980] Ph. Miller-Chagas, P. Paul  
Configurations urbaines : Apports énergétiques et microclimats. Etude des espaces extérieurs de trois ensembles à Strasbourg Contrat de recherche Plan Construction ARIAS, Strasbourg : ARIAS 1980 182p.
- [Mills 1993b] G.M. Mills  
Simulation of the energy budget of an urban canyon. I. A model structure and sensitivity test / Atmospheric Environment. Serie B vol.27 n°2 pp.157-170.
- [Mills 1993b] G.M. Mills  
Simulation of the energy budget of an urban canyon. II. Comparison of model results with measurements / Atmospheric Environment. Serie b vol. 27 n°2 pp.171-181.
- [Mirabaud, Parent 1962] L. Mirabaud, C. Parent  
Etude d'architecture spatiale à forte concentration / Architecture d'Aujourd'hui vol.102 p 62.

- [Nagara, Shimoda, Mizumo 1996] K. Nagara, Y. Shimoda, M. Mizumo  
Evaluation of thermal environment in an urban outdoor pedestrian space / Atmospheric Environment vol. 30 n°3 pp.497-505.
- [Nikolopoulou, Baker, Steemers 1998] M. Nikolopoulou, N. Baker, K. Steemers  
Thermal comfort in outdoor urban spaces / PLEA'98 Lisbon, Jun, Portugal pp.179-182.
- [Noilhan 1980] J. Noilhan  
Contribution à l'étude du microclimat au voisinage d'un bâtiment / Nantes : C.S.T.B. 1980 160p.
- [Norberg-Schulz 1979] C. Norberg-Schulz  
Système logique de l'architecture, Bruxelles : Pierre Mardaga 1979 301p.
- [Nunez, Oke 1976] M. Nunez, T. R. Oke  
Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere. II. Within an urban canyon / Boundary-Layer Meteorology vol.10 pp.121-135.
- [Nunez, Oke 1977] M. Nunez, T. R. Oke  
The energy balance of an urban canyon / Journal of Applied Meteorology vol. 16, n° 1 pp.11-19.
- [Oke 1974] T.R. Oke  
Review of urban climatology 1968-1973 / World Meteorological Organization Technical note n°134 97p.
- [Oke 1979] T.R. Oke  
Review of urban climatology 1973-1976 / World Meteorological Organization Technical note n°169 100p.
- [Oke 1981] T.R. Oke  
Canyon geometry and the nocturnal urban heat island. Comparison of scale model and field observations / Journal of Climatology vol. 1 pp.237-254.
- [Oke 1982] T. R. Oke  
The energetic basis of the urban heat island / Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society vol.108 pp.1-24.
- [Oke 1987] T.R. Oke  
Boundary layer climates, London : Routledge 1987 435p.
- [Oke 1988] T. R. Oke  
Street design and urban canopy layer climate / Energy and Building vol.11 103-113p.
- [Oke, Johnson, Steyn et al. 1991] T. R. Oke, G. T. Johnson, D. G. et al. Steyn et al.  
Simulation of surface urban heat island under ideal conditions at night. Part 2 : Diagnosis of causation / Boundary-Layer Meteorology vol. 56 pp. 339-358.
- [Palladio 1997] A. Palladio  
Les quatre livres de l'architecture, Paris : Flammarion 1997
- [Panerai, Depaule, Veyrenche et al. 1980] Ph. Panerai, J-Ch Depaule, M. Veyrenche et al.  
Éléments d'analyse urbaine, Bruxelles : Archive d'Architecture Moderne 1980 194p.
- [Péneau ] J. -P. Péneau  
L'ajustement climatique dans les théories architecturales et urbaines, Nantes : Ecole d'Architecture de Nantes 94 p.  
Cours
- [Péneau ] J.-P. Péneau  
Ajustement climatique des formes urbaines, Nantes : Laboratoire CERMA
- [Pénicaud 1978] H. Pénicaud  
Microclimats urbains étudiés sous l'angle du confort à l'extérieur du bâtiment / [s.l.] : Plan Construction R.A.U.C. 1978 non. Pag.

- [Perrin de Brichambaut, Lamboley 1974] C. Perrin de Brichambaut, G. Lamboley  
Le rayonnement solaire au sol et ses mesures / Cahiers AFEDES vol.n°1 127p.
- [Perrin de Brichambaut, Vauge 1982] C. Perrin de Brichambaut, Ch. Vauge  
Le gisement solaire, Paris : Technique et Documentation 1982 222p.
- [Pickup, De Dear 1999] J. Pickup, R. De Dear  
An outdoor thermal comfort index (OUT\_SET\*). Part I - The model and its assumptions, in : Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, 8-12 Nov. Sydney Australia [CD ROM]/ Sydney: Macquarie University, 6p.
- [Pignolet, Depecker, Inard 1994] F. Pignolet, P. Depecker, Ch. Inard  
Un code de calcul de prédiction du comportement thermique pour les espaces urbains in : Actes de la conférence européenne "performance énergétique et Qualité des Ambiances dans le bâtiment", 24-26 nov. Lyon, France. / Lyon : Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat 1994 pp. 101-105
- [Pignolet-Tardan 1996] F. Pignolet-Tardan  
Milieu thermique et conception urbaine en climat tropical humide. Modélisation thermo-aéraulique globale. / Lyon : Université de Lyon 1996 246p.  
Thèse génie civil
- [Pignolet-Tardan, Depecker, Gatina 1995] F. Pignolet-Tardan, Ch. Depecker, J.C. Gatina  
A simplified coupled model for thermal behavior and air flows simulation in urban spaces in : Proceedings of the 4th International Conference on "Building simulation", Madison Wisconsin USA. / [s.l.] : IBPSA 1995 pp.370-377
- [Pinon 1992] P. Pinon  
Composition urbaine. Tome 1: Repères, Paris : STU 1992 106p.
- [Rapoport 1972] Amos Rapoport  
Pour une anthropologie de la maison, Paris : Dunod 1972 207p.
- [Raymond 1998] F. Raymond  
Introduction d'un modèle de comportement thermique de paroi dans N3S / Nantes : Laboratoire CERMA 1998 17p.
- [Riboulet 1998] P. Riboulet  
Onze leçon sur la composition urbaine, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées 1998 256p.
- [Robin 1995] M. Robin  
La télédétection, Paris : Nathan 1995 318p.
- [Rouleau 1967] B. Rouleau  
Le tracé des rues de Paris : Formation, typologie, fonctions, Paris : Editions du Centre National de la Recherche Scientifique 1967 129p.
- [Sacadura 1982] J.-F. Sacadura  
Initiation aux transferts thermiques, Paris : Technique et Documentation 1982 445p.
- [Sacré ] C. Sacré  
Le confort dans les espaces extérieurs. Analyse microclimatique / Nantes : CSTB 138p.
- [Sakakibara 1996] Y. Sakakibara  
A numerical study of the effect of urban geometry upon the surface energy budget / Atmospheric Environment vol. 30 n°3 pp.487-496.
- [Serres 1997] L. Serres

- Etude de l'impact d'une perturbation thermique locale de type tache solaire. Influence sur le confort thermique / Toulouse : Institut National des Sciences Appliquées 1997
- Thèse de doctorat Génie Civil
- [Sevensson 1999] M. Sevensson  
A GIS based empirical method to illustrate and simulate temperature variations in an urban area in : Proceedings of the International Congress of Biometeorology & International Conference on urban climatology, Sydney 8-12 Nov. [CD-ROM] Sydney: Macquarie University 1999, 6p.
- [Shmid, Cleugh, Grimmond et al. H.P. Shmid, H.A. Cleugh, C.S.B. Grimmond et al.  
Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain / Boundary-Layer Meteorology vol.54 pp.249-276.
- [Sievers, Zdunkowski 1985] U Sievers, W. Zdunkowski  
A numerical simulation scheme for the albedo of city street canyons / Boundary-Layer Meteorology vol. 33 pp.245-257.
- [Sini, Anquetin, Mestayer 1996] J.-F. Sini, S. Anquetin, P. Mestayer  
Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons / Atmospheric Environment vol. 30 n°15 pp.2659-2677.
- [Siret 1997] D. Siret  
Proposition pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural. Application à l'ensoleillement / Nantes : Université de Nantes 1997 323p.  
Thèse en science pour l'ingénieur, option architecture
- [Steemers 1998] K. Steemers  
Assessing the urban microclimate: introducing innovative modeling techniques in PLEA'98 Lisbon, Jun, Portugal -/ London: James & James 1998 pp. 154-158.
- [Steemers, Baker, Crowther et al. 1996] K. Steemers, N. Baker, D. Crowther et al.  
Urban design: microclimate, building and energy in : PLEA'96 Louvain-la-Neuve, Belgium
- [Steemers, Baker, Crowther et al. 1996] K. Steemers, N. Baker, D. Crowther et al.  
Project ZED: modeling environmental characteristics of urban forms in : 4th European Conference on architecture, 26-29 Mar. Berlin, Germany / Bedford: H.P. Stephens & Associates, 1996 pp. 4-7.
- [Steyn 1985] D.G Steyn  
The calculation of view-factors from fisheye-lens photographs / Atmosphere-ocean vol. 18 n°3 pp. 254-258.
- [Steyn, Lyons 1984] D.G. Steyn, T.J. Lyons  
Comments on the determination of view-factors in urban canyons / American Meteorological Society. Journal of Climate and Applied Meteorology vol. 24 pp.383-386.
- [Supic 1994] A. Supic  
L'aspect climatique de l'habitat vernaculaire / Architecture et Comportement vol.10 n°1 pp.27-47.
- [Swaid 1992] H. Swaid  
Intelligent urban forms (IUF). A new climate-concerned, urban planning strategy / Theoretical and Applied Climatology vol.46 pp.179-191.
- [Swaid 1993] H. Swaid  
Urban climate effects of artificial heat sources and ground shadowing by buildings / International Journal of Climatology vol. 13 pp.797-812.
- [Swaid, Bar-el, Hoffman 1993] H. Swaid, M. Bar-el, M.E. Hoffman  
A bioclimatic design methodology for urban outdoor spaces / Theoretical and Applied Climatology vol. 48 pp49-61.
- [Terjung, Louie 1973] W.H. Terjung, S.S-F. Louie

- [Terjung, Louie 1974] Solar radiation and urban heat islands / Annals of the association of American Geographers vol. 63 n°2 pp.181-207.  
W.H. Terjung, S.S-F Louie  
A climatic model of urban energy budgets, geographical analysis / Geographical Analysis vol.6 pp.341-367.
- [Terjung, O'Rourke 1980] Werner H. Terjung, Patricia O'Rourke  
Simulating the causal elements of urban heat islands / Boundary Layer Meteorology vol.19 pp.93-118.
- [Terjung, O'Rourke 1980] Werner H. Terjung, Patricia O'Rourke  
Influences of physical structures on urban energy budgets / Boundary Layer Meteorology vol.19 pp.421-439.
- [Terjung, O'Rourke 1981b] W.H. Terjung, P. O'Rourke  
Energy input and resultant surface temperatures for individual urban interfaces, selected latitudes and seasons / Arch. Met. Geoph. Biocl. Serie B vol.29 pp.1-22.
- [Tiraoui 1996] L. Tiraoui  
L'ambiance du patio entre l'air et le soleil. L'influence des proportions du patio sur les ambiances thermo-aérauliques. / Nantes : Université de Nantes et Ecole d'Architecture de Nantes 1996 122p.  
DEA Ambiances Architecturales et Urbaines
- [Tiraoui 1999] L. Tiraoui  
Climatic factors and urban space design / Proceedings of the 6th International Symposium on Urban Form, 23-26 Jul. Florence Italy/Florence: Alinea editrice 1999, K16-K19p.
- [Tiraoui, Antoine 1998] L. Tiraoui, M.-J. Antoine  
The analysis of formal features of urban spaces to intervene on thermal conditions of urban environment. An attempt to give spatial signification of thermal exchange in urban space. / 2nd Urban Environment Symposium, 2-7 Nov. Albuquerque, New Mexico/ Boston MA ( USA): American Meteorological Society 1998, 90-93p.
- [Tiraoui, Antoine 1999] L. Tiraoui, A. Antoine  
Thermal conditions of cities and urban space configurations. An approach for the comprehension of thermal phenomena in urban spaces in : Proceedings of the International Congress of Biometeorology & International Conference on urban climatology, Sydney 8-12 Nov. [CD-ROM]/ Sydney: Macquarie University, 6p.
- [Unsworth 1975] M. H. Unsworth  
Long-wave radiation at the ground. II. Geometry of interception by slopes, solids and obstructed planes / Quarterly Journal of Royal Meteorological Society vol.101 pp.25-34.
- [Unsworth, Monteith 1975] M. H. Unsworth, J. L. Monteith  
Long-wave radiation at the ground. I. Angular distribution of incoming radiation / Quarterly Journal of Royal Meteorological Society vol.101 pp.13-24.
- [Versegby, Munro 1989] D. L. Versegby, D. S. Munro  
Sensitivity studies on the calculation of the radiation balance of urban surfaces. I. Short-wave radiation / Boundary-Layer Meteorology vol. 46, n°4 pp.309-331.
- [Versegby, Munro 1989] D. L. Versegby, D. S. Munro  
Sensitivity studies on the calculation of the radiation balance of urban surface. II. Long-wave radiation / Boundary-Layer Meteorology vol.48 pp. 1-18.
- [Vinet 1999] J. Vinet  
Les effets de l'eau et de la végétation dans la régulation des ambiances urbaines / Nantes : Laboratoire CERMA 1999  
Rapport interne
- [Vitruve 1995] Vitruve, trad. Cl. Perault

- Les dix livres de l'architecture de Vitruve, Paris : Bibliothèque de l'Image 1995 329 p.
- [Voogt 1989] J.A. Voogt  
Validation of an urban canyon radiation model for nocturnal long-wave radiation fluxes and the effect of surface geometry on cooling in urban canyon / Vancouver : University of British Columbia 1989 266 p. Thesis submitted for the degree of Master of Science
- [Voogt, Oke 1991] J.A. Voogt, T.R. Oke  
Validation of an urban canyon radiation model for nocturnal long-wave fluxes / Boundary-Layer Meteorology vol. 54 pp. 347-361.
- [Voogt, Oke 1997] J.A. Voogt, T.R. Oke  
Complete urban surface temperatures / Journal of Applied Meteorology vol. 26 pp.1117-1132.
- [Westerberg 1994] U Westerberg  
Climatic planning physics or symbolism? / Architecture et Comportement vol.10 n°1 pp.49-71.
- [Woloszyn 1997] P. Woloszyn  
Vers un simulateur des ambiances sonores urbaines / Acoustique et Technique vol.8 pp.17-19.
- [World Meteorological Organization 1996] World Meteorological Organization  
Climate and urban development, Geneva : World Meteorological Organization 1996 9p.
- [Yannas 1998] S. Yannas  
Living with the city: urban design and environmental sustainability in: PLEA'98 Lisbon, Jun , Portugal 41-48p.
- [Yun, Hoyano, Iino 1997] D. Yun, A. Hoyano, A. Iino  
Evaluation of urban forms from thermal environmental aspects in: Proceedings of PLEA, Kushiro 8-10 jan. / Kushiro: PLEA97 Japan comitee 1997 vol. 2 pp.223-228.

## Tables des illustrations



## Figures

### Chapitre 1 Problématique et hypothèses

Figure 1.1 L'interdépendance des trois types de modèles : descriptif, prédictif et explicatif.....	38
Figure 1.2. Représentation comparée des types de résultat de simulation de deux modèles : descriptifs (1) et explicatif (2) et leur positionnement par rapport à une situation mesurée (r) (Bouleau 1999).....	39
Figure 1.3 Schéma de coupe sur une rue canyon.....	42
Figure 1.4 Les trois tissus analysés par Groleau et al. (1995).....	44
Figure 1.5 Etablissement d'un modèle explicatif basé sur une représentation type environnement plutôt que type échange.....	48

### Chapitre 2 La ville et les phénomènes climatiques thermiques

Figure 2.1 Axe héliothermique de A.Rey (Péneau s.d.).....	56
Figure 2.2 L'axe héliothermique de A. Rey et l'axe de meilleure insolation de F. Marboutin (Bardet 1943).....	57
Figure 2.3. Disposition de bâtiments suivant la direction héliothermique d'après A Rey. (Péneau s.d.).....	58
Figure 2.4 Etude d'architecture spatiale à forte concentration, architectes : L. Mirabaud et C. Parent (1962).....	59
Figure 2.5 Variation des besoins de chauffage pour un même volume selon la forme du bâtiment, d'après J.P. Cordier (Auriault 1979).....	60
Figure 2.6 Schéma montrant une densité de bâti typique des climats chaud et sec (Rapoport 1972).....	61
Figure 2.7 Schéma montrant une organisation bâti typique des climats chauds et humides (Rapoport 1972).....	61
Figure 2.8 Une architecture créatrice de microclimat. Maison avec serre tropicale près de Montpellier (Hérault), architecte Jordi Battle (1992)....	62
Figure 2.9 Effets aérodynamiques : effet de Venturi (Gandemer et al. 1976) ..	63
Figure 2.10 Echange de chaleur par rayonnement entre deux faces.....	66
Figure 2.11 Représentation schématique des deux couches atmosphériques liées aux modifications urbaines (Oke, 1987).....	75
Figure 2.12 Les différences de bilans radiatifs et énergétiques entre le jour et la nuit (Oke 1987).....	78
Figure 2.13. Schéma résumant les différences des grandeurs radiatives entre ville et campagne.....	80

Figure 2.14 Bilan radiatif du 30 juillet à Matador 50°N à 20 cm au-dessus d'un sol d'herbe naturel (Oke 1987).....	81
Figure 2.15 Schéma de variation de la température de l'air de la ville comparée à celle de rase campagne (Oke 1987). ....	83
Figure 2.16. Piégeage du rayonnement.....	84
Figure 2.17 Appareil de mesure de la température moyenne radiante, et d'estimation des asymétries radiantes (Innova) .....	107
Figure 2.18. Le diagramme ci-contre exprime les distances confortables minimum $c$ entre une fenêtre de taille $(a \times b)$ en fonction de la différence entre température radiante de la pièce et la température de la fenêtre....	111
Figure 2.19 Le diagramme ci-contre exprime l'élévation de température tolérable pour un panneau de taille $(a \times a)$ se trouvant à une distance $c$ au-dessus du sujet .....	111
Figure 2.20 Les échanges thermiques de l'individu avec son environnement extérieur. ....	113
Figure 2.21 Comparaison du USET* (SET* développé en extérieur) au SET* appliqué au japon. Etude réalisé par Saitoh Laboratory Energy Systems and Environment Laboratory, Université de Tohoku ( <a href="http://www.mech.tohoku.ac.jp/">http://www.mech.tohoku.ac.jp/</a> ). ....	118
Figure 2.22 Modélisation des indices de confort extérieur.....	120

### **Chapitre3 Construction de la méthode d'analyse des impacts radiatifs thermiques**

Figure 3.1 Schéma des différents modes de transfert de chaleur entre parois et avec leur environnement. ....	133
Figure 3.2 Obstruction du soleil par $(d)$ pour $(r)$ . ....	141
Figure 3.3 Discrétisation de la scène et simplification des obstructions. ....	145
Figure 3.4 Modélisation géométrique des influences entre facettes d'une scène. ....	147
Figure 3.5 Les influences de l'environnement de référence.....	149
Figure 3.6 Les impacts dus aux apports et aux obstructions .....	149
Figure 3.7 Analyse des valeurs de facteurs de formes entre deux surfaces perpendiculaires.....	155
Figure 3.8 Facteur de forme entre deux éléments de face .....	155
Figure 3.9 Schématisation de la zone d'influence entre deux surfaces élémentaires perpendiculaires.....	156
Figure 3.10 La zone d'influence pour deux faces parallèles .....	157
Figure 3.11 Relation du facteur de forme entre $S_i$ et $(S_{j1}, S_{j2})$ avec celui entre $S_i$ et $S_j$ .....	159
Figure 3.12 Relation des facteurs de forme entre $D$ et $R$ avec celui entre $d$ et $r$ .....	159
Figure 3.13 Diagramme du processus de calcul des influences. ....	161

Figure 3.14 Diagramme général du processus de simulation de l'éclaircissement urbain (Miguet 1996).	162
Figure 3.15 Etape de simulation de température de surface d'après Antoine (1997).	162
Figure 3.16 Simulation de l'éclaircissement naturelle dans la cour Mériadec à Nantes (Miguet et al. 1996).	163
Figure 3.17 Simulation solaire du square Fleuriot à Nantes	163
Figure 3.18 Simulation thermique du square Fleuriot (Antoine et al. 1998).	163

## Chapitre 4 Illustrations

Figure 4.1 Place du Pilon à Nantes	171
Figure 4.2 Ensoleillement de la place du Pilon le 21 juin	173
Figure 4.3 Coefficient d'échange convectif mixte externe $h_e$ (W/mK)	174
Figure 4.4 Vitesse de l'air (m/s)	174
Figure 4.5 : Températures de surface le 21 juin à 12h00 (°C). Place du Pilon (Nantes)	175
Figure 4.6 Les influences globales (pertes + apports) vues sur une partie du site	177
Figure 4.7 Les bilans d'influences subies par une surface de référence.	177
Figure 4.8 Somme des pertes dues aux obstructions du ciel pour une partie du site	179
Figure 4.9 Pertes dues aux obstructions du ciel des faces $d$ sur une facette $r$ de référence	179
Figure 4.10 Facteur de vue du ciel	180
Figure 4.11 Pertes dues à l'obstruction du sol pour une partie de la scène	181
Figure 4.12 Pertes dues à l'obstruction du sol par rapport à une facette de référence.	181
Figure 4.13 La somme des pertes des surfaces de l'environnement vue sur une partie de la scène	181
Figure 4.14 La somme des pertes de surfaces appliquée sur une facette de référence	181
Figure 4.15 Facteurs de forme entre la surface et l'environnement minéral	182
Figure 4.16 Facteurs de forme entre une surface de référence et les surfaces environnantes	182
Figure 4.17 La somme des apports infrarouges des facettes	183
Figure 4.18 L'analyse des apports infrarouges des surfaces observés par rapport à une facette de référence	183
Figure 4.19 La somme des apports solaires des surfaces de la scène	183
Figure 4.20 Les apports solaires de surfaces par rapport à une facette de référence	183
Figure 4.21 La somme des apports des surfaces de la scène.	184
Figure 4.22 Les apports thermiques de l'environnement à une face de référence.	184

Figure 4.23 La somme des contributions avec une situation de référence prise en compte incluant l'influence thermique du sol..	184
Figure 4.24 Le bilan de toutes les influences (pertes +gains) sans situation de référence.....	184
Figure 4.25 Les rapports entre les contributions solaires et infrarouges des surfaces observés sur une partie de la scène.....	185
Figure 4.26 L'analyse du rapport entre contributions solaires et infrarouges appliquée à une facette de référence. ....	185
Figure 4.27 Différences d'influence thermique des surfaces dues à la variation des albédos à 0.1. Les valeurs d'albédos de référence sont égales à 0.3 et 0.45. ....	185
Figure 4.28 Différences d'influence thermique de surface dues à la variation des albédos à 0.1. Les valeurs d'albédos de référence sont égales à 0.3 et 0.45. ....	185
Figure 4.29 Rapport entre les apports et les pertes observé sur une partie de la scène.....	186
Figure 4.30 Rapport entre les apports et les pertes pour une facette de référence .....	186
Figure 4.31 L'ensoleillement de la place le 21 juin à 12h.....	187
Figure 4.32 Les flux incidents sur le site incluant les multiréflexions solaires, directes et diffuses. ....	187
Figure 4.33 Bilan des influences incluant l'obstruction du soleil .....	188
Figure 4.34 La partie à l'ombre crée par le masque urbain, le 21 juin à 12h..	188
Figure 4.35 Valeur de facteur de forme limites induisant une élévation de température de 0.1°C .....	189
Figure 4.36 Zone d'influence définie par : - facteur de forme > facteur de forme limite, - $\Delta T_{rd} > \Delta T_{rd\_seuil}$ égale à 0.1°C. ....	189
Figure 4.37 Variation de l'albédo limite pour un seuil d'influence thermique de 0.1°C. ....	190

## **Chapitre 5 Vers une interprétation qualitative physique et spatiale des influences radiatives thermiques**

Figure 5.1 Les caractéristiques réflectives et absorptives des matériaux. ....	199
Figure 5.2 Variation diurne des influences de ( <i>d</i> ) sur ( <i>r</i> ) sous les conditions solaires et thermiques de Nantes le 21 décembre. ....	210
Figure 5.3 Variation diurne des influences de ( <i>d</i> ) sur ( <i>r</i> ) sous les conditions solaire et thermique de Nantes du 21 juin.....	211
Figure 5.4 La relation entre la variation de l'albédo de ( <i>d</i> ) et de ( <i>r</i> ) avec l'influence des flux solaires par rapport à celle des flux infrarouges Condition d'influence d'un sol béton sur une paroi brique et inversement. ....	216
Figure 5.5 Variation diurne du facteur de forme limite le 21 juin à Nantes. $\Delta T_{rd\_seuil}=0.1^{\circ}C$ . ....	218

Figure 5.6 Variation diurne du facteur de forme limite le 21 décembre à Nantes. $\Delta T_{rd\_seuil}=0.1^{\circ}C$ .	219
Figure 5.7 Variation des influences thermiques par rapport à la conductance de la paroi. Cas d'influence d'une paroi brique sur un sol à pavement en béton et inversement (lat.47°, le 21 juin à 12h)	229
Figure 5.8 Variation des influences par rapport au coefficient de transfert convectif externe. Cas d'influence d'une paroi en brique sur un sol béton et inversement. (Lat. 47°, le 21 juin à 12h).	230
Figure 5.9 Variation des différences de températures par rapport aux températures moyennes d'évolution de (r). Cas d'influence d'un paroi brique sur un sol béton et inversement. (Lat. 47°, le 21 juin à 12h). Les deux premiers cas considérant l'influence de la surface par ces réflexions en solaire et leur émission en IR. Le dernier cas prend seulement en considération l'obstruction du soleil.	231
Figure 5.10 Différences de contribution thermique d'un sol présentant des conditions radiatives et thermiques homogène et variable.	232
Figure 5.11 Les dispositions de faces induisant des échanges radiatives maximales.	232
Figure 5.12 Facteur d'influence (ou Parties vues) suivant la situation de la face analysée dans un cas de rue.	233
Figure 5.13 Variation du degré d'obstruction de l'environnement suivant la situation de (r) analysée dans une configuration type rue.	236
Figure 5.14 facteur de forme limite pour une influence seuil de $0.1^{\circ}C$	242

## Chapitre 6 Discussion

Figure 6.1 Les contributions maximums des facettes	251
Figure 6.2 Les facettes de la scène dont le nombre de contributeurs à 50% des influences totales est inférieur à 10% du nombre total des surfaces.	251
Figure 6.3 Calculs actuels nécessaires aux études d'influence.	253
Figure 6.4 Situation de référence	255
Figure 6.5 Situation analysée	255
Figure 6.6 Cas 1	257
Figure 6.7 Comparaison des influences (exprimées en différences de températures) calculées par Solene et estimées par le modèle d'analyse des influences. Cas 1 : les faces (1) et (2) ont les mêmes conditions d'ensoleillement.	258
Figure 6.8 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle appliquée à la façade (1).	258
Figure 6.9 Les influences calculées par Solene et estimées par le modèle pour une orientation de $0^{\circ}$ par rapport au méridien.	260
Figure 6.10 Cas 2	260

Figure 6.11 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle d'analyse des influences. Cas 2 : face (1) au soleil et (2) à l'ombre.	261
Figure 6.12 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle appliquée à la façade (1).	262
Figure 6.13 Cas 3	262
Figure 6.14 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle d'analyse des influences. Cas 3 : face (1) à l'ombre face (2) au soleil.	263
Figure 6.15 Comparaison des influences, calculées par Solene et estimées par le modèle, appliquée à la façade (1).	263
Figure 6.16 Cas 4	264
Figure 6.17 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle d'analyse des influences. Cas 4 : face (1) au soleil, face (2) à l'ombre.	264
Figure 6.18 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle, appliquée à la façade (1).	265
Figure 6.19 Cas 5	265
Figure 6.20 Comparaison des influences calculées par Solene et estimées par le modèle d'analyse des influences. Cas 5 : face (1) à l'ombre, face (2) au soleil.	265
Figure 6.21 Comparaison des influences calculées et estimées par le modèle appliquée à la façade (1).	266
Figure 6.22 Les écarts relatifs du cas 1	269
Figure 6.23 Les écarts relatifs de la façade (1) : cas1	269
Figure 6.24 Les écarts relatifs du cas 2	269
Figure 6.25 Les écarts relatifs de la façade (1) : cas 2 (faces au soleil)	270
Figure 6.26 Les écarts relatifs du cas 3	270
Figure 6.27 Les écarts relatifs de la façade (1) : cas 3 (faces à l'ombre).	270
Figure 6.28 Les écarts relatifs du cas 4	271
Figure 6.29 Les écarts relatifs de la façade (1) : cas 4 (faces au soleil)	271
Figure 6.30 Les écarts relatifs du cas 5	271
Figure 6.31 Les écarts relatifs de la façade (1) : cas5.(faces à l'ombre)	272

## Conclusion et perspectives

Figure 1 Perspectives d'amélioration des calculs du modèle des influences.	281
Figure 2 Schéma relationnel entre les différents moteurs du projet	284

## Tableaux

### Chapitre 1 Problématique et hypothèses

Tableau 1.1 Tableau synthétique des relations existantes entre proportions de la rue canyon et intensité d'îlot de chaleur. La rue canyon étudiée est semi-infinie, se trouvant à la latitude 45° Nord, orientée nord sud, les vents sont orientés à 30° par rapport à l'axe de la rue. (H : hauteur de rue, W : largeur de rue).....	41
---	----

### Chapitre 2 La ville et les phénomènes climatiques thermiques

Tableau 2.1 Estimation du flux solaire incident suivant l'orientation de la face réceptrice. ....	73
Tableau 2.2 La nature des effets microclimatiques de la ville (ville de latitude moyenne avec une population de 1 million environ d'après Oke ) (WMO 1996) .....	85
Tableau 2.3 Les différents types d'images satellitaires et leurs résolutions spatiales et temporelles .....	90
Tableau 2.4 Présentation synthétique des influences des différentes manifestations climatiques sur les ambiances urbaines d'après H. Pénicaud (1978).....	93
Tableau 2.5 Présentation synoptique des différents types d'échange thermique du corps avec son environnement qu'impliquent les facteurs climatiques. ....	96
Tableau 2.6 Les facteurs intervenants sur le confort physiologique thermique	97
Tableau 2.7 Variation du $f_{eff}$ suivant la posture de l'individu (McInthyre 1980). ....	105
Tableau 2.8 Valeurs du coefficient $K_{pe}$ suivant les postures et le site (Givoni 1969) .....	109

### Chapitre 5 Vers une interprétation qualitative physique et spatiale des influences radiatives thermiques

Tableau 5.1 Situation de surface suivant les latitudes et flux incidents.....	197
Tableau 5.2 Synthèse des différents cas d'influence possible entre deux surfaces élémentaires. ....	205
Tableau 5.3 Synthèse des différents descripteurs physiques et spatiaux permettant l'analyse des influences .....	206
Tableau 5.4 Synthèse des différents types de paroi et sol utilisés. ....	208
Tableau 5.5 Variation des influence de ( $d$ ) sur ( $r$ ) suivant les latitudes 0° 23° et 47° .....	209

Tableau 5.6 Rapport entre l'influence solaire et infrarouge de ( <i>d</i> ) sur ( <i>r</i> ). ....	212
Tableau 5.7 Erreurs maximales estimées dans la définition des rapports d'influences des flux CLO comparés aux GLO (%). ....	214
Tableau 5.8 Températures de ( <i>d</i> ) estimées. ....	215
Tableau 5.9 Flux solaires directs et diffus incidents sur une surface horizontale et verticale le 21 <sup>ème</sup> jour de chaque mois à midi. ....	215
Tableau 5.10 Détermination des facteurs d'échanges radiatifs solaires des différents cas d'influence ....	217
Tableau 5.11 Variation des facteurs de forme limite pour les latitudes 0°, 23° et 47° Nord, le midi du 21 du mois. $\Delta T_{rd\_seuil}=0.1^{\circ}C$ . ....	219
Tableau 5.12 Variation des facteurs de forme limites propres aux conditions d'influence entre sol béton et paroi brique et sol béton paroi béton. ....	220
Tableau 5.13 Variation des facteurs de forme entre deux surfaces normales et parallèles. ....	221
Tableau 5.14 Influence radiative thermique du ciel par rapport à celle des surface (%) : ( <i>d</i> ) ensoleillées et à l'ombre. ....	222
Tableau 5.15 Rapport d'influences (%) entre les pertes (dues à l'obstruction du ciel) et les gains de chaleur (dus à <i>d</i> ). ....	223
Tableau 5.16 Rapport entre influence diffuse du ciel masqué avec celle de la surface ( <i>d</i> ) soumise au rayonnement solaire direct. ....	224
Tableau 5.17 Flux diffus solaires et infrarouges incidents sur une surface horizontale. ....	225
Tableau 5.18 Rapport entre influence de la surface ( <i>d</i> ) étant ensoleillée et perte thermique par obstruction du soleil ( $F_{d,r}=0.2$ ). ....	226
Tableau 5.19 Influence due à la variation des caractéristiques du matériau. ....	226
Tableau 5.20 Influence totale de ( <i>d</i> ) induisant une obstruction du ciel. ....	227
Tableau 5.21 Influence totale de ( <i>d</i> ) induisant une obstruction du ciel et du soleil. ....	228
Tableau 5.22 Variation des facteurs de vue du ciel de trois configurations urbaines types ....	234
Tableau 5.23 Schémas de répartition des quantités d'énergies solaires incidentes sur trois configurations types orientées Est et Sud ....	234
Tableau 5.24 Schéma de répartition des apports thermiques analysés sur trois configurations types orientées Est et Sud ....	235
Tableau 5.25 Variation des influences par obstruction analysée sur trois configurations types. ....	237
Tableau 5.26 Variation du bilan des obstructions (ciel + sol) analysés sur trois configurations types. ....	237
Tableau 5.27 Caractéristiques formelles des formes urbaines. ....	238
Tableau 5.28 Caractéristiques formelles de la rue. ....	239
Tableau 5.29 Caractéristiques formelles d'un espace en forme de U ....	240
Tableau 5.30 L'objectif du modèle ....	241

Tableau 5.31 Le contrôle des influences radiatives par la modification de la visibilité entre les surface ou par changement des qualités radiatives de la zone d'influence (ombrage).....	241
Tableau 5.32 Visibilité solaire et entre surfaces .....	243

## **Chapitre 6 Discussion**

Tableau 6.1. Estimation des ordres de grandeur des erreurs dues aux hypothèses entreprises dans les bilans thermiques de surface (Verseghy et al. 1989).....	251
Tableau 6.2 Les différentes situations et orientations analysées.....	256
Tableau 6.3 Synthèse des observations et remarques des tests comparatifs...	268

## **Conclusion et perspectives**

Tableau 1 Types d'indicateurs .....	284
Tableau 2 Synthèses des différents types d'indicateurs et leurs rôles. ....	285
Tableau 3 La définition d'indicateurs synthétiques microclimatiques .....	286



## Table des matières



<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>15</b>
Contexte de la recherche	17
Développement de la recherche	23
<b>CHAPITRE 1</b>	
<b>PROBLÉMATIQUE ET HYPOTHÈSES</b>	<b>27</b>
1.1 Problématique	30
1.2 <b>Éléments de réponse : développement d'une approche qualitative explicative</b>	<b>36</b>
1.2.1 Analyse thermique urbaine à partir des modèles descriptifs et explicatifs.	40
1.2.1.1 Analyse à partir de modèle physique complexe	40
1.2.1.2 Analyse reposant sur des expressions simplifiées	41
1.2.2 Développement d'un modèle d'analyse radiative thermique urbain	46
1.2.2.1 Hypothèses relatives au modèle	46
<b>CHAPITRE 2</b>	
<b>LA VILLE ET LES PHÉNOMÈNES CLIMATIQUES THERMIQUES</b>	<b>53</b>
2.1 Le microclimat et la conception urbaine	55
2.2 Le microclimat urbain	64
2.2.1 Introduction aux transferts thermiques	64
2.2.1.1 La conduction	65
2.2.1.2 Le rayonnement	65
2.2.1.3 La convection	68
2.2.2 Le rayonnement solaire	70
2.2.2.1 Rayonnement direct- rayonnement diffus	71
2.2.2.2 Les coordonnées astronomiques	71
2.2.2.3 Les aspects géométriques du rayonnement solaire	73
2.2.3 Les échelles des manifestations microclimatiques	74
2.2.4 Bilan énergétique et thermique	76
2.2.5 Le bilan radiatif	77
2.2.6 Ilot de chaleur	82
2.3 <b>Les différentes études de caractérisation climatique de la ville</b>	<b>85</b>
2.3.1 Les mesures	87
2.3.1.1 Les mesures in situ	87
2.3.1.2 Les modèles réduits	89

2.3.1.3	La télédétection	89
2.3.2	Les modèles physiques	91
<b>2.4</b>	<b>Le confort thermique en milieu extérieur</b>	<b>92</b>
2.4.1	Généralités	93
2.4.2	Le confort hygrothermique	95
2.4.2.1	Echanges avec l'environnement	97
2.4.2.2	Mécanismes thermorégulateurs	98
2.4.3	Indices	99
2.4.3.1	Indices de confort thermique	100
2.4.3.2	Indices de stress thermique	103
2.4.4	Le rayonnement et le confort thermique	104
2.4.4.1	Rayonnement de grande longueur d'onde	104
2.4.4.2	Rayonnement solaire	108
2.4.4.3	Les effets du rayonnement sur le confort hygrothermique	109
2.4.5	Indices de confort en milieu extérieur	112
<b>2.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>118</b>
<b>CHAPITRE 3</b>		
<b>CONSTRUCTION DE LA MÉTHODE D'ANALYSE DES IMPACTS RADIATIFS THERMIQUES</b>		<b>131</b>
<b>3.1</b>	<b>Modélisation des influences thermiques entre deux surfaces</b>	<b>135</b>
3.1.1	Deux axes de recherche	139
3.1.1.1	Développement des influences	140
3.1.2	Modélisation numérique	142
<b>3.2</b>	<b>Les principes des études d'influence</b>	<b>147</b>
3.2.1.1	Définition du vocabulaire d'étude des influences	148
3.2.2	Analyse des influences	150
3.2.2.1	Analyse Physique	150
3.2.2.2	Etude spatiale	152
3.2.2.3	Echelle d'observation	158
3.2.3	Simulation solaire et thermique : SOLENE	161
<b>3.3</b>	<b>Conclusion</b>	<b>164</b>
<b>CHAPITRE 4</b>		
<b>ILLUSTRATIONS APPLICATION À UN ESPACE URBAIN. EXEMPLE DE LA PLACE DU PILORI</b>		<b>169</b>
<b>4.1</b>	<b>Analyse des influences radiatives thermiques</b>	<b>171</b>
4.1.1	Introduction	171
4.1.2	Températures de surface	175

4.1.3	Intensité d'échange et influence	176
4.1.4	Les pertes	179
4.1.4.1	Les pertes par obstruction du ciel	179
4.1.4.2	Les pertes par obstruction du sol	180
4.1.5	Les apports et contributions	182
4.1.5.1	Influence de la variation d'aménagement	185
4.1.6	Rapports entre pertes et contributions	186
4.1.7	L'impact solaire sur les températures et les influences	187
4.1.8	Les grandeurs limites	188
<b>CHAPITRE 5</b>		
<b>VERS UNE INTERPRÉTATION QUALITATIVE PHYSIQUE</b>		
<b>ET SPATIALE DES IMPACTS RADIATIFS THERMIQUES</b>		<b>191</b>
<b>5.1</b>	<b>Analyse climatique thermique des formes urbaines</b>	<b>194</b>
5.1.1	Définition des indicateurs climatiques	195
5.1.1.1	Caractérisation solaire des surfaces	196
5.1.1.2	Les échanges radiatifs et convectifs	198
5.1.1.3	Les matériaux urbains	199
5.1.1.4	Végétation	200
5.1.1.5	Autres facteurs climatiques	200
<b>5.2</b>	<b>Interprétation physique des influences. Etude des influences entre deux surfaces</b>	<b>201</b>
<b>élémentaires</b>		
5.2.1	Les études d'influence	204
5.2.1.1	Influence d'une surface sur une autre	208
5.2.1.2	Les influences par obstruction	221
5.2.1.3	Coefficients	228
<b>5.3</b>	<b>Interprétation formelle des influences radiatives thermiques</b>	<b>231</b>
5.3.1	Les contributions	232
5.3.2	Les pertes par obstruction	235
5.3.3	Caractérisation radiative thermique de l'espace urbain	237
5.3.4	Analyse des influences radiatives thermiques et l'aide à la conception	241
<b>5.4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>243</b>
<b>CHAPITRE 6</b>		
<b>DISCUSSION</b>		<b>247</b>
<b>6.1</b>	<b>La validation des modèles de simulation thermique urbaine</b>	<b>249</b>
<b>6.2</b>	<b>Discussion de l'approche qualitative des influences</b>	<b>252</b>
6.2.1	Tests comparatifs : Comparaison de modèles	255
6.2.1.1	Synthèse	266

6.2.2	Limites du modèle	272
6.3	Conclusion	274
	<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES</b>	<b>275</b>
	Eléments de conclusion	277
	Perspectives de recherche	280
	Développement du modèle d'analyse	280
	Intégration du confort dans le modèle d'analyse des influences	282
	Proposition formelle à partir de la contrainte d'influence radiative thermique	283
	Développement de descripteurs climatiques urbains	283
	<b>NOMENCLATURE</b>	<b>287</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>295</b>
	<b>TABLES DES ILLUSTRATIONS</b>	<b>309</b>
	Figures	311
	Tableaux	317
	<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	<b>321</b>



## Propositions pour une analyse radiative thermique des espaces urbains

### Résumé

La prise en compte des ambiances urbaines dans la conception pose la question de l'interprétation spatiale des phénomènes physiques notamment microclimatiques dans le projet. Ce travail tente d'y répondre partiellement en proposant un modèle qui traite du rapport entre phénomènes climatiques thermiques et formes urbaines.

Ce modèle permet l'analyse d'impact des formes urbaines sur les échanges radiatifs thermiques. Il repose sur le développement d'expressions physiques qui tentent de concilier la représentativité spatiale et la fidélité d'interprétation des phénomènes physiques. L'impact radiatif est défini par les transformations thermiques d'une surface provoquées par le changement d'environnement bâti.

L'illustration des différents types d'analyse et d'interprétation des interactions entre phénomènes et formes que permet le modèle est présentée. Elle tente d'introduire un essai de caractérisation spatiale et physique des impacts radiatifs de l'urbain.

La discussion de la fidélité d'interprétation des phénomènes physiques permet de proposer d'éventuelles perspectives de développement du modèle vers une analyse plus poussée des impacts radiatifs et convectifs du cadre bâti. Ces perspectives abordent également la question de l'utilisabilité et de l'interprétabilité des grandeurs physiques dans l'analyse des ambiances physiques climatiques.

#### Mots clés :

Espaces urbains, microclimat, analyse d'impact, phénomènes radiatifs thermiques, confort hygrothermique.

## Propositions for thermal radiative analysis of urban spaces

### Abstract

The problematic of the improvement of urban environment lead to take into account microclimatic phenomena in urban development. This work attempts to develop a model, which allows the extraction of knowledge about the relations between urban form and thermal phenomena. This model permits the analysis of the impact of urban form on thermal radiative exchanges. It is based on the conciliation of spatial representativeness and interpretation faithfulness of physical phenomena. The impact is defined as thermal transformation led by building environment changes, which are due to urbanization. Some illustrations of the different kind of analysis and interpretations that the model leads to are presented.

Finally, the faithfulness of the physical phenomena interpretations are discussed. Parallel to this, some perspectives are proposed about the development of the model for the perception impact studies due to the variation of spatial configuration.

#### Key words :

Urban spaces, microclimat, impact analysis, thermal radiative phenomena, thermal comfort.

**Discipline :** Sciences Pour l'Ingénieur Option Architecture.

**Filière doctorale :** Ambiances Architecturales et Urbaines.

Laboratoire CERMA UMR CNRS 1563

Ecole d'Architecture de Nantes

Rue Massenet 44300 Nantes