



HAL
open science

Synthèse de paysages dans l'infrarouge thermique pour la simulation d'images de télédétection

Thierry Poglio

► **To cite this version:**

Thierry Poglio. Synthèse de paysages dans l'infrarouge thermique pour la simulation d'images de télédétection. Océan, Atmosphère. Université de Nice Sophia-Antipolis, 2002. Français. NNT : . pastel-00880312

HAL Id: pastel-00880312

<https://pastel.hal.science/pastel-00880312v1>

Submitted on 5 Nov 2013

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.

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier M. Albert Bijaoui d'avoir bien voulu présider le jury de cette thèse, ainsi que M. Julien Borgnino d'avoir accepté mon inscription dans son Ecole Doctorale.

J'exprime également toute ma reconnaissance à MM. Jean-Philippe Gastellu-Etchegorry et Marc-Philippe Stoll, qui ont accepté d'exercer le rôle de rapporteurs. Je remercie également M. Pierre Simoneau d'avoir accepté de participer au jury.

Un grand merci à M. Lucien Wald, mon directeur de thèse, pour sa patience et son sens critique, sans lesquelles cette thèse n'aurait pu être rédigée. Je n'oublie pas non plus M. Thierry Ranchin, qui a suivi mon travail dans l'ombre, et qui mérite tout autant ma reconnaissance.

Il en est de même pour M. Eric Savaria, qui est à l'origine de ce travail de thèse. Souvenons-nous également que sans son intervention en fin de première année, ce travail ne serait pas encore achevé ...

Je remercie également tous mes collègues de travail, d'Alcatel Space et de l'Ecole des Mines, ainsi que toutes les personnes qui m'ont apporté leur amitié et leur soutien, et ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de cette thèse.

Un dernier remerciement, mais pas le moindre, pour ma petite Karine, qui a attentivement relu et commenté cette thèse, pour faire en sorte que le lecteur ne trébuche devant quelques coquilles résiduelles ...

Table des matières

TABLE DES MATIERESi**CHAPITRE 1 : INTRODUCTION.....1**

1.1. OBSERVATION DE LA TERRE ET SIMULATION.....	3
1.2. OBJECTIF DE LA THESE.....	4
1.3. PARTENARIATS.....	5
1.4. PLAN DE LA THESE.....	5

CHAPITRE 2 : GLOSSAIRE7

2.1. QUANTITES GENERALES.....	9
2.2. QUANTITES LIEES A LA GEOMETRIE 3-D.....	9
2.3. QUANTITES LIEES AUX RAYONNEMENTS.....	10
2.4. QUANTITES LIEES A LA CONDUCTION.....	11
2.5. QUANTITES LIEES A LA CONVECTION.....	12
2.6. QUANTITES LIEES A LA VEGETATION ET A L'HUMIDITE.....	12

CHAPITRE 3 : PHYSIQUE ET EXPRESSION DU RAYONNEMENT INFRAROUGE 13

3.1. GENERALITES.....	15
3.1.1. <i>Le rayonnement solaire</i>	15
3.1.2. <i>Le rayonnement atmosphérique</i>	16
3.1.3. <i>La température</i>	16
3.2. LA LUMINANCE PROVENANT DU PAYSAGE.....	16
3.2.1. <i>Définition et expression de la luminance</i>	16
3.2.2. <i>L'approche de type radiosité</i>	21
3.3. LA TEMPERATURE DES OBJETS.....	27
3.3.1. <i>Différentes expressions de la température de surface</i>	27
3.3.2. <i>Le bilan des flux</i>	27
3.3.3. <i>L'influence du bilan des flux sur la température à travers un exemple</i>	30
3.3.4. <i>Estimation de la température</i>	31
3.4. CONCLUSION.....	33

CHAPITRE 4 : LA SIMULATION EN INFRAROUGE THERMIQUE..... 35

4.1. SPECIFICATIONS D'UN SIMULATEUR DANS L'INFRAROUGE THERMIQUE.....	37
4.1.1. <i>De l'utilité d'un simulateur de scènes</i>	37
4.1.2. <i>Spécifications et desiderata utilisateurs</i>	38
4.1.3. <i>Principales caractéristiques inhérentes au domaine spectral</i>	40
4.1.4. <i>Etat de l'art sur la simulation d'images à haute résolution spatiale</i>	40
4.2. CHOIX D'UNE METHODE DE SIMULATION.....	40
4.2.1. <i>Utilisation de données réelles</i>	41
4.2.2. <i>Génération de données synthétiques</i>	41
4.3. PHYSIQUE DE L'INFRAROUGE THERMIQUE ET SIMULATION EN 3-D.....	41
4.3.1. <i>Hypothèses induites par une modélisation 2-D du paysage</i>	41
4.3.2. <i>Les interactions conductive et convective</i>	42
4.3.3. <i>Les interactions radiatives</i>	48
4.3.4. <i>Classification de l'importance des différents phénomènes physiques</i>	53
4.4. SPECIFICATIONS DU SIMULATEUR OSIRIS.....	53
4.4.1. <i>Fonctionnement du simulateur OSIRIS</i>	53
4.4.2. <i>Les entrées</i>	54
4.4.3. <i>Les sorties</i>	55
4.4.4. <i>Les modèles physiques et mathématiques utilisés</i>	56

CHAPITRE 5 : MODELISATION DU PAYSAGE.....	61
5.1. L'ELEMENT.....	63
5.1.1. Principales difficultés liées au domaine infrarouge.....	63
5.1.2. Définition.....	63
5.1.3. Les différentes caractéristiques.....	63
5.1.4. Expression de l'élément.....	66
5.2. MODELISATION DU PAYSAGE.....	67
5.2.1. Les approches raster et vecteur.....	68
5.2.2. Contraintes de la synthèse.....	68
5.2.3. Modélisation du paysage.....	69
5.2.4. Obtention du modèle.....	70
5.2.5. Obtention du maillage.....	71
5.3. CONCLUSION.....	79
CHAPITRE 6 : LE SIMULATEUR OSIRIS : ARCHITECTURE ET FONCTIONNEMENT.....	81
6.1. GENERALITES.....	83
6.1.1. Architecture globale.....	83
6.1.2. Gestion des textures.....	84
6.2. MODULE DE PRE -TRAITEMENTS (S0).....	85
6.2.1. Les entrées-sorties.....	85
6.2.2. Fonctionnement.....	85
6.3. PREDICTION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE – MODULE THERMIQUE (S1).....	87
6.3.1. Les entrées-sorties.....	87
6.3.2. Fonctionnement.....	88
6.3.3. Base de données.....	90
6.4. PREDICTION DE LA LUMINANCE – MODULE RADIATIF SPECTRAL (S2).....	90
6.4.1. Les entrées-sorties.....	90
6.4.2. Fonctionnement.....	91
6.5. SORTIES DU SIMULATEUR.....	93
6.5.1. Les différentes sorties possibles.....	93
6.5.2. Génération des images.....	93
CHAPITRE 7 : VALIDATION ET ILLUSTRATIONS.....	97
7.1. VALIDATION DU SIMULATEUR.....	99
7.2. VALIDATION DE LA METHODOLOGIE DE SIMULATION.....	99
7.2.1. Description de l'exemple.....	99
7.2.2. Analyse des ombres solaires.....	101
7.2.3. Influence de la portion de ciel vu.....	104
7.3. EFFICACITE DE LA SIMULATION DE LA TEXTURE.....	106
7.4. ILLUSTRATION DE L'INFLUENCE DE LA BANDE SPECTRALE.....	108
CHAPITRE 8 : CONCLUSION.....	113
CHAPITRE 9 : BIBLIOGRAPHIE.....	119

Chapitre 1

Introduction

1.1. Observation de la Terre et simulation

Les applications de l'imagerie dans l'infrarouge thermique couvrent des domaines divers, tels la météorologie, la gestion de l'environnement ou le renseignement militaire. Ces applications exploitent l'information radiométrique spatiale ou spectrale du paysage observé. Cette information est recueillie par des capteurs, qui sont souvent des imageurs, et est délivrée aux utilisateurs sous forme d'une image représentative du paysage. L'acquisition de l'image résulte d'un système complexe, où interviennent divers phénomènes physiques et de multiples traitements liés aux sciences de l'information et de la communication (figure 1.1).

Le système d'acquisition d'images de télédétection s'étend du paysage observé, à l'image du paysage fourni par le système. Celle-ci contient différentes mesures et caractéristiques géophysiques ou radiométriques décrivant le paysage. Ces mesures résultent de la combinaison d'un grand nombre de facteurs :

- radiométrie réelle caractérisant le paysage,
- interactions onde-matière et onde-atmosphère,
- détection, optronique du capteur,
- traitements informatiques bord (compression, égalisation...),
- mémoire de masse,
- transmission des données au sol,
- réception, déformatage, décompression...,
- restitution de l'information (déconvolution, débruitage...) et génération d'une image.

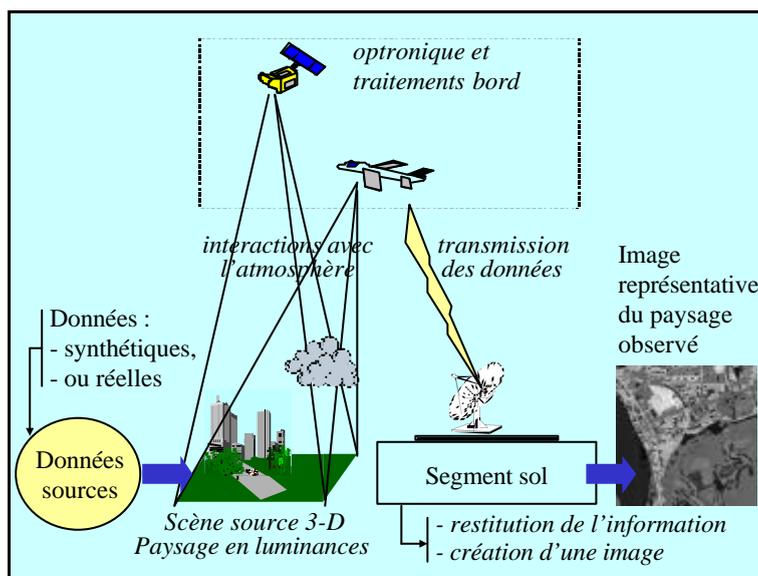


Figure 1.1 : illustration du système d'observation ; simulation à l'aide de données sources synthétiques ou réelles

Les images à une résolution spatiale de l'ordre de quelques mètres ne sont pas encore disponibles dans l'infrarouge thermique et de nouveaux systèmes d'observation sont à l'étude.

Pour de telles études, la simulation est un outil irremplaçable car elle permet la maîtrise de toutes les caractéristiques du système d'observation (Billat, 1997 ; Jaloustre-Audouin, 1998). La simulation délivre une image telle qu'elle aurait été observée par le système.

1.2. Objectif de la thèse

Des simulateurs de système d'acquisition d'une part, et des simulateurs de paysages scènes sources d'autre part, ont été développés. Par exemple, dans le domaine de l'observation de la Terre, Alcatel Space Industries a développé le simulateur AS³-I capable de reproduire les différents éléments constituant le système d'observation, tant en mode actif que passif pour diverses longueurs d'onde.

Le simulateur est un dispositif visant à reproduire le comportement d'un système dont on désire étudier soit le fonctionnement, soit enseigner l'utilisation (Petit-Larousse, 1991). Il permet ainsi aux utilisateurs d'avoir une vision globale d'un phénomène sans pour autant attendre sa réalisation. De fait, il se révèle être un outil indispensable pour l'étude amont de systèmes complexes.

Parmi tous les simulateurs utilisés pour les études amont, nous nous intéressons aux simulateurs de paysages (scène source 3-D dans la figure 1.1) plus particulièrement dans l'infrarouge thermique, et précisément aux longueurs d'onde allant de 3 à 14 μm .

Deux approches permettent de simuler le rayonnement provenant d'un paysage. Une première approche consiste à utiliser des images sources à haute résolution représentant des sites réels. Une deuxième approche consiste à synthétiser une image à partir de la connaissance des différents phénomènes physiques qui régissent le comportement du paysage, au travers des échanges énergétiques et des interactions entre les objets qui le composent. L'approche s'appuyant sur des images réelles est aujourd'hui couramment employée pour la simulation dans les courtes longueurs d'onde. En infrarouge thermique, le signal provenant du paysage dépend de l'histoire de ce dernier au cours des heures précédant l'acquisition. L'utilisation d'images sources réelles ne permet de simuler que des images en sortie de système d'observation représentatives de conditions d'acquisition et d'historique identiques à ceux des images sources.

Dans ce travail, on désire simuler des conditions météorologiques variables, des lieux, des heures d'acquisition et des paysages différents d'une part, ainsi que des scènes pour tout intervalle spectral compris entre 3 et 14 μm d'autre part. Afin de remplir au mieux ces spécifications, une approche par synthèse de paysages a été sélectionnée. En infrarouge thermique, le flux provenant d'un objet est pour partie émis par cet objet et pour partie dû à la réflexion de l'ensemble des flux spectraux incidents. Pour chaque objet du paysage, le simulateur de paysages prédit les échanges de chaleur entre les objets, l'évolution temporelle du bilan des flux, l'évolution temporelle de la température de surface, l'émission propre de l'objet ainsi que les réflexions spectrales des flux incidents.

L'objectif de cette thèse est de spécifier, concevoir, et développer un prototype de simulateur de synthèse de paysages à trois dimensions à haute résolution spatiale dans l'infrarouge thermique.

Pour cela, une analyse complète de l'ensemble des phénomènes physiques qui régissent le comportement du paysage doit être menée. Cette analyse concerne le comportement radiatif spectral dans les longueurs d'onde d'intérêt, ainsi que le comportement énergétique du paysage. L'influence des variations de bilan de flux et d'échanges de chaleur au sein du paysage, tout comme l'impact de ces variations sur la température doivent être quantifiés.

Avant de pouvoir générer une image représentative du comportement d'un paysage soumis à un environnement météorologique donné, le paysage doit être modélisé. Généralement, celui-ci est composé d'objets naturels (forêts, arbres, prairies...) et artificiels (routes, bâtiments...). En synthèse d'image dans les courtes longueurs d'onde, ces objets sont représentés par des polygones. Différents attributs leurs sont associés, tels les matériaux qui les constituent, ou leur couleur par exemple. L'estimation des échanges d'énergie et de la luminance qui provient du paysage est calculée sur ces objets. En infrarouge thermique, la température des objets est une notion fondamentale, et doit pouvoir être modélisée, ainsi que son évolution dans le temps. La représentation du paysage doit être adaptée à cette exigence, spécifique à ce domaine spectral.

1.3. Partenariats

Cette thèse a été effectuée à la fois au sein du service «Qualité Image et Traitements» d'Alcatel Space Industries, et du Groupe Télédétection & Modélisation du Centre d'Energétique de l'Ecole des Mines de Paris. Elle a bénéficié du support financier de l'A.N.R.T. (Association Nationale pour la Recherche Technologique).

1.4. Plan de la thèse

Le présent chapitre constitue l'introduction au manuscrit ; il précise le sujet de thèse, les besoins pour l'imagerie en infrarouge thermique, et l'intérêt de la simulation lors de la conception, des spécifications, et de la réalisation des futurs systèmes d'observation.

Le deuxième chapitre récapitule sous forme de glossaire les différents symboles et notations utilisés dans cette thèse. Pour chacun de ces symboles, la définition est donnée, et, si nécessaire, un schéma illustre cette définition.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du rayonnement infrarouge et à son expression mathématique. Une première partie précise les différentes sources du rayonnement dans le domaine spectral. Elle donne également l'ensemble des équations et techniques permettant d'exprimer le rayonnement provenant d'une scène. La conservation de l'énergie, les rayonnements réfléchis et émis, ainsi que les caractéristiques directionnelles et spectrales sont étudiés. La technique d'expression du rayonnement selon la méthode de la radiosité est présentée. Une seconde partie s'intéresse à la température des objets, quantité fondamentale en infrarouge thermique, et son influence sur le rayonnement : définitions, méthodes d'obtention, et impact des conditions météorologiques.

Les chapitres suivants, 4, 5, et 6, représentent la partie innovante de mon travail par rapport à l'état de l'art.

Le chapitre 4 est dédié à la simulation de paysages. Il essaie de répondre aux questions suivantes : quel est l'intérêt de la simulation ? Qu'attendent les utilisateurs d'une image simulée ? Quelles techniques de simulation employer ? Les desiderata des utilisateurs sont listés, et quelques exemples de simulateurs sont donnés. Une étude comparative de l'importance des différents phénomènes physiques et l'impact de ceux-ci sur la luminance provenant du paysage est présentée. Elle s'intéresse aux différences de signal qui existent dans une image simulée, en fonction du type de modélisation choisi : bidimensionnel (2-D), ou tridimensionnel (3-D). Dans le cas 2-D, qui ne constitue qu'une approximation de la réalité, certains phénomènes physiques, tels les ombres solaires par exemple, ne peuvent être pris en compte. Cela engendre une mauvaise estimation du signal reçu de la scène. Une simulation précise nécessite donc une modélisation 3-D. En étudiant l'importance de l'impact des différents phénomènes physiques 3-D sur la simulation, nous avons obtenu une classification de ces phénomènes. Cette dernière permet de définir les priorités de simulation. Combinées aux souhaits des utilisateurs, cela a permis de définir les spécifications du simulateur *OSIRIS*, qui sont décrites dans ce chapitre. L'acronyme utilisé ici a été choisi pour des besoins de communication dans des congrès anglophones ; il signifie *Outdoor Scene and InfraRed Image Simulation*. *OSIRIS* a bénéficié de certaines modélisations développées dans le simulateur 2-D *SPIrou* (Jaloustre-Audouin, 1998).

Le chapitre cinq propose une méthodologie de représentation du paysage qui permette :

- de satisfaire les *desiderata* des utilisateurs,
- de simuler précisément le signal provenant du paysage,
- d'être compatible avec les exigences matérielles informatiques qui limitent aussi bien en termes temps de calcul et de ressources mémoire.

Cette représentation est basée sur les *éléments*, concept que nous avons inventé par nécessité, et qui constituent une extension volumique et temporelle des entités utilisées classiquement en synthèse d'images dans les courtes longueurs d'onde. Les caractéristiques de ces nouvelles entités sont discutées ; la méthode d'obtention des éléments à partir d'un paysage est présentée. Par ailleurs, les

similarités et différences existantes entre ce nouveau mode de représentation et les modes classiques sont exposées.

Le sixième chapitre propose une architecture logicielle adaptée à la synthèse d'images en infrarouge thermique. Cette architecture s'articule autour de quatre modules, chacun ayant un rôle spécifique présenté et détaillé :

- création des éléments,
- prédiction des températures de surface,
- estimation du rayonnement provenant du paysage dans la bande spectrale d'intérêt,
- génération d'une image en luminance selon la direction de visée souhaitée.

Chaque module a été implanté séparément, par commodité et par soucis de validation partielle. L'outil réalisé permet la synthèse de paysage et l'obtention d'images en luminance.

Enfin, le chapitre sept illustre l'apport et l'efficacité de la méthodologie et de l'architecture utilisées pour la simulation d'images infrarouge par l'intermédiaire de quelques exemples. Les effets des ombres solaires, de l'atmosphère, et de la bande spectrale notamment sont analysés et commentés.

La conclusion de ce travail de thèse est présentée dans le chapitre huit. Elle analyse le travail effectué tout au long de ces trois années de thèse. Plusieurs perspectives et voies d'amélioration de la méthodologie et de l'architecture proposées sont mises à jour. Cependant, de nombreuses questions restent ouvertes, notamment sur la capacité des ressources informatiques actuelles à simuler des paysages complexes de grande taille et à haute résolution spatiale dans l'infrarouge thermique.

Finalement, la bibliographie est répertoriée dans le neuvième et dernier chapitre.

Chapitre 2

Glossaire

Les tableaux 2.1 à 2.6 présentent les différentes quantités utilisées dans cette thèse. Dans les cas où ces quantités sont des constantes, les valeurs numériques que nous donnons sont celles qui ont été utilisées pour effectuer les simulations.

Les notations employées ne sont pas toutes universelles ; en effet, nous avons été confrontés à des différences de nomenclature existant entre deux communautés : celle étudiant l'infrarouge d'une part, et celle étudiant la synthèse d'images d'autre part. Nous avons, suivant la pertinence des notations et le domaine étudié, tantôt choisi la nomenclature utilisée par la première communauté, généralement tirée de Gaussorgues (1972) ou Guyot (1992), tantôt choisi celle utilisée par la seconde communauté. Dans ce cas, les notations utilisées proviennent de Sillion et Puech (1994).

2.1. Quantités générales

Quantités	Unités S.I.	Valeurs numériques	Commentaires
E	J	-	Energie interne d'un corps
S	J.K ⁻¹	-	Entropie d'un corps
T	K	-	Température d'un objet
T_a	K	-	Température de l'air (généralement à 2 m de l'objet)
T_s	K	-	Température de surface d'un objet
T_B	K	-	Température de brillance
$T_{aéro}$	K	-	Température aérodynamique
t	s	-	Temps
Δt	s	-	Intervalle de temps entre deux évènements
R, h	m	-	Diamètre de la pupille et altitude du capteur
f	m	-	Focale de l'instrument
u_c	m ⁻¹	-	Fréquence de coupure de l'instrument
p_d, p_s	m	-	Pas d'échantillonnage du capteur, au sol

Tableau 2.1 : quantités générales utilisées dans la description des énergies, températures, durées et pour divers paramètres liés à l'instrument et à la prise de vue.

2.2. Quantités liées à la géométrie 3-D

Quantités	Unités S.I.	Valeurs numériques	Commentaires
\mathbf{x}	(m,m,m)	-	Coordonnées vectorielles d'un point de l'espace
x, y, z	m	-	Coordonnées d'un point de l'espace
D, D_x, D_y	m	-	Intervalle de distance
\mathbf{r}	(m,m,m)	-	Vecteur position
\mathbf{q}_j	rad	-	Coordonnées angulaires d'un point quelconque de l'espace dans le repère X, Y, Z.
$\mathbf{q}_s \mathbf{j}_s$	rad	-	Coordonnées angulaires du soleil
$\mathbf{q}_v \mathbf{j}_v$	rad	-	Coordonnées angulaires de l'observateur

W	sr	-	Ensemble des directions q, j qu'un point x de l'espace est susceptible de voir
w	sr	-	Direction particulière q, j qu'un point x de l'espace est susceptible de voir
n	(m,m,m)	-	Normale à une surface
r_{ij}	m	-	Distance entre deux objets i et j
A	m ²	-	Surface d'un objet
V_{ij}	-	-	Facteur de visibilité entre les objets i et j
F_{ij}	-	-	Facteur de forme entre les objets i et j ; double intégrale d'angle solide sous lequel les deux objets se voient
M	-	-	Matrice des facteurs de forme

Tableau 2.2 : quantités liées à la géométrie du paysage ou des objets ; en caractères gras, les quantités vectorielles

La figure 2.1 illustre les conventions que nous avons utilisé pour écrire l'orientation de la scène. L'axe Z est orienté vers le zénith, l'axe Y vers l'est. L'axe X est tel que le repère (X,Y,Z) est direct, et est orienté vers le sud local. Dans ces conditions, le parcours virtuel du soleil s'effectue dans le sens rétrograde, avec $\partial j_s / \partial t \leq 0$.

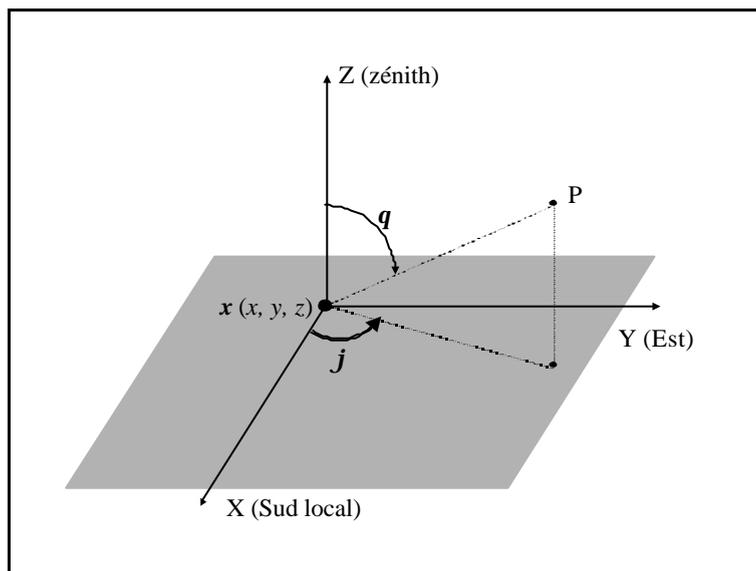


Figure 2.1 : conventions utilisées pour l'orientation de la scène

2.3. Quantités liées aux rayonnements

Quantités	Unités S.I.	Valeurs numériques	Commentaires
λ	m	-	Longueur d'onde
h	kg.m ² .s ⁻¹	6.6237 10 ⁻³⁴	Constante de Planck
c	m.s ⁻¹	2.9979 10 ⁸	Célérité de la lumière
n	-	1	Indice du milieu
k	kg.m ² .s ⁻² .K ⁻¹	1.381 10 ⁻²³	Constante de Boltzmann
c_I	W.m ²	1.191 10 ¹⁶	-

c_2	m.K	$1.439 \cdot 10^{-2}$	-
s	$W.m^{-2}.K^{-4}$	$5.67 \cdot 10^{-8}$	Constante de Stefan
F_i	$W.m^{-2}$	-	Flux incident
F_a	$W.m^{-2}$	-	Flux absorbé
F_t	$W.m^{-2}$	-	Flux transmis
F_r	$W.m^{-2}$	-	Flux réfléchi
a	-	-	Coefficient d'absorption
t	-	-	Coefficient de transmission
r	-	-	Coefficient de réflexion (ou réflectance)
e	-	-	Emissivité
G	$W.m^{-2}$	-	Flux de rayonnement solaire global
G_{direct}	$W.m^{-2}$	-	Flux de rayonnement solaire direct
G_{diffus}	$W.m^{-2}$	-	Flux de rayonnement solaire diffus
L_a	$W.m^{-2}$	-	Flux de rayonnement atmosphérique global
E	$W.m^{-2}$	-	Flux de rayonnement émis
R_{net}	$W.m^{-2}$	-	Rayonnement net global
			Albédo ; fraction du rayonnement solaire réfléchi par rapport au rayonnement solaire incident :
a	-	-	$a = \frac{\int r(I)G(I)dI}{\int G(I)dI}$
G_s	$W.m^{-2}.\mu m^{-1}$	-	Rayonnement solaire spectral
L_{as}	$W.m^{-2}.\mu m^{-1}$	-	Rayonnement atmosphérique spectral
L^{bb}	$W.m^{-3}.sr^{-1}$	-	Luminance spectrale du corps noir
L	$W.m^{-2}.sr^{-1}$	-	Luminance provenant d'un objet
L_e	$W.m^{-2}.sr^{-1}$	-	Luminance émise
L_i, h_i	$W.m^{-2}.sr^{-1}$	-	Luminance incidente
f_r	sr^{-1}	-	Fonction de distribution des réflectances bidirectionnelles (indicatrice de diffusion)
k_s, k_d	-	-	Fractions de rayonnement spéculaire et diffus
B	$W.m^{-2}$	-	Emittance ou radiosité provenant d'un objet
H_i	$W.m^{-2}$	-	Emittance ou radiosité incidente
R_j	$W.m^{-2}$	-	Emittance ou radiosité incidente provenant de l'objet j
x	-	-	Transparence de l'atmosphère entre deux objets
\tilde{F}_{ij}	-	-	Pseudo facteur de forme ; produit du facteur de forme géométrique par la transparence de l'atmosphère

Tableau 2.3 : nomenclature utilisée pour l'expression des quantités relatives aux différents rayonnements

2.4. Quantités liées à la conduction

Quantités	Unités S.I.	Valeurs numériques	Commentaires
F_{cs}	$W.m^{-2}$	-	Flux conductif, ou flux de conduction dans le sol

c_t	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	-	Conductivité thermique
μ	kg.m^{-3}	-	Masse volumique
c_m	$\text{m}^2.\text{s}^{-2}.\text{K}^{-1}$	-	Chaleur massique
c_c	$\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$	-	Capacité calorifique ; elle résulte du produit de la chaleur massique par la masse volumique
k	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	-	Diffusivité thermique ; c'est le rapport entre la conductivité thermique et la chaleur massique
P	$\text{W.m}^{-3}.\text{K}$	-	Terme source

Tableau 2.4 : quantités relatives aux caractéristiques thermiques des matériaux et à la conduction/diffusion de la chaleur

2.5. Quantités liées à la convection

Quantités	Unités S.I.	Valeurs numériques	Commentaires
u_a, u	m.s^{-1}	-	Vitesse du vent
\mathbf{r}_a	kg.m^{-3}	1.29	Masse volumique de l'air
c_{pa}	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	10^3	Chaleur spécifique de l'air à pression constante
r_a	s.m^{-1}	-	Résistance aérodynamique ; résistance d'une surface aux échanges de chaleurs
\mathbf{k}_a	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	-	Diffusivité thermique turbulente
H	W.m^{-2}	-	Flux de chaleur sensible

Tableau 2.5 : quantités utilisées pour exprimer les phénomènes convectifs

2.6. Quantités liées à la végétation et à l'humidité

Quantités	Unités S.I.	Valeurs numériques	Commentaires
h_a	-	-	Humidité relative de l'air ; rapport entre la pression en vapeur d'eau et la pression de vapeur saturante
q	-	-	Profil vertical d'humidité spécifique de l'air ; masse d'eau (vapeur) par kg d'air
q_a	Pa	-	Pression en vapeur d'eau
q_{sat}	Pa	-	Pression de vapeur saturante
L_{eau}	J.kg^{-1}	$2.47 \cdot 10^6$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau
\mathbf{k}_{eau}	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	-	Diffusivité de la vapeur d'eau
veg	-	-	Fraction de végétation
w_s	-	-	Humidité du matériau

Tableau 2.6 : quantités liées à la teneur hydrique de l'atmosphère et des sols

Chapitre 3

Physique et expression du
rayonnement infrarouge

3.1. Généralités

Dans l'infrarouge thermique, le rayonnement provenant d'un objet est lié à la température de surface des objets, elle-même dépendante de la température régnant en profondeur. Cette complexité est essentiellement due au fait que (Asrar, 1989) :

- les objets sont capables d'emmagasiner de l'énergie, puis de la restituer ; la température dépend ainsi à la fois des conditions actuelles et passées qui régissent le comportement des objets,
- les échanges énergétiques à la surface de la Terre n'interviennent pas uniquement par radiation, mais également par convection (influence du vent et de l'évaporation notamment) et par conduction (transfert de chaleur à l'intérieur des matériaux).

La prédiction du rayonnement provenant d'un objet donné dans l'infrarouge thermique nécessite la modélisation des flux d'énergie à la surface et à l'intérieur des objets, ainsi que leur évolution dans le temps. La finesse de cette modélisation doit toujours être en rapport avec la précision souhaitée pour la prédiction du rayonnement.

Le rayonnement global qui provient d'un objet se compose de deux parties distinctes, chacune ayant une origine physique différente. Les objets auxquels nous nous intéressons sont placés dans un environnement complexe, duquel ils reçoivent de l'énergie sous forme de radiations. Ces radiations sont dues à des sources aussi diverses que le Soleil, l'atmosphère, ou les autres objets qui composent le paysage. Lorsque ces radiations atteignent un objet, une partie est réfléchi et le reste est transmis ou absorbé. En général, les objets auxquels nous nous intéressons sont opaques : il n'y a pas de radiations transmises à travers les objets. Ceci n'est pas vrai pour certains objets comme les éléments végétaux, les verres, certains plastiques ... La partie du rayonnement incident absorbé interagit avec l'objet. Elle contribue à un accroissement d'énergie interne, qui se traduit par une augmentation de sa température.

D'autres échanges énergétiques perturbent l'équilibre thermique. Les échanges *convectifs* correspondent aux transferts énergétiques engendrés par les mouvements des masses de fluide. Les échanges *conductifs*, eux, correspondent au transfert d'énergie cinétique par collisions intermoléculaires. Lors d'un changement de conditions aux limites aux frontières d'un objet, un échange d'énergie a lieu par conduction, des frontières vers l'intérieur de l'objet ou réciproquement. Ces variations d'énergie contribuent à la variation de la température, et notamment de sa température de surface. En fonction de cette température, l'objet restitue au milieu environnant de l'énergie sous forme de rayonnement. Ce rayonnement correspond aux pertes radiatives et est appelé *émission propre*.

3.1.1. Le rayonnement solaire

L'expression *rayonnement solaire* est utilisée pour désigner le rayonnement ayant pour source le Soleil. C'est un rayonnement directionnel qui dépend des angles zénithal q_s et azimutal j_s (cf. chapitre 2) sous lequel le Soleil est vu (figure 3.1).

Au sommet de l'atmosphère, pour une surface orthogonale au rayonnement, il ne dépend que de l'excentricité de l'orbite terrestre.

Au niveau du sol, il dépend en plus, de la composition de l'atmosphère et de la localisation de l'objet. En effet, suivant la position du Soleil, l'épaisseur d'atmosphère traversée varie. Au cours de cette traversée, une partie du rayonnement extraterrestre primaire est continûment absorbée par les aérosols et molécules composant l'atmosphère, contribuant ainsi à l'élévation de température de cette dernière. Ces mêmes aérosols et molécules réfléchissent une partie du rayonnement dans des directions différentes de la direction d'incidence du rayonnement primaire. Au niveau du sol, le rayonnement solaire global s'exprime en fonction de deux composantes :

- la composante directe, qui correspond à la partie du rayonnement solaire incident n'ayant subi qu'une atténuation mais pas de changement de direction,

- la composante diffuse, résultant de multiples réflexions et diffusions avec les aérosols et les molécules.

3.1.2. Le rayonnement atmosphérique

Le rayonnement atmosphérique correspond au rayonnement émis par les différents gaz, aérosols et molécules, qui composent l'atmosphère. Ces gaz (O_2 , O_3 , CO_2 , gaz rares, H_2O , etc.) possèdent une énergie interne liée à leur température. La composition de l'atmosphère claire peut généralement être supposée figée, à l'exception néanmoins de la concentration en vapeur d'eau et du contenu en aérosols fortement variable, qui ont ainsi une influence importante sur le rayonnement émis. La variation de température de l'atmosphère se traduit également par des variations dans l'intensité de ce rayonnement.

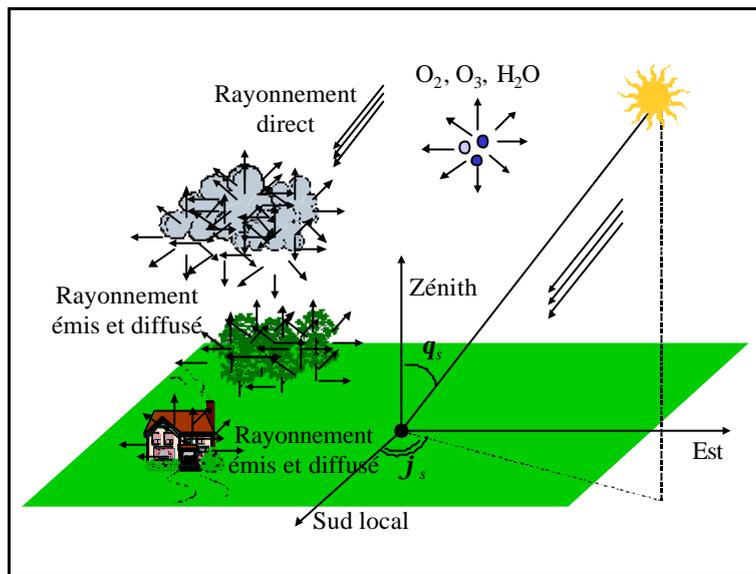


Figure 3.1 : illustration de l'absorption, de la diffusion des rayonnements, et de l'émission par l'atmosphère et le paysage

3.1.3. La température

La température d'un objet est une grandeur thermodynamique qui caractérise l'état d'excitation des particules, atomes ou molécules, qui le composent. Pour un objet à l'équilibre thermique, cette grandeur reste constante. Cependant, à la surface de la Terre, les objets qui composent un paysage ne sont pas isolés. Des interactions ont lieu à la surface des objets, sous forme radiative et convective, et à l'intérieur des objets et/ou entre les objets, par conduction. L'ensemble de ces variations contribue à faire varier la température des objets. Des sources (chauffages par exemple) doivent être considérées pour certains objets, et contribuent également aux variations de température.

3.2. La luminance provenant du paysage

3.2.1. Définition et expression de la luminance

A la différence de l'émittance, exprimée en $W.m^{-2}$, qui désigne l'énergie quittant une surface pendant un temps donné, la luminance désigne l'énergie quittant une surface pendant un temps donné et pour un angle solide donné. Celle-ci s'exprime en $W.m^{-2}.sr^{-1}$. Il existe différentes formulations de la luminance quittant un objet ; de manière relativement générique, et en utilisant les notations de Sillion et Puech (1994), elle peut s'écrire :

$$L(x, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) = L_e(x, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) + \int_{\Omega} f_r(x, \mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) L_i(x, \mathbf{q}, \mathbf{j}) \cos \theta \, d\omega \quad (3.1)$$

Sauf mention contraire, toutes les quantités de cette thèse sont des quantités spectrales, fonction de la longueur d'onde λ . En particulier, cela s'applique à l'équation précédente.

- $L(x, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v)$ désigne la luminance quittant le point x dans une direction $(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v)$,
- $L_e(x, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v)$ désigne la luminance émise par le point x dans la direction $(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v)$,
- $L_i(x, \mathbf{q}, \mathbf{j})$ représente l'ensemble des rayonnements incidents reçus par le point x et provenant d'une direction (\mathbf{q}, \mathbf{j}) ,
- Ω représente l'ensemble des directions incidentes (\mathbf{q}, \mathbf{j}) pour lesquelles le point x est susceptible de recevoir un rayonnement incident,
- $f_r(x, \mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v)$ est la fonction de distribution des réflectances bidirectionnelles (BRDF¹) qui traduit les propriétés réfléchives de l'objet considéré. Elle est définie comme le rapport entre la luminance réfléchie dans une direction $(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v)$ spécifiée, et le flux incident provenant d'une direction donnée (\mathbf{q}, \mathbf{j}) (Nicodemus *et al.*, 1977). Elle s'exprime en sr^{-1} selon la direction de diffusion $(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v)$. Cette notion sera précisée dans le paragraphe 3.2.1.4 concernant la BRDF.

3.2.1.1. Conservation de l'énergie

Absorption, transmission et réflexion

Les échanges d'énergie par rayonnement sont dus aux interactions onde-matière. Lors d'une interaction entre un flux incident $F_i(\mathbf{I})$ et un milieu semi-transparent, une partie $F_a(\mathbf{I})$ du flux incident est *absorbée*, une partie $F_t(\mathbf{I})$ est *transmise*, et une partie $F_r(\mathbf{I})$ est *réfléchie*. La conservation de l'énergie impose l'égalité suivante :

$$\Phi_i(\mathbf{I}) = \Phi_a(\mathbf{I}) + \Phi_t(\mathbf{I}) + \Phi_r(\mathbf{I}) \quad (3.2)$$

En normalisant l'équation précédente par le flux incident, il est possible de définir les facteurs spectraux d'*absorption* $\mathbf{a}(\mathbf{I})$, de *transmission* $\mathbf{t}(\mathbf{I})$ et de *réflexion* $\mathbf{r}(\mathbf{I})$ comme le rapport des flux absorbé, transmis et réfléchi au flux incident :

$$\mathbf{a}(\mathbf{I}) = \frac{\Phi_a(\mathbf{I})}{\Phi_i(\mathbf{I})}, \quad \mathbf{t}(\mathbf{I}) = \frac{\Phi_t(\mathbf{I})}{\Phi_i(\mathbf{I})}, \quad \mathbf{r}(\mathbf{I}) = \frac{\Phi_r(\mathbf{I})}{\Phi_i(\mathbf{I})} \quad (3.3)$$

Ces facteurs spectraux peuvent être étendus à un domaine spectral donné, en effectuant une moyenne par rapport au flux incident. Par exemple, la moyenne du facteur d'absorption sur un intervalle spectral variant de \mathbf{I}_1 à \mathbf{I}_2 s'écrit :

$$\mathbf{a}_{\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2} = \frac{\int_{\mathbf{I}_1}^{\mathbf{I}_2} \mathbf{a}(\mathbf{I}) \Phi_i(\mathbf{I}) d\mathbf{I}}{\int_{\mathbf{I}_1}^{\mathbf{I}_2} \Phi_i(\mathbf{I}) d\mathbf{I}} \quad (3.4)$$

Les facteurs de transmission et de réflexion moyens $\mathbf{t}_{\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2}$ et $\mathbf{r}_{\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2}$ s'expriment de manière similaire. De façon générale, la moyenne des coefficients spectraux dépend de la source considérée ; elle ne pourra être calculée comme la moyenne arithmétique des coefficients.

¹ BRDF : Bidirectional Reflectance Distribution Function

En toute rigueur, les coefficients d'absorption, de transmission et de réflexion sont directionnels. Le lecteur intéressé pourra se reporter au paragraphe relatif à la BRDF où ce point est discuté.

En appliquant la conservation de l'énergie aux équations précédentes, on obtient l'égalité suivante :

$$\mathbf{a} + \mathbf{t} + \mathbf{r} = 1 \quad (3.5)$$

qui est également valable (Palmer, 1995) pour n'importe quelle longueur d'onde :

$$\mathbf{a}(\mathbf{l}) + \mathbf{t}(\mathbf{l}) + \mathbf{r}(\mathbf{l}) = 1 \quad (3.6)$$

Emissivité d'un matériau

L'émissivité d'un matériau $\mathbf{e}(\mathbf{l})$ est définie comme le rapport de la luminance émise par la surface de l'objet à la température T , à la luminance d'un corps noir à la même température T :

$$\mathbf{e}(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{l}, T) = \frac{L_e(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{l}, T)}{L^{bb}(\mathbf{l}, T)} \quad (3.7)$$

La fonction $L^{bb}(\mathbf{l}, T)$ désigne la luminance du corps noir, c'est-à-dire la luminance qu'aurait un corps parfait à la température T . Cette luminance est isotrope, et s'exprime en fonction de la longueur d'onde \mathbf{l} , de la température, et de deux constantes c_1 et c_2 :

$$L^{bb}(\mathbf{l}, T) = \frac{c_1}{\mathbf{l}^5 \left(e^{\frac{c_2}{\mathbf{l}T}} - 1 \right)} \quad (3.8)$$

avec $c_1 = \frac{2hc^2}{n^2}$ et $c_2 = \frac{hc}{nk}$

Les constantes h , c , n et k représentent respectivement la constante de Planck, la célérité de la lumière, l'indice du milieu, et la constante de Boltzmann. Chacune de ces constantes est répertoriée dans le glossaire (cf. chapitre 2).

L'émissivité d'un corps dépend de sa température ; il n'est pas possible, sauf pour des profils d'émissivités particuliers, de considérer l'émissivité comme indépendante de la température.

Lois de Kirchoff

Dans un système isolé à l'équilibre thermodynamique, la conservation de l'énergie impose l'égalité des flux émis et absorbés ; puisque le champ de radiation d'un tel système est isotrope, les composantes spectrales et directionnelles doivent être égales :

$$\mathbf{e}(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{l}) = \mathbf{a}(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{l}) \quad (3.9)$$

L'objet est isotherme et est à la même température que l'environnement dans lequel il rayonne. L'équation précédente devrait théoriquement s'écrire :

$$\mathbf{e}(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{l}, T_0) = \mathbf{a}(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{l}, T_a) \text{ pour } T_0 = T_a \quad (3.10)$$

où T_0 désigne la température de l'objet et T_a la température de la source. En pratique, pour les applications qui nous intéressent, l'objet n'est que très rarement à l'équilibre thermodynamique et à la même température que la source. Néanmoins, Salisbury *et al.* (1994) et Korb *et al.* (1999) ont montré que les particules de surface dont la taille est supérieure à environ 75 μm (taille des particules de sable) suivent les lois de Kirchoff. L'erreur relative entre les mesures et les lois est d'environ 0.5 %.

Dans le domaine spectral qui nous intéresse, les matériaux sont généralement opaques (à l'exception des verres et de certains matériaux translucides par exemple) ; cela signifie que le coefficient de transmission est nul, et l'équation de conservation de l'énergie s'écrit alors :

$$\mathbf{a} + \mathbf{r} = 1 \quad (3.11)$$

Lorsque les lois de Kirchoff s'appliquent (conditions ci-dessus) il est possible d'exprimer l'émissivité spectrale d'un matériau en fonction de sa réflectance spectrale :

$$\mathbf{e}(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{I}) = 1 - \mathbf{r}(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{I}) \quad (3.12)$$

Durant toute la suite de cette thèse, nous nous placerons dans ce cas particulier, où l'émissivité spectrale peut être considérée comme le complémentaire à l'unité de la réflectance spectrale.

3.2.1.2. Le rayonnement réfléchi

Le rayonnement réfléchi par un corps correspond au flux \mathbf{F}_r , qu'il renvoie dans l'atmosphère. Ce flux varie en fonction des directions d'éclairement et d'observation, et également en fonction de la longueur d'onde. Il s'exprime comme la somme sur toutes les directions d'éclairement Ω , du produit de la BRDF par l'intensité du flux incident (dernier terme du membre de droite de l'équation 3.1). Le rayonnement $R_i(\mathbf{I})$ réfléchi par un objet est une fonction qui dépend à la fois des rayonnements incidents, de leurs directions et intensités, mais également de l'environnement dans lequel il se trouve (deuxième terme de droite de l'équation 3.1).

3.2.1.3. L'émission propre

Définition et expression

Tout corps se trouvant à une température donnée émet par unité de temps et de surface apparente une énergie dépendant de sa température : c'est l'*émission propre*. Pour un corps noir, l'énergie émise par unité de temps, de surface, de longueur d'onde et d'angle solide est donnée par la loi de Planck (cf. équation 3.8). Elle est isotrope et dépend de la température ainsi que de la longueur d'onde. L'émission propre d'un objet quelconque peut être obtenue en réécrivant l'équation 3.7 sous la forme suivante :

$$L_e(x, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, \mathbf{I}, T_s) = \mathbf{e}(x, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, \mathbf{I}) L^{bb}(\mathbf{I}, T_s) \quad (3.13)$$

Calcul pratique de l'émission propre

En pratique, nous serons amenés à calculer des bilans de flux et l'émission propre des objets dans un intervalle spectral donné. Entre \mathbf{I}_1 et \mathbf{I}_2 , l'émission est donnée par :

$$E(T_s) = \mathbf{p} \int_{\mathbf{I}_1}^{\mathbf{I}_2} \mathbf{e}(\mathbf{I}) L^{bb}(\mathbf{I}, T_s) d\mathbf{I} \quad (3.14)$$

Lors de l'écriture du bilan des flux, nous serons amenés à évaluer l'expression précédente sur la totalité du domaine spectral. Ceci peut s'avérer relativement long et complexe. Sachant que :

$$\int_0^{\infty} L^{bb}(\mathbf{I}, T_s) d\mathbf{I} = \frac{1}{\mathbf{p}} \mathbf{s} T_s^4 \quad (3.15)$$

où \mathbf{s} est la constante de Stefan, il est possible d'écrire :

$$E(T_s) = \bar{\mathbf{e}}(T_s) \mathbf{s} T_s^4 = \mathbf{p} \cdot \int_0^{\infty} \mathbf{e}(\mathbf{I}) L^{bb}(\mathbf{I}, T_s) d\mathbf{I} \quad (3.16)$$

L'expression ci-dessus permet de définir une émissivité moyenne dépendant de la température :

$$\bar{\epsilon}(T_s) = \rho \int_0^\infty \epsilon(\lambda) \frac{L^{bb}(\lambda, T_s)}{\sigma T_s^4} d\lambda \quad (3.17)$$

Nous avons étudié pour quelques matériaux spécifiques et choisis de façon totalement arbitraire, la dépendance de l'émissivité moyenne à la température, pour des températures variant de 277 à 340 K. Cette gamme de températures de surface des paysages est couramment rencontrée dans les régions tempérées. A l'aide de la base de données des réflectances spectrales ASTER (2000), et en appliquant les lois de Kirchoff, nous avons calculé l'émissivité moyenne pour ces différentes températures ; les résultats sont présentés dans le tableau 4.1.

	Températures de surface (K)									
	277	284	291	298	305	312	319	326	333	340
Matériaux artificiels – Emissivités (x 100)										
Aluminium*	64.5	62.7	61.1	59.4	57.8	56.3	54.7	53.3	51.8	50.5
Ardoise	94.3	94.1	93.9	93.7	93.4	93.3	93.1	92.9	92.7	92.6
Asphalte	98.3	98.2	98.1	98.1	98.0	97.9	97.8	97.8	97.7	97.6
Tuiles	98.2	98.1	98.0	97.9	97.9	97.8	97.7	97.6	97.5	97.4
Végétation – Emissivités (x 100)										
Arbre à feuilles caduques	99.0	99.0	99.0	98.9	98.9	98.9	98.8	98.8	98.8	98.8
Prairie humide	96.9	96.7	96.6	96.4	96.3	96.1	96.0	95.8	95.7	95.5

Tableau 4.1 : différentes valeurs d'émissivité moyenne (multipliées par 100) calculées pour différentes valeurs de la température de surface de certains matériaux. * : l'aluminium étudié ici est un matériau de couverture altéré, rayé et vieilli par le temps

A l'exception de l'aluminium, dans les six cas étudiés précédemment, il apparaît que l'émissivité dépend faiblement de la température de surface dans la gamme de température considéré. Elle est dans tous les cas décroissante avec la température, les variations allant de moins de 0.3 % pour la forêt de feuillus à 2 % pour l'ardoise (couverture des toits). Seul l'aluminium ne suit pas ces variations ; on observe une décroissance de l'émissivité de près de 30 % sur l'intervalle de température considéré.

Ces calculs concernent des données issues de mesures en laboratoire ou extrêmement spécifiques. En pratique, notre degré de connaissance sur les matériaux qui composent un paysage ne nous permet pas de tirer de conclusions aussi précises. Seule la tendance résultante de ces calculs peut être prise en compte ; l'émissivité est peu dépendante de la température et décroît faiblement lorsque cette dernière augmente.

En pratique, il est ainsi possible de calculer l'émission propre d'un objet en utilisant la loi de Stefan et la valeur moyenne de l'émissivité. Pour être représentative des quantités que nous manipulons, cette valeur moyenne est calculée pour une température de 300 K.

3.2.1.4. L'influence de la BRDF

La BRDF f_r , ou indicatrice de diffusion (Gaussorgues, 1972), est la fonction qui décrit les propriétés réfléchives d'un objet. Elle est définie comme le rapport entre la limite de la luminance réfléchie dL_r dans une direction donnée $(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v)$, et la limite du flux incident dE_i provenant également d'une direction (\mathbf{q}, \mathbf{j}) connue (Nicodemus *et al.*, 1977) :

$$f_r(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) = \frac{dL_r(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v)}{dE_i(\mathbf{q}, \mathbf{j})} \quad (3.18)$$

En considérant la source isotrope et l'objet homogène, il est possible d'intégrer l'expression précédente sur les deux demi-espaces relatifs à la source et à l'objet. Cela permet d'obtenir une quantité indépendante de l'ensemble des directions d'éclairage (\mathbf{q}, \mathbf{j}) et d'observation ($\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v$). Cette quantité est appelée *réflectance bihémisphérique*. Elle s'exprime sans unité, et sera communément utilisée dans la suite de cette thèse. Elle est définie par (Palmer, 1995) :

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(2\mathbf{p}, 2\mathbf{p}) = \frac{1}{\mathbf{p}} \int_{2\mathbf{p}} \int_{2\mathbf{p}} f_r(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) d\Omega d\Omega_v \quad (3.19)$$

3.2.2. L'approche de type radiosité

Les techniques de simulation d'éclairage se décomposent généralement en deux classes : celles s'appuyant sur du lancer de rayons (Glassner *et al.*, 1989), et d'autres basées sur des méthodes de type radiosité (Cohen et Wallace, 1993). De façon générale, les méthodes de lancer de rayons sont davantage appropriées à la simulation d'éclairage dans le cas d'objets présentant des propriétés réfléchives spéculaires ou fortement anisotropes, alors que la radiosité est parfaitement adaptée aux environnements lambertiens (Heckbert, 1992).

3.2.2.1. Définition et expression

La méthode de la radiosité résout un problème simplifié, dont les hypothèses sont les suivantes :

- tous les objets sont des diffuseurs parfaits (lambertiens). Ainsi, la BRDF ne dépend plus ni de la direction du rayonnement incident (\mathbf{q}, \mathbf{j}), ni de la direction d'observation ($\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v$). Sous cette hypothèse, la BRDF et la réflectance bihémisphérique sont reliées par :

$$f_r(x, \mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) = \frac{\mathbf{r}(x)}{\mathbf{p}} \quad (3.20)$$

- tous les objets sont des émetteurs parfaits ; leur émission propre est considérée isotrope. La luminance L_e émise au point x ne dépend donc plus de la direction d'observation ($\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v$) :

$$L_e(x, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) = L_e(x)$$

Sous ces hypothèses, l'équation (3.1) du bilan radiatif est considérablement simplifiée ; elle devient :

$$L(x) = L_e(x) + \frac{\mathbf{r}(x)}{\mathbf{p}} \int_{\Delta\Omega} L_i(x, \mathbf{q}, \mathbf{j}) \cos\theta d\omega \quad (3.21)$$

où $\Delta\Omega$ représente l'ensemble des directions desquelles provient un rayonnement incident.

La radiosité est une quantité proportionnelle à une émittance et s'exprime en W.m^{-2} . Compte tenu des hypothèses précédentes, elle se déduit de la luminance par multiplication d'un facteur π . En appliquant ces hypothèses aux quantités L , L_e et L_i , et en en appelant respectivement B , E et H la radiosité globale, la radiosité émise par le point x , et la radiosité incidente au point x , soit :

$$B(x) = \mathbf{p} L(x), \quad E(x) = \mathbf{p} L_e(x) \quad \text{et} \quad H(x) = \int_{\Delta\Omega} L_i(x, \mathbf{q}, \mathbf{j}) \cos\theta d\omega \quad (3.22)$$

l'équation de la radiosité devient :

$$B(x) = E(x) + \mathbf{r}(x) H(x) \quad (3.23)$$

Cette équation peut être discrétisée, en considérant que N sources j contribuent au flux incident à la surface d'un objet i :

$$B_i = E_i + r_i \sum_{j=1}^N F_{ij} B_j \quad (3.24)$$

Dans l'expression précédente, F_{ij} est un facteur géométrique traduisant les échanges énergétiques qui peuvent se produire entre les objets i et j . Il s'écrit :

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \mathbf{q} \cos \mathbf{q}'}{p r_{ij}^2} V_{ij} dA_i dA_j \quad (3.25)$$

Les différentes notations employées ici sont illustrées par la figure 3.2 :

- r_{ij} et r_{ji} sont les vecteurs joignant deux points x et y qui appartiennent aux objets i et j ,
- \mathbf{q} et \mathbf{q}' sont respectivement les angles entre les normales \mathbf{n}_i et \mathbf{n}_j aux objets i et j et les vecteurs r_{ij} et r_{ji} ,
- A_i et A_j désignent les surface respectives des objets i et j . V_{ij} est le facteur de visibilité (Cohen et Greenberg, 1985) entre les deux objets ; ce facteur vaut 1 lorsqu'un segment joignant les centres des surfaces infinitésimales dA_i et dA_j n'intersecte aucun autre objet de la scène.

L'ensemble des facteurs de visibilité est relativement long à déterminer, notamment dans un paysage complexe. Des techniques, telle celle développée par Teller et Hanrahan (1994), permettent d'accélérer ces calculs, et rendent ainsi possible la modélisation du paysage par un grand nombre de polygones.

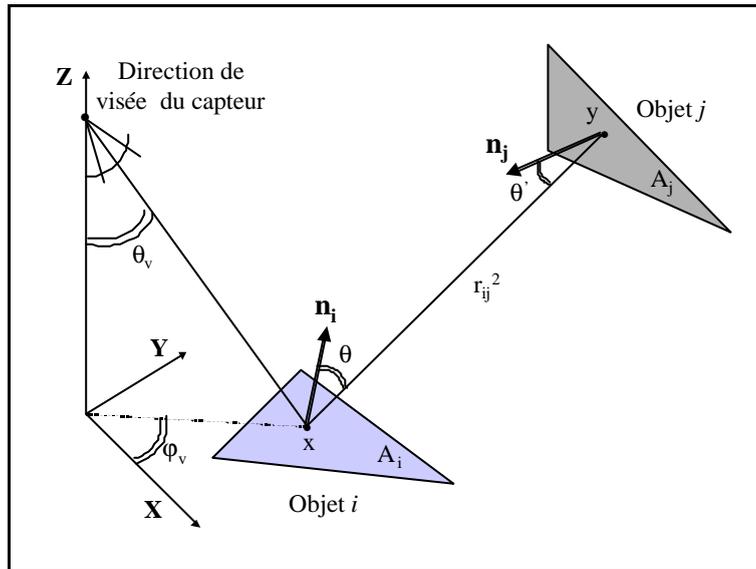


Figure 3.2 : illustration schématique des différentes grandeurs et notations intervenant dans les expressions des équations de bilan de flux et de radiosité

Par définition du facteur de visibilité, l'égalité $V_{ij}=V_{ji}$ est toujours vraie. Par permutation des indices i et j dans l'expression du facteur de forme, on obtient la relation de réciprocité :

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (3.26)$$

En écrivant sous forme matricielle l'équation 3.24 de la radiosité pour les N objets qui composent le paysage, on se ramène au système linéaire suivant :

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_1 F_{11} & r_1 F_{12} & \dots & r_1 F_{1n} \\ r_2 F_{21} & r_2 F_{22} & \dots & r_2 F_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_n F_{n1} & \dots & \dots & r_n F_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{pmatrix} \tag{3.27}$$

Ce système peut également être présenté de façon réduite :

$$M B = E \text{ où } M = (m)_{ij} \text{ et } m_{ij} = \mathbf{d}_{ij} - r_i F_{ij} \tag{3.28}$$

où \mathbf{d} est le symbole de Kronecker. La première étape pour obtenir les valeurs des émittances B_i est de calculer chacun des coefficients m_{ij} de la matrice M . La difficulté réside dans le calcul des facteurs de forme F_{ij} . Lorsque les objets sont plans, ce qui est toujours le cas en pratique, ils ne se voient pas eux-mêmes : dans ce cas, $F_{ii}=0$. Compte tenu de l'équation 3.26, $N(N-1)/2$ facteurs de forme sont à calculer pour une scène composée de N objets. Ceux-ci peuvent être calculés de façon analytique (Schröder et Hanrahan, 1993) ou estimés (Wallace *et al.*, 1989). Ensuite, le système peut être résolu de manière itérative, en utilisant par exemple les méthodes de Jacobi ou de Gauss-Seidel. Le lecteur intéressé pourra se reporter, entre autres, aux ouvrages de Sillion et Puech (1994), Foley (1996) ou Watt (2000) pour de plus amples informations sur la méthode de la radiositité. La figure 3.3, issue de Sillion et Puech, présente une illustration complète de la méthode.

Une fois le système linéaire précédent résolu, via la connaissance des conditions de prise de vue, un logiciel de visualisation est utilisé pour obtenir une image de la scène.

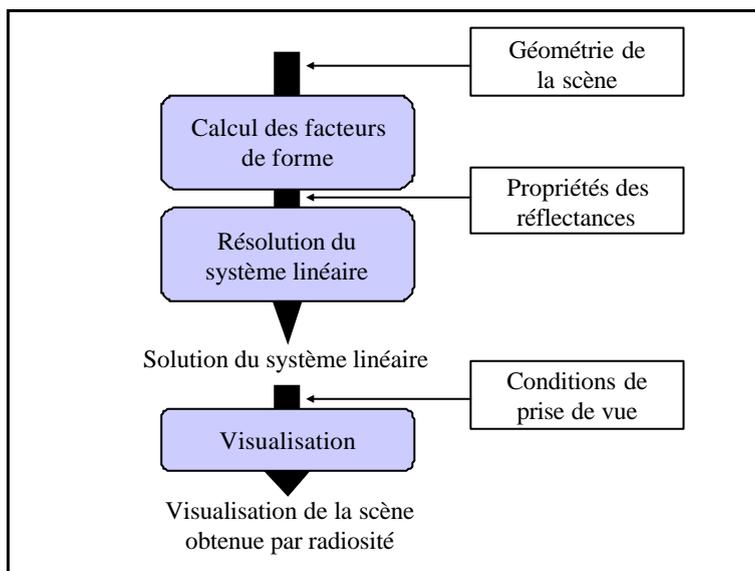


Figure 3.3 : méthode de radiositité pour la synthèse d'images.

3.2.2.2. Prise en compte de la BRDF

L'intérêt de la méthode de la radiositité réside dans la simplicité de la solution, une fois les différents facteurs de forme calculés. Cela est possible sous réserve des hypothèses décrites dans le paragraphe précédent ; tous les objets se comportent comme des réflecteurs et des émetteurs parfaits. La réalité est différente, chacun des objets ayant des caractéristiques d'émission et de réflexion qui lui sont propres. Cependant, la méthode de la radiositité telle que décrite précédemment ne peut être utilisée que sous ces hypothèses simplificatrices. Une formulation équivalente à l'équation 3.24 et prenant en compte les paramètres directionnels peut s'écrire :

$$B_i(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) = E_i(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) + \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_i} \iint_{A_i, A_j} f_r(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) h_j(\mathbf{q}, \mathbf{j}) \frac{\cos \mathbf{q} \cos \mathbf{q}'}{r_{ij}^2} V_{ij} dA_i dA_j \quad (3.29)$$

La fonction h_j représente la luminance incidente provenant de l'objet j dans la direction (\mathbf{q}, \mathbf{j}) . Cette équation n'a généralement pas de solution évidente. Les méthodes de résolution numérique appliquées à une telle équation conduiraient à des calculs relativement complexes. L'intérêt d'une telle formulation réside dans l'expression de la dépendance explicite de l'émittance au flux émis par chacun de ses voisins.

De nombreux modèles de BRDF existent, que ce soit pour la synthèse d'images ou pour l'exploitation de données de télédétection. Ceux-ci peuvent être classés (Roujean, 1991) en fonction de leur typologie : analytiques (mathématiques, empiriques, théoriques...) ou numériques. En général, les modèles analytiques, tels Walthall *et al.* (1985), Norman *et al.* (1985), Roujean *et al.* (1992), SAIL (Verhoef, 1984), Hapke (1984)..., dépendent d'un faible nombre de paramètres variant entre trois et six. Un faible nombre de mesures permet ainsi d'étalonner correctement ces modèles. Cependant, à cause de la complexité des calculs, du manque de flexibilité lié aux propriétés réfléchives des objets, ainsi que du manque de connaissance sur ces propriétés, il s'avère que cet étalonnage est rarement réalisé de manière précise. Parmi les autres méthodes, celle basée sur la décomposition en ondelettes semble être la plus efficace et la plus aisée d'utilisation. Des efforts sont néanmoins encore nécessaires pour rendre cette méthode robuste et stable (Rusinkiewicz, 1997). Il faudra également démontrer son applicabilité en télédétection.

3.2.2.3. Elargissement à des valeurs spectrales

Les équations précédentes ne dépendent pas explicitement de la longueur d'onde ; elles s'appliquent tant à une onde monochromatique qu'à des données globales (intégrées sur la totalité du domaine spectral). Il est possible, toujours en accord avec les hypothèses de la radiosité, de réécrire l'équation 3.24 pour un domaine spectral particulier :

$$B_i(\mathbf{l}) = E_i(\mathbf{l}) + r_i(\mathbf{l}) \sum_{j=1}^N F_{ij} B_j(\mathbf{l}) \quad (3.30)$$

Ceci permet d'intégrer l'équation de la radiosité sur le domaine spectral donné ; la prise en compte de la réponse spectrale g d'un capteur est également possible.

$$B_{i, l_1, l_2} = \int_{l_1}^{l_2} g(\mathbf{l}) E_i(\mathbf{l}) d\mathbf{l} + \sum_{j=1}^N F_{ij} \int_{l_1}^{l_2} g(\mathbf{l}) r_i(\mathbf{l}) B_j(\mathbf{l}) d\mathbf{l} \quad (3.31)$$

La dépendance de la réflectance à la longueur d'onde, ainsi que la réponse spectrale du capteur, ne permettent plus de se ramener à un système linéaire tel que celui obtenu en 3.2.2.1. Une méthode numérique de résolution du système d'équations conduit, comme dans le cas précédent, à un système complexe.

3.2.2.4. La radiosité hiérarchique

La méthode précédemment présentée suppose la radiosité constante à la surface d'un objet. Cependant, certains objets peuvent présenter une radiosité variant très rapidement, notamment lorsque des ombres figurent dans la scène, ou que deux objets ne se voient que partiellement (figure 3.4). Une solution consiste à subdiviser arbitrairement les objets initiaux en objets de plus petite taille ; cela résout le problème des variations rapides de radiosité, mais au détriment du nombre d'objets à considérer et du temps de calcul.

La *radiosité hiérarchique* (HR, de l'anglais *Hierarchical Radiosity*) classique considère les échanges d'énergie entre deux surfaces à différents niveaux de détail. Une première approche (Cohen *et al.*,

1986) consiste à subdiviser grossièrement l'objet émetteur en un certain nombre de parties distinctes, appelées *patches*. Le récepteur est divisé en éléments très fins ; la taille de ces éléments est définie en fonction du gradient de radiosité à la surface de l'objet. L'image de la scène est générée à partir de ces éléments. Dans cette approche, le nombre de patches est spécifié *a priori* par l'utilisateur. Plus le nombre de patches est élevé, plus la qualité radiométrique de l'image est élevée. Il en est de même pour le nombre d'éléments.

Une deuxième approche (Hanrahan *et al.*, 1991) consiste à subdiviser finement à la fois l'émetteur et le récepteur. Le niveau de détail de chacun des éléments est adapté à la précision souhaitée. La subdivision est en général basée sur une structure de type *quadtree* ou similaires (Rogers, 1998).

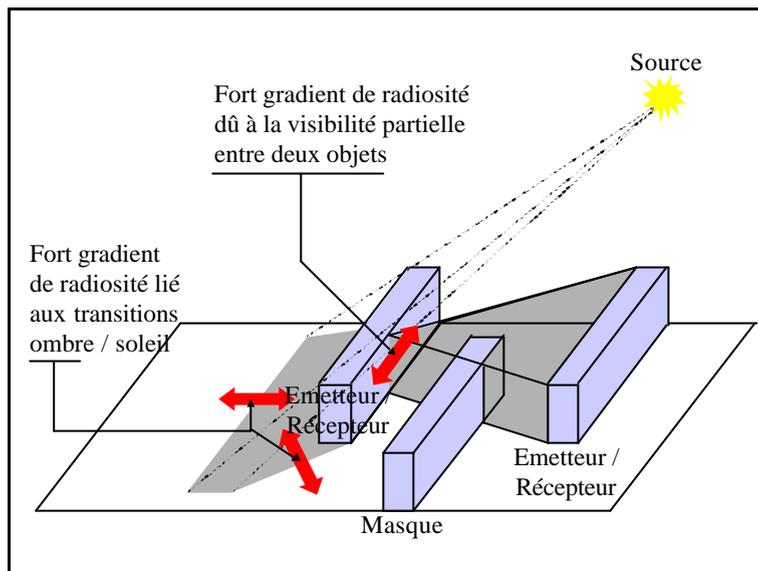


Figure 3.4 : illustration des variations rapides et des forts gradients de radiosité pouvant être présents dans la scène

3.2.2.5. Radiosité et lancer de rayons

Dans le cas général, une surface réelle n'est ni totalement lambertienne, ni totalement spéculaire. La réflexion spéculaire peut survenir dans un cône souvent repéré par une largeur angulaire DW . Une approximation consiste à exprimer la BRDF comme la somme de deux composantes :

$$f_r(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, \mathbf{q}, \mathbf{j}) = k_s f_s(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, \mathbf{q}, \mathbf{j}) + k_d f_d \quad (3.32)$$

avec $k_s + k_d = 1$

où k_s et k_d représentent respectivement la fraction de rayonnement spéculaire et la fraction de rayonnement diffus. f_s et f_d représentent les fonctions de BRDF spéculaire et diffuse parfaite (lambertienne). Dans ce cas, l'équation du rayonnement global devient :

$$L(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) = L_e(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) + k_s \int_{\Delta\Omega} f_s(\mathbf{q}, \mathbf{j}, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) L_i(\mathbf{q}, \mathbf{j}) \cos\theta \, d\omega + k_d f_d \int_{\Omega} L_i(\mathbf{q}, \mathbf{j}) \cos\theta \, d\omega \quad (3.33)$$

Cette équation ne peut être résolue à l'aide de la seule méthode de radiosité. Cependant, Wallace *et al.* (1989) ont développé une solution qui traite indépendamment le cas lambertien à l'aide de la méthode de la radiosité, et le cas spéculaire à l'aide du lancer de rayons.

3.2.2.6. Conclusion sur la méthode de la radiosité

La méthode de la radiosité considère également le milieu - l'atmosphère dans le cas de la synthèse de paysages - comme transparent. Si tel n'est pas le cas, une partie seulement du signal quittant l'objet émetteur atteint le récepteur. L'autre partie du signal est soit absorbée par le milieu (échauffement du milieu par exemple), soit réfléchi ou diffusée dans d'autres directions. L'équation de la radiosité devient alors :

$$B_i = E_i + \mathbf{r}_i \sum_{j=1}^N \tilde{F}_{ij} B_j$$

où \tilde{F}_{ij} est un pseudo facteur de forme.

Il s'agit d'un facteur mesurant le flux que reçoit l'objet i de l'objet j . Ce pseudo facteur de forme peut s'écrire comme le produit du facteur de forme géométrique F_{ij} par le facteur de transmission \mathbf{x} du milieu. En effectuant l'hypothèse d'homogénéité du milieu, le facteur de transmission ne dépend plus que de la distance séparant les deux objets. Le pseudo facteur de forme s'exprime alors de la manière suivante :

$$\tilde{F}_{ij} = \mathbf{x}(r_{ij}) F_{ij}$$

Cette absorption par le milieu dépend de la longueur d'onde considérée. En considérant le milieu isotrope, le signal total qui provient de l'objet i s'exprime par :

$$E_{i, \lambda_1, \lambda_2} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(\lambda) E_i(\lambda) d\lambda + \sum_{j=1}^N F_{ij} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(\lambda) \mathbf{r}_i(\lambda) \mathbf{x}(r_{ij}, \lambda) B_j(\lambda) d\lambda$$

où $g(\lambda)$ est la réponse spectrale de l'instrument utilisé.

La simulation précise de l'émittance provenant d'un paysage passe par la prise en compte des caractéristiques spectrales et directionnelles des objets qui le composent. La connaissance de l'environnement de chaque objet est également nécessaire au calcul de l'émittance. En combinant les équations précédentes on obtient l'expression de l'émittance globale d'un objet dans le cas général :

$$E_{i, \lambda_1, \lambda_2}(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(\lambda) E_i(\mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, \lambda) d\lambda + \sum_{j=1}^N \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(\lambda) \mathbf{x}(\mathbf{q}_j, r_{ij}, \lambda) f_r(\mathbf{q}_j, \mathbf{q}_v, \mathbf{j}_v, \lambda) B_j(\mathbf{q}_j, \lambda) \cos \theta \frac{\cos \theta'}{r_{ij}^2} V_{ij} dA_j dA_i d\lambda$$

Cette équation, donnant l'émittance d'un objet en fonction de son environnement, ne peut être résolue simplement. La présence d'inconnues dans les membres de gauche et de droite, ainsi que de données directionnelles et spectrales ajoutent à la complexité de la résolution. En pratique, il sera nécessaire d'effectuer des hypothèses et approximations afin de pouvoir simplifier cette expression. Des considérations énergétiques liant l'objet considéré à son environnement permettront de réduire cet environnement à quelques proches voisins. Cet aspect de la résolution de l'équation pratique du bilan radiatif sera abordé dans le chapitre six.

3.3. La température des objets

3.3.1. Différentes expressions de la température de surface

La température est une grandeur thermodynamique qui intervient dans tous les types de transport de l'énergie : radiatif, convectif et conductif. Elle est définie comme l'inverse du rapport de la dérivée de l'entropie du corps sur son énergie interne (Belorizki et Gorecki, 1992) :

$$\frac{1}{T} = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right) \quad (3.34)$$

Il existe d'autres définitions de la température, chacune d'elle étant adaptée à un cas particulier. Parmi ces autres définitions, citons (Norman et Becker, 1995) :

- la *température de brillance* $T_B(\mathbf{q}, \mathbf{j})$. Elle est obtenue en égalant la luminance mesurée à la luminance qu'émettrait un corps noir dans la même bande spectrale avec la même réponse spectrale que le capteur. Elle s'exprime par :

$$L^{mesurée}(T_B(\mathbf{q}, \mathbf{j})) = \int_{I_1}^{I_2} \frac{c_1 g(I)}{I^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{IT_B(\mathbf{q}, \mathbf{j})}\right) - 1 \right]} dI$$

Cette expression de la température à la surface d'un objet n'a que peu d'intérêt en simulation d'images infrarouge, puisque ne faisant pas intervenir l'émissivité de l'objet ou les rayonnements réfléchis ; nous ne l'utiliserons donc pas,

- la *température radiative* $T_R(\mathbf{q}, \mathbf{j})$. Cette température est déterminée à partir de la mesure du bilan radiatif d'une surface ; c'est la meilleure approximation de la température thermodynamique basée sur une mesure de luminance. Elle nécessite la connaissance du rayonnement réfléchi par la surface, et s'avère complexe à déterminer,
- la *température aérodynamique* $T_{aéro}$. Cette température correspond à la température de surface qu'aurait un objet dont le flux de chaleur sensible serait donné par :

$$H = h(T_{aéro}, T_{air})$$

Par inversion, cette expression permet d'obtenir la température aérodynamique d'un objet à l'aide d'une mesure du flux de chaleur sensible.

Durant la suite de cette thèse, et dans le contexte de simulation dans lequel nous nous trouvons, sauf mention contraire, la température à laquelle nous ferons référence est la température *thermodynamique* T . La précision température de surface sera utilisée pour différencier la température à la surface d'un matériau du champ de température en profondeur.

3.3.2. Le bilan des flux

Un objet à la surface de la Terre est soumis à l'ensemble des flux radiatif, convectif et conductif. Le bilan de ces flux à la surface d'un objet s'écrit en fonction du flux de conduction F_{cs} :

$$F_{cs}(T_s, t) = R_{net}(T_s, t) - [H(T_s, t) + L_e(T_s, t)] \quad (3.35)$$

Les termes R_{net} , H et L_e désignent respectivement le rayonnement net à la surface d'un objet, le flux de chaleur sensible, et le flux de chaleur latente dont les définitions et expressions sont données ci-après.

3.3.2.1. Les flux radiatifs

Les flux radiatifs correspondent à l'ensemble des transferts d'énergie par rayonnement électromagnétique. En effet, tout corps non isolé reçoit de la part des objets qui l'entourent une certaine énergie.

Pour un corps à la surface de la Terre, il convient de classer les sources de rayonnement en trois catégories :

- le rayonnement solaire G ,
- le rayonnement atmosphérique L_a ,
- le rayonnement provenant des objets voisins.

Un objet à la température T_i à la surface de la Terre, exposé aux rayonnements solaire et atmosphérique, et entouré de N voisins, recevra une énergie R_{net} :

$$R_{net} = (1 - a_i)G + (1 - r_i) \left[\left(1 - \sum_{j=1}^N \tilde{F}_{ij} \right) L_a + \sum_{j=1}^N \tilde{F}_{ij} (\mathbf{e}_j \mathbf{s} T_j^4 + \mathbf{r}_j R_j) \right] - \mathbf{e}_i \mathbf{s} T_i^4 \quad (3.36)$$

où a_i est l'albédo de l'objet, r_i sa réflectance et \mathbf{e}_i son émissivité. \mathbf{e}_j , T_j , \mathbf{r}_j et R_j désignent respectivement l'émissivité, la température, la réflectance de l'objet j et la somme des rayonnements incidents sur l'objet j .

Le premier terme de l'équation ci-dessus correspond à la contribution du rayonnement solaire au bilan radiatif. Selon que l'objet est ou non à l'ombre, il reçoit de la part du soleil :

- un rayonnement diffus $G = G_{diffus}$,
- un rayonnement diffus et un rayonnement direct dépendant de l'orientation de l'objet i et de la position du soleil. Dans ce cas, \mathbf{n}_s désignant la position du soleil et \mathbf{n}_i la normale à l'objet, le rayonnement G s'exprime par :

$$G = G_{diffus} + G_{direct,\perp} (\tilde{\mathbf{n}}_i \cdot \tilde{\mathbf{n}}_s) \quad (3.37)$$

Le second terme résulte de l'influence des rayonnements présents dans les longueurs d'onde thermiques. Un objet i , plan, reçoit du demi-espace qui l'entoure un rayonnement provenant :

- de l'atmosphère,
- des objets visibles dans cet espace et occultant l'atmosphère,
- du sol, lorsque l'objet considéré n'est ni horizontal et ni orienté vers le zénith.

La contribution de l'atmosphère est prise en compte par le rayonnement atmosphérique L_a , pondéré par la fraction de ciel vu par l'objet. La contribution des objets et visibilité directe de i , dépend de l'émission propre de ces objets mais également de la fraction du rayonnement qu'ils réfléchissent. Cette composante R_j est difficile à évaluer, puisque dépendante de l'ensemble des contributions des objets qui composent le paysage.

Le dernier terme, quant à lui, traduit les pertes radiatives liées à l'émission propre de l'objet à la température T_i .

3.3.2.2. Les flux convectifs

Ces flux correspondent aux transferts énergétiques engendrés par le mouvement des masses de fluide. Pour un fluide tel que l'air, fluide auquel nous nous intéresserons exclusivement, ces mouvements peuvent être engendrés par le vent (convection forcée) ou par un gradient de température (convection naturelle) ou d'humidité.

Le flux de chaleur sensible

Le flux de chaleur sensible H , traduit les échanges énergétiques liés au seul déplacement des masses d'air, indépendamment de leur composition hydrique. Il prend en compte la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie au sein du fluide ; il dépend de la vitesse du vent et du gradient thermique entre un objet et le milieu environnant. Le flux de chaleur sensible s'exprime en fonction du profil vertical de température :

$$H = -r_a c_{pa} k_a(z) \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.38)$$

où r_a , c_{pa} et $k_a(z)$ sont respectivement la masse volumique et la chaleur spécifique de l'air, ainsi que la diffusivité thermique turbulente. En supposant la température linéairement dépendante de l'altitude z , l'intégration de cette expression entre deux niveaux z_1 et z_2 respectivement aux températures $T_1(z_1)$ et $T_2(z_2)$, conduit à :

$$H = -r_a c_{pa} \frac{T_2 - T_1}{r_a} \quad (3.39)$$

où r_a est la résistance aérodynamique définie comme l'intégrale de l'inverse de la diffusivité turbulente :

$$r_a = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial z}{k_a(z)} \quad (3.40)$$

Le flux de chaleur latente

Le flux de chaleur latente L_e , est directement lié aux changements d'état de l'eau. Deux étapes peuvent se produire :

- l'évaporation de l'eau, ou l'évapotranspiration ; ce processus refroidit la surface et introduit de la vapeur d'eau dans l'atmosphère,
- la condensation ; la pression partielle en vapeur d'eau atteint progressivement la pression de vapeur saturante. Il y a alors condensation en eau liquide et libération de chaleur qui réchauffe l'atmosphère.

Le flux de chaleur latente entre la surface et l'atmosphère est associé à la quantité d'eau introduite dans l'atmosphère. La chaleur n'est libérée qu'ultérieurement lors de la condensation, d'où l'appellation de chaleur latente (qui se manifeste plus tard).

De manière analogue au flux de chaleur sensible, le flux de chaleur latente s'écrit :

$$L_e = -r_a L_{eau} k_{eau}(z) \frac{\partial q}{\partial z} \quad (3.41)$$

où L_{eau} , $k_{eau}(z)$ et q sont respectivement la chaleur latente de vaporisation de l'eau, la diffusivité de la vapeur d'eau, et le profil vertical d'humidité de l'air.

3.3.2.3. Le flux conductif

Ce flux traduit le transfert d'énergie cinétique à l'intérieur d'un corps solide. Il obéit à l'équation de diffusion de Fourier :

$$\vec{F}_{cs}(\vec{r}, t) = -[c_t] \vec{\nabla} T(\vec{r}, t) \quad (3.42)$$

où $[c_t]$ est la matrice des conductivités thermiques du corps considéré. Les transferts de la chaleur se font selon les 3 dimensions spatiales x , y , et z ; ils ont toujours lieu de la source chaude vers la source froide. En régime transitoire, ce flux a tendance à homogénéiser les températures.

3.3.3. L'influence du bilan des flux sur la température à travers un exemple

L'exemple que nous présentons ici a pour but d'illustrer l'influence du bilan des flux, et de chaque contribution, sur l'évolution temporelle de la température de surface au cours d'une journée d'équinoxe. Nous nous intéressons à un champ de maïs, situé à la latitude de 45 N. La figure 3.5 présente des courbes typiques d'évolution des flux radiatifs et du bilan radiatif net, ainsi que des flux convectifs et du bilan convectif.

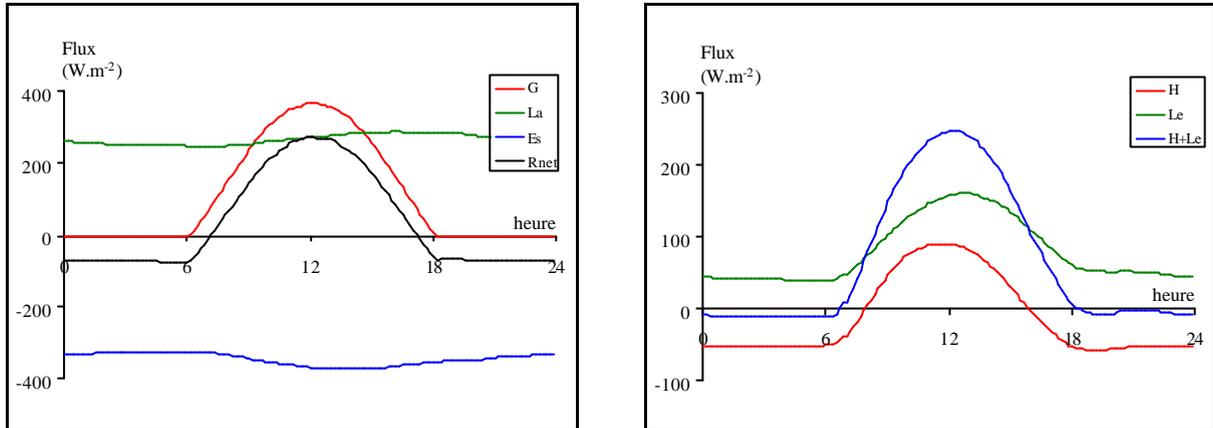


Figure 3.5 : évolution typique des flux et du bilan radiatif net (à gauche) et des flux et du bilan convectif (à droite) au cours de la journée. G , La , E et $Rnet$ représentent respectivement le flux solaire incident, le flux atmosphérique incident, les pertes radiatives, et le bilan des flux radiatifs. H et Le représentent les flux de chaleur latente et de chaleur sensible ; $H+Le$ le bilan des flux convectifs.

Les valeurs des flux sont données ici à titre d'exemple. L'amplitude des variations peut être très différente, notamment au niveau des flux convectifs, fortement dépendant de la vitesse du vent et de l'humidité du sol pour le flux de chaleur latente. Une étude donnant l'amplitude de ces variations en fonction des paramètres thermo-optiques et des conditions météorologiques est présentée dans Jaloustre-Audouin (1998). La figure 3.6 montre, à gauche, la variation journalière des bilans radiatif, conductif et convectif. À droite, sont reportées les températures de surface du champ de maïs et de l'air, ainsi que la valeur du flux de conduction en surface.

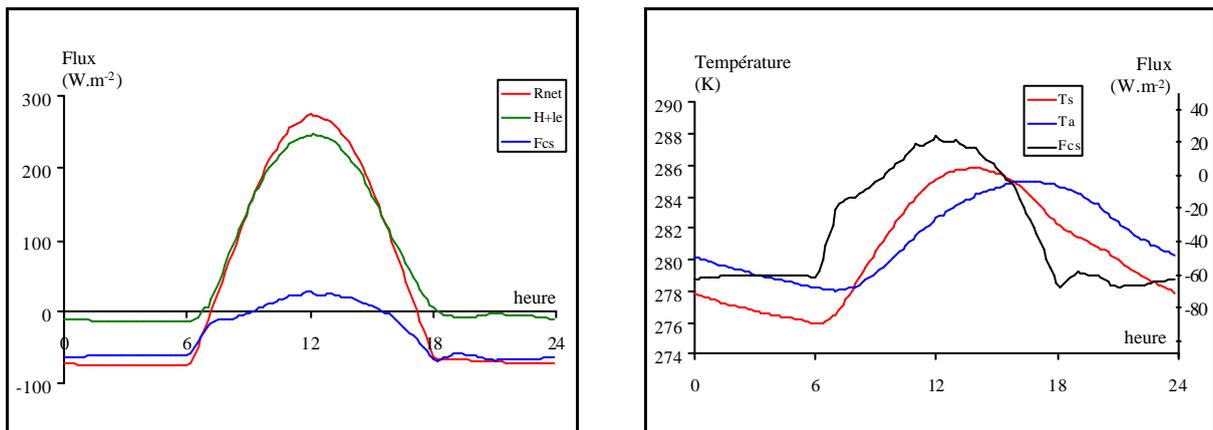


Figure 3.6 : évolution typique du bilan des flux (à gauche) et des températures de surface et de l'air (à droite); l'évolution du flux de conduction dans le sol Fcs est reportée sur la figure de droite (échelle de droite) pour pouvoir être comparée à celle de la température de surface Ts . Ta représente la température de l'air ; les autres notations sont identiques à celles de la figure 3.5

On remarque sur la figure de droite, que la température de surface est en avance de phase sur celle de l'air ; elle y est inférieure la nuit, et supérieure le jour. L'amplitude de la température de surface est également plus importante que celle de l'air. Il est relativement délicat de relier la température de surface, ou ses variations, aux variations du flux de conduction en surface. Il sera difficile, par la suite, de prévoir aisément l'impact d'une perturbation du bilan des flux sur la température de surface sans avoir à résoudre l'équation de diffusion de la chaleur.

3.3.4. Estimation de la température

3.3.4.1. L'équation de propagation de la chaleur

L'équation de propagation de la chaleur est obtenue en combinant l'équation de Fourier avec l'équation de conservation de la chaleur. En considérant le milieu comme homogène et isotrope, l'équation de Fourier se réécrit :

$$\vec{F}_{cs}(t) = -c_t \vec{\nabla} T(t) \quad (3.43)$$

La conservation de la chaleur dans un milieu possédant des sources internes P , s'exprime par :

$$\frac{\partial(\mu c_m T)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{F}_{cs}) = P(T) \quad (3.44)$$

où μ est la masse volumique du corps considéré, et c_m sa chaleur massique. En combinant les deux expressions précédentes, tout en considérant les caractéristiques thermiques du milieu comme indépendantes de la température, on obtient l'équation de propagation de la chaleur :

$$\Delta T - \frac{1}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{P}{c_t} \quad (3.45)$$

où la diffusivité thermique k est le rapport de la conductivité thermique c_t au produit de la masse volumique μ par la chaleur massique c_m , soit :

$$k = \frac{c_t}{\mu c_m} \quad (3.46)$$

En l'absence de terme source à l'intérieur des objets considérés, hypothèse effectuée dans la suite de cette thèse, l'équation de propagation de la chaleur se réécrit :

$$\Delta T - \frac{1}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3.47)$$

3.3.4.2. Techniques de résolution

L'équation de propagation de la chaleur est une équation différentielle aux dérivées partielles, du second ordre, admettant en principe une infinité de solutions. La connaissance du champ de température à l'instant initial, et des lois de variation de la température, ou de ses dérivées, sur les frontières de l'objet, permet la résolution de l'équation de la chaleur.

Dans les cas qui nous intéressent, il est commode de se donner comme conditions aux limites :

- le bilan des flux à la surface de l'objet,
- la valeur de la température ou du flux à la limite inférieure.

Différentes techniques existent pour résoudre l'équation de propagation de la chaleur. Dans le cas des régimes variables, auxquels nous nous intéresserons exclusivement, il est difficile de résoudre l'équation analytiquement. La méthode par transformée de Fourier est bien adaptée aux cas de géométrie simple (murs, cylindres, sphères...). La méthode par transformée de Laplace est davantage

adaptée au cas de milieux semi-infinis (Mitchell et Griffiths, 1980). Deardorff (1978) propose de résoudre explicitement l'équation de propagation de la chaleur sous certaines hypothèses :

- le matériau est homogène,
- la variation de température est sinusoïdale, d'une période de 24 heures,
- la température moyenne du matériau est indépendante de la profondeur,
- le flux de chaleur se propage exclusivement dans le sens vertical,
- le sol peut être décrit comme un système à deux couches horizontales ; chaque couche est supposée être homogène en température et en humidité.

Cette méthode, très pertinente sur des matériaux mono-couche et homogènes (sols nus ou végétation) ne peut s'appliquer sur des surfaces artificielles généralement hétérogènes.

Dans ce cas, une méthode de résolution numérique de l'équation de la chaleur doit être utilisée. La méthode des différences finies est présentée ci-après.

3.3.4.3. La méthode des différences finies

Application à la résolution de l'équation de la chaleur à une dimension

Soit une fonction f de deux variables x et t ; ses développements de Taylor sur la variable x aux premier et second ordres s'écrivent (Ciarlet et Lions, 1990) :

$$\frac{\partial f(x,t)}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, t) - f(x, t)}{\Delta x} \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial^2 f(x,t)}{\partial x^2} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x + \Delta x, t) - 2f(x, t) + f(x - \Delta x, t)}{\Delta x^2} \quad (3.49)$$

Il existe deux façons d'appliquer ces développements à l'équation de la chaleur, car la température T est une fonction des variables z et t . La discrétisation du Laplacien sur la variable z , laisse le choix quant à l'expression de la température à l'instant t ou $t + \Delta t$. D'une façon générale, il est possible d'exprimer le Laplacien en fonction des températures aux deux instants, ce qui conduit à la discrétisation suivante de l'équation de la chaleur :

$$\frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} = k \frac{(1-k)(T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t) + k(T_{i+1}^{t+\Delta t} - 2T_i^{t+\Delta t} + T_{i-1}^{t+\Delta t})}{\Delta z^2} \quad (3.50)$$

où T_i est la température de la cellule i , T_{i-1} et T_{i+1} les températures des cellules voisines. k est un coefficient compris entre 0 et 1; pour $k=0$, la méthode est dite *explicite*. Les températures sont calculées uniquement à partir des valeurs des variables à l'instant t . Cette méthode est stable si :

$$\Delta z > \sqrt{2k \Delta t} \quad (3.51)$$

Physiquement cela signifie que le pas de discrétisation ne doit pas être inférieur à une distance caractéristique correspondant à la longueur maximale de diffusion pendant le temps Δt . Dans le cas où k varie entre 0.5 et 1, la méthode est dite *implicite* et est inconditionnellement stable amenant à des résultats plus précis. L'inconvénient majeur réside dans la résolution à chaque pas de temps d'un système tridiagonal de n équations à n inconnues, où n est le nombre de couches à l'intérieur du matériau.

Durant toute cette thèse, nous avons travaillé avec la méthode des différences finies pour $k=1/2$ (méthode de Crank-Nicholson, 1947), afin de :

- pouvoir traiter tout type de matériau composite,
- ne pas avoir à se soucier des problèmes de convergence liés aux échantillonnages spatial et temporel.

Application à la résolution de l'équation de la chaleur à deux dimensions

Cette même méthode peut être utilisée pour résoudre l'équation de la chaleur à plusieurs dimensions. Par souci de simplicité, nous ne présentons que la résolution de l'équation de la chaleur à deux dimensions. Dans ce cas, l'équation de diffusion s'écrit :

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{1}{k} \frac{\partial}{\partial t} \right) T = 0 \quad (3.52)$$

et la discrétisation pendant le temps \mathbf{Dt} et sur les longueurs \mathbf{Dx} et \mathbf{Dy} conduit à :

$$\frac{T_{i,j}^{t+\Delta t} - T_{i,j}^t}{\Delta t} = k \left\{ \frac{T_{i+1,j}^{a(t)} - 2T_{i,j}^{a(t)} + T_{i-1,j}^{a(t)}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j-1}^{a(t)} - 2T_{i,j}^{a(t)} + T_{i,j+1}^{a(t)}}{\Delta y^2} \right\} \quad (3.53)$$

où $a(t)$ est un paramètre variant entre t et $t+\mathbf{Dt}$. $T_{i,j}$ désigne la température de la cellule i,j , et $T_{i+1,j}$, $T_{i-1,j}$, $T_{i,j+1}$ et $T_{i,j-1}$ désignent respectivement les voisins de la cellule i,j selon les dimensions x et y .

Il est dans ce cas relativement complexe de résoudre simultanément l'équation de la chaleur selon les deux dimensions. La méthode appelée ADI (Press *et al.*, 1989), consiste à considérer l'équation à deux dimensions comme deux fois une équation à une dimension. Les équations à une dimension sont considérées avec le pas de temps $\mathbf{Dt}/2$. Chacune des équations est résolue implicitement, ce qui assure la convergence de la méthode ; la première entre t et $t+\mathbf{Dt}/2$, la seconde entre $t+\mathbf{Dt}/2$ et $t+\mathbf{Dt}$.

Le critère de convergence devient, à deux dimensions :

$$k \Delta t \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \leq \frac{1}{2} \quad (3.54)$$

Dans le cas, relativement fréquent en pratique, où $\mathbf{Dx} = \mathbf{Dy} = \mathbf{D}$, le critère de convergence s'écrit :

$$\Delta \geq 2\sqrt{k \Delta t} \quad (3.55)$$

Physiquement, cela signifie que la taille minimale des cellules doit être telle que la chaleur ne puisse se propager pendant le temps \mathbf{Dt} , que de la cellule i,j vers les cellules voisines ayant une frontière commune avec i,j , et non vers les cellules n'ayant qu'un sommet commun avec i,j .

3.4. Conclusion

L'ensemble des phénomènes physiques participant au rayonnement infrarouge à la surface de la Terre, ainsi que leurs expressions mathématiques ont été présentées dans ce chapitre. Nous avons également abordé la méthode de radiosité, et celle des différences finies permettant la résolution numérique respectivement de l'équation du bilan radiatif et de l'équation de diffusion de la chaleur. Enfin, la température, quantité fondamentale en infrarouge thermique a été définie.

Rappelons encore la complexité de la physique dans le domaine infrarouge, qui conduit à effectuer certaines hypothèses et/ou approximations ou à recourir à des modèles, sans quoi peu d'équations pourraient être r solv es de manière analytique.

Durant la suite de cette thèse, nous effectuerons les hypothèses suivantes pour résoudre les différentes équations utiles à la prédiction de la luminance provenant d'un paysage :

- les matériaux seront considérés comme opaques, induisant un facteur de transmission nul, et l'émissivité spectrale égale au complémentaire à un de la réflectance spectrale,
- pour tous les matériaux, l'émissivité sera supposée indépendante de la température,
- les différents objets seront assimilés à des diffuseurs et émetteurs parfaits (lambertiens), et satisfont ainsi les hypothèses de la radiosité,

- l'atmosphère sera supposée transparente, et ne participera pas aux échanges de chaleur entre les objets. Ainsi, le pseudo facteur de forme se réduira au facteur de forme géométrique,
- en première approximation, le terme R_i de l'équation 3.36 donnant la somme des rayonnements incidents sur un objet, sera estimé à l'aide de la seule connaissance des rayonnements solaire et atmosphérique incidents. Ceci conduit à une sous-estimation minimale du bilan des flux à la surface, qui, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, est très inférieure à la précision de l'ensemble des modèles utilisés.

Oren et Nayar (1996) ont montré le faible réalisme de l'approximation lambertienne pour des surfaces rugueuses ; ils ont développé, pour la synthèse d'images, un modèle généralisant cette approximation. Néanmoins, ce modèle totalement indépendant de la longueur d'onde, et a été développé pour des applications dans les courtes longueurs d'onde. Nous ne pouvons nous prononcer quant à la validité et à l'applicabilité de ce modèle dans l'infrarouge thermique.

Une étude récente de Snyder et Wan (1998) présente les modifications à apporter aux modèles de Roujean *et al.* (1992) et de Wanner *et al.* (1995) afin d'étendre leur validité au domaine infrarouge. Ces modifications ont été approuvées sur des canopées et des buissons, mais pas sur l'ensemble des objets que nous sommes susceptible de considérer dans un paysage.

Les modèles de BRDF qui existent, nécessitent la connaissance d'un certain nombre de paramètres ou de fonctions relatifs au matériau. Par exemple, le modèle de Oren et Nayar (1996) nécessite la connaissance de trois paramètres, qui sont la réflectance lambertienne, le taux de diffusion, et l'écart-type de la distribution angulaire. Le modèle de Koenderink *et al.* (1996) nécessite, quand il est exprimé à l'ordre deux, la connaissance de cinq paramètres. Pour ces deux modèles, les paramètres d'étalonnage ont été obtenus (Dana *et al.*, 1999) et sont disponibles sur Internet (Columbia-Utrecht, 2001). Néanmoins, bien que répertoriés pour quelques matériaux entrant dans la composition des paysages que nous souhaitons simuler, tels le béton, la brique, la pierre calcaire, l'ardoise, l'aluminium, le bois ... ces paramètres ne sont connus que pour les trois couleurs rouge, vert et bleu du domaine visible, ainsi que pour le domaine visible dans son ensemble, et ne peuvent par conséquent être utilisés dans l'infrarouge thermique.

L'ensembles considérations suivantes :

- absence de modèle capable de reproduire le comportement directionnel de tout type de matériau constituant un paysage et ayant été validé dans l'infrarouge,
 - absence de base de données d'étalonnage des paramètres des modèles,
- nous restreint sommes dans cette thèse à considérer les objets qui composent le paysage comme des récepteurs et émetteurs parfaits. L'hypothèse lambertienne a été adoptée pour l'ensemble des simulations.

Chapitre 4

La simulation en infrarouge thermique

4.1. Spécifications d'un simulateur dans l'infrarouge thermique

4.1.1. De l'utilité d'un simulateur de scènes

Dans l'infrarouge thermique, les images à haute résolution spatiale - de l'ordre de quelques mètres - ne sont pas encore disponibles. Les futurs systèmes spatiaux capables de délivrer de telles images n'existent pas, ou leur existence n'est pas du domaine public. La conception, les spécifications et la réalisation de tels systèmes passent par l'étude préalable des missions qu'ils devront effectuer, et notamment des images qu'ils devront délivrer. Dans cette perspective, la simulation est un auxiliaire précieux, puisqu'elle permet de produire des images similaires à celles que délivrerait le futur système d'observation.

Afin d'obtenir une image simulée représentative de la réalité, un des points clés de la simulation est la reproduction à l'identique de l'ensemble des paramètres et données ayant un impact sur l'image. En particulier, une bonne connaissance de la scène que le système doit observer s'avère nécessaire. Cette connaissance peut s'acquérir à l'aide d'un simulateur de scènes. Sauf mention contraire, durant toute la suite de cette thèse, le terme de simulateur sera réservé pour désigner ce simulateur de scènes, par opposition au simulateur du système d'observation.

4.1.1.1. La formation des futurs utilisateurs

Un simulateur permettra, entre autres applications, à former les futurs utilisateurs à l'utilisation des images dans un cadre opérationnel. Dans le cas particulier des images infrarouge, il sera d'autant plus utile que l'interprétation des images diffère grandement de celle des images optiques dans les courtes longueurs d'onde. La physique régissant ces deux domaines spectraux étant différente, l'information contenue dans les images l'est également. Le simulateur illustrera alors l'influence de tel ou tel phénomène physique sur l'image.

Il visera également à établir et à valider les méthodes et algorithmes d'exploitation des images délivrées par le futur système. Suivant la thématique étudiée, l'utilisateur pourra en faisant varier les paramètres pertinents de la simulation, appréhender l'impact d'un paramètre sur l'image.

4.1.1.2. Le dimensionnement des futurs systèmes

Un simulateur du système d'observation sera utile, notamment dans un premier temps, pour :

- étudier les différents concepts de système afin de déterminer le plus approprié à la mission,
- visualiser sur l'image les performances prévues du système,
- appréhender l'impact des spécifications sur l'image.

Dans un second temps, il pourra être utilisé pour étudier les éventuelles modifications des paramètres d'acquisition liées au vieillissement du système.

Le simulateur de scènes, quant à lui, permet de quantifier les variations radiométriques du signal provenant de la scène. La figure 4.1 illustre, pour une situation typique décrite au chapitre 7 de cette thèse, l'évolution de l'amplitude du signal provenant d'une scène au cours de la journée. Dans cette situation, la luminance maximale qui provient du paysage oscille au cours de la journée entre $0.82 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ et $4.04 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ en bande II (entre 3 et $5 \mu\text{m}$) et entre $26.6 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ et $50.6 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ en bande III (entre 8 et $12 \mu\text{m}$). Dans ces deux bandes spectrales, les amplitudes maximales de variation de la luminance sont respectivement de $3.2 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ et de $24 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$. De nuit, vers 4 h, l'amplitude entre les luminances minimale et maximale n'est que de $0.4 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ en bande II et de moins de $5 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ en bande III. Cela représente respectivement environ 12 % et 20 % de l'amplitude totale dans la bande spectrale considérée. Lors de la spécification d'un futur système d'observation, il faudra prendre en compte cet aspect de variation journalière de la luminance ; si le capteur est prévu pour observer de nuit, en bande II notamment, le signal devra être codé sur un nombre suffisant de niveaux, directement relié à la réponse du capteur et à la précision souhaitée sur la luminance.

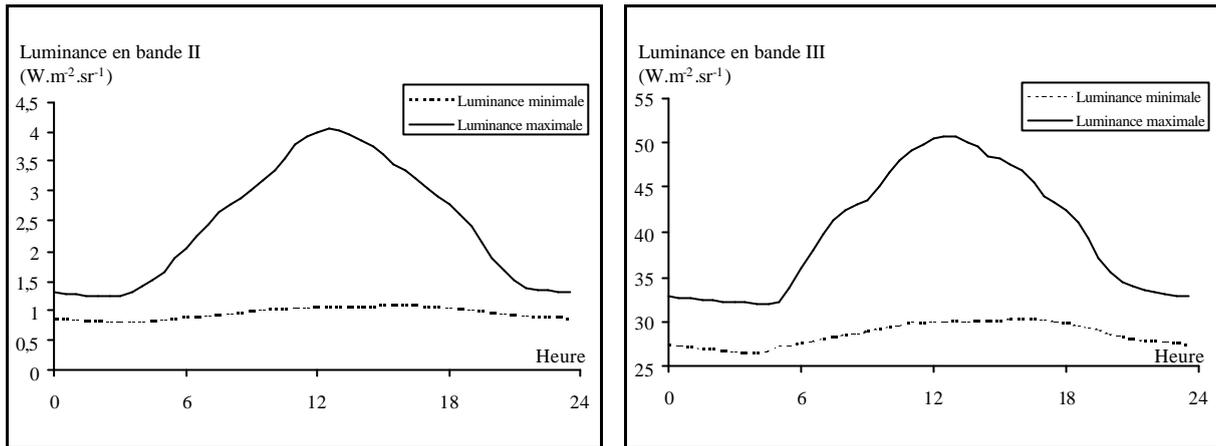


Figure 4.1 : variation de l'amplitude de la luminance dans les bandes II et III au cours de la journée pour une situation typique

Ces simulations aident le concepteur du futur système d'observation à juger de l'intérêt d'acquérir des images de nuit et à décider du système de codage le plus approprié. Celui-ci devra être compatible avec les besoins de la mission, la précision radiométrique liée au codage analogique-numérique ayant une influence sur la qualité des traitements effectués au sol.

4.1.2. Spécifications et desiderata utilisateurs

Dans l'infrarouge thermique, extension du domaine optique vers les grandes longueurs d'onde, l'acquisition d'une image par un capteur spatial n'est possible que par ciel clair ; cela signifie que l'influence de la couverture nuageuse doit être négligeable pour que l'image acquise soit interprétable (absence de cirrus notamment). Le simulateur *OSIRIS*, que nous spécifions et développons, devra être capable de générer des images en luminance par ciel clair.

La principale différence entre le domaine optique courtes longueurs d'onde et l'infrarouge, est la nature physique du signal. Dans le premier cas, le signal reçu par le système d'observation est quasiment exclusivement réfléchi par la scène. La source lumineuse prépondérante aux courtes longueurs d'onde étant le soleil, l'acquisition d'image n'a lieu que de jour. Dans l'infrarouge thermique, l'émission propre des objets n'est jamais nulle. Il n'y a donc a priori pas lieu de privilégier une heure d'acquisition plutôt qu'une autre. Des considérations liées à l'altération du signal due à la traversée de l'atmosphère, font qu'en pratique, certaines périodes de la journée sont préférables pour acquérir une image. Cependant, nous n'en tiendrons pas compte dans les spécifications du simulateur *OSIRIS*, qui devra être capable de simuler une image à toute heure de la journée. La possibilité de simuler une scène quelle que soit la date d'acquisition souhaitée, doit également être envisagée.

La simulation de tout type de paysage doit ainsi être possible. Un système d'observation spatial a la faculté de pouvoir observer l'ensemble de la planète. Des scènes purement urbaines, des paysages ruraux ainsi que des zones mixtes seront observés. Le simulateur devra pouvoir reproduire l'ensemble de ces scènes suivant les desiderata de l'utilisateur, et offrira ainsi la faculté de simuler le comportement d'un paysage situé n'importe où sur la planète. Toutes les latitudes et longitudes possibles doivent pouvoir être reproduites. Néanmoins, le simulateur *OSIRIS* a pour objectif de modéliser le comportement de paysages. La luminance provenant de la surface des grandes étendues liquides (océans, mers, grands lacs...) varie en fonction des courants. Ceux-ci sont dus à des échanges convectifs, libres ou forcés, liés notamment à des mouvements mécaniques des masses de fluide, ainsi qu'à des gradients de température. Cet aspect de variation de la luminance à la surface des milieux fluides ne sera pas pris en compte par le simulateur *OSIRIS*.

Le domaine de l'infrarouge thermique s'étend d'environ 3 à 100 μm . Il pourrait être envisagé de concevoir un simulateur travaillant avec cette amplitude spectrale. Cependant, la résolution spatiale

des images est limitée par la diffraction liée au diamètre R de la pupille de l'instrument et à la longueur d'onde. La fréquence spatiale de coupure u_c correspondante est donnée par (Marion, 1997) :

$$u_c = \frac{R}{\lambda f} \quad (4.1)$$

où f désigne la focale de l'instrument. Afin que le signal soit correctement échantillonné, la condition de Shannon, liant le pas d'échantillonnage p_d du détecteur à la fréquence de coupure u_c doit être respectée :

$$\frac{1}{p_d} > 2u_c \quad (4.2)$$

En pratique, cette relation n'est pas toujours vérifiée. Néanmoins, il existe un coefficient \mathbf{a} , proche de l'unité, tel que $2 \mathbf{a} u_c p_d = 1$. En écrivant la relation de proportionnalité qui existe entre le pas d'échantillonnage du détecteur, la focale, l'altitude h du porteur, et le pas au sol p_s :

$$\frac{p_d}{f} = \frac{p_s}{h} \quad (4.3)$$

on obtient la relation approchée donnant le pas au sol maximal :

$$p_s \propto \lambda \frac{h}{R} \quad (4.4)$$

Cela signifie qu'un imageur en orbite à 500 km, doté d'une pupille de 1 m de diamètre et observant à 10 μm ne verrait pas de détails dont la taille caractéristique serait inférieure à 5 m. Il est inutile, dans la perspective de l'étude d'un futur système d'observation d'envisager la simulation pour des longueurs d'onde trop grandes. Combiné avec les fenêtres de transmission atmosphérique, nous avons choisi de concevoir un simulateur capable d'opérer entre 3 et 14 μm . L'échantillonnage spatial que nous nous imposons, supérieur ou égal à 50 cm, est compatible avec les possibilités d'un futur imageur. Cet imageur étant sur orbite, il aurait la possibilité d'acquérir des images de grande taille (de l'ordre de quelques kilomètres). Le simulateur devra pouvoir produire des scènes suffisamment grandes et représentative de tout ou partie d'une image de télédétection. En résumé, les spécifications et les *desiderata* des utilisateurs pour le simulateur *OSIRIS* sont exposés dans le tableau 4.1.

Spécifications du simulateur imposées par les utilisateurs.	
	<i>Etre capable de simuler une scène qu'elle que soit l'heure du jour ou de la nuit, indépendamment de la date de la simulation.</i>
	<i>Etre capable de traiter tout type de paysage.</i>
	<i>Pouvoir simuler différentes localisations géographiques à la surface de la Terre.</i>
	<i>Pouvoir simuler des conditions météorologiques variables durant les heures qui précèdent l'acquisition.</i>
	<i>Pouvoir simuler une scène pour toute bande spectrale et pour toute réponse spectrale incluse dans un intervalle allant de 3 à 14 μm,</i>
	<i>Simuler des scènes représentatives de l'ensemble des phénomènes physiques jouant un rôle à une résolution supérieure à 50 cm,</i>
	<i>Etre capable de gérer une scène de taille compatible avec des applications de télédétection.</i>

Tableau 4.1 : spécifications du simulateur *OSIRIS*

4.1.3. Principales caractéristiques inhérentes au domaine spectral

Une des difficultés importantes dans l'infrarouge thermique est liée au flux reçu par le capteur. Ce flux est à la fois proportionnel à la taille du pixel au sol, et à l'intervalle spectral considéré. La recherche d'images à haute résolution spatiale ne permet pas d'augmenter le pas au sol. Un rapport signal sur bruit convenable est alors obtenu en intégrant le signal sur une large bande spectrale ; dans cette thèse, sauf cas particuliers, nous présenterons généralement des résultats de simulation obtenus dans les bandes II et III.

4.1.4. Etat de l'art sur la simulation d'images à haute résolution spatiale

Il existe actuellement quelques outils de simulation d'images dans l'infrarouge thermique. Parmi ceux-ci, *SPIRou* (Jaloustre-Audouin, 1998) est un outil capable de simuler la luminance provenant d'une scène bidimensionnelle. Les phénomènes physiques intervenant dans le domaine spectral sont modélisés ; l'outil est opérationnel, a été validé et des images ont été générées. Ses principales caractéristiques sont proches des spécifications d'*OSIRIS*. Deux différences existent néanmoins :

- les formats d'entrée et de sortie de la scène ; *SPIRou* travaille en pixels, et simule une image,
- le pas d'échantillonnage de la scène ; en sortie de *SPIRou*, l'image ne peut être de résolution spatiale inférieure à 2 m.

D'autres simulateurs, admettant des scènes 3-D en entrée, existent, mais ils sont dédiés à des applications spécifiques. Par exemple, Johnson *et al.* (1998) ont développé le simulateur MUSEs, adapté à la simulation du comportement thermique de véhicules. Le simulateur DART (Gastellu-Etchegorry *et al.*, 1996 ; Gastellu-Etchegorry *et al.*, 2000) et son extension T-DART au domaine infrarouge (Guillevic, 1999) sont davantage des logiciels de simulation de transfert radiatif. A partir d'une distribution spatiale de températures de surface, T-DART simule une image en luminance dans la bande spectrale souhaitée.

Li *et al.* (1999) ont développé un outil de simulation d'images en temps réel ; cet outil s'appuie sur des bases de données de distributions spatiales de la température de surface, calculées antérieurement à la génération de l'image.

Le simulateur MISTRAL (Barillot, 2001) est le simulateur dont les spécifications sont les plus proches de celles d'*OSIRIS*. Il simule une image en luminance en s'appuyant sur la représentation 3-D du paysage.

MATISSE (Simoneau *et al.*, 2001) est un code de transfert radiatif et un générateur de scènes dans l'infrarouge. Son objectif est de prédire les luminances spectrales en entrée d'un capteur en prenant en compte les interactions entre la scène, l'atmosphère et les nuages. Il gère des scènes 3-D sur toute la surface de la Terre avec un pas de 900 m, et des textures peuvent être ajoutées pour obtenir une image représentative avec un pas de 10 m.

Cette liste est non exhaustive ; il existe d'autres simulateurs dans l'infrarouge thermique, mais ceux-ci diffèrent sensiblement de nos préoccupations. Un simulateur tel qu'*OSIRIS* n'existe pas encore, et doit être développé.

4.2. Choix d'une méthode de simulation

Les méthodes que nous discutons dans ce paragraphe concernent la simulation de paysages, et plus spécifiquement de l'obtention de scènes 3-D servant d'entrée aux simulateurs d'images du système d'observation. L'objectif est d'avoir en entrée de ces simulateurs une base de données 3-D, où sont connues les valeurs des luminances en tout point de la scène.

4.2.1. Utilisation de données réelles

Une des possibilités d'obtention de la scène 3-D représentant le paysage est de s'appuyer sur des données réelles. Un modèle 3-D est obtenu, soit par relevé altimétrique sur le terrain, soit par reconstruction à partir d'un couple d'images stéréoscopiques. Les radiométries associées aux différents objets sont récupérées sur le terrain, au moyen de photographies aériennes (images sources) par exemple. Des ajustements sont ensuite effectués pour associer une radiométrie pertinente à chaque partie des objets qui composent le paysage. L'ensemble constitue la scène que le système d'observation devra imager.

La principale caractéristique de la scène 3-D ainsi obtenue réside dans le fait que la radiométrie des objets qui la composent est identique à la radiométrie du paysage lors de l'acquisition des images sources. Cette caractéristique est avantageuse pour la simulation d'images satellite dans les mêmes conditions d'acquisition ; elle permet une simulation fine et une bonne représentation de l'ensemble des détails présents dans le paysage. Elle devient néanmoins un handicap pour la simulation dans des conditions différentes. Dans ce cas, des traitements radiométriques doivent être effectués pour :

- s'affranchir de l'impact des conditions météorologiques qui régnaient lors de la capture des images source,
- se replacer dans les conditions de l'instant de la simulation.

Pour effectuer ces traitements dans l'infrarouge, il faut :

- être capable de décomposer le signal en deux composantes (parties émise et réfléchie) de manière à pouvoir corriger indépendamment chacune des composantes,
- pouvoir relier la température de surface aux conditions qui régnaient lors de l'acquisition, afin d'établir des corrections pertinentes sur la température.

Une autre possibilité pour s'affranchir de ces traitements complexes, serait de disposer d'une base de données contenant autant d'images qu'il y a de situations météorologiques possibles.

Actuellement, il paraît impossible de corriger précisément des données sources acquises dans l'infrarouge afin d'en extraire des images de référence pour la simulation d'images satellite. Il paraît également impossible d'acquérir des bases de données d'images source représentatives de toutes les combinaisons possibles des conditions géographiques et météorologiques (lieu, heure, température et humidité des objets, température de l'air...).

4.2.2. Génération de données synthétiques

Une autre possibilité offerte pour la génération de scènes consiste à effectuer le calcul de la radiométrie de chacun des objets qui composent le paysage au moment de la simulation. Ce calcul requiert la connaissance de la description du paysage (objets, agencement et composition des objets, lieu, M.N.T....) ainsi que l'ensemble des phénomènes physiques qui régissent son comportement. L'obtention de données synthétiques est décrite dans le paragraphe 4.4.1.

Ces considérations, combinées aux possibilités offertes à l'utilisateur de simuler tout type de paysage, de lieu, d'instant d'acquisition et de bande spectrale, nous orientent vers une méthode de synthèse pour la simulation de scènes.

4.3. Physique de l'infrarouge thermique et simulation en 3-D

4.3.1. Hypothèses induites par une modélisation 2-D du paysage

Considérer le paysage comme bidimensionnel et plan revient implicitement à effectuer plusieurs hypothèses :

- les rayonnements incidents sur chaque objet ne proviennent que de deux sources, le soleil et l'atmosphère, et sont identiques pour chaque objet,

- les écoulements de fluides à la surface des objets ne sont pas perturbés par ces derniers ; le flux de chaleur sensible ne dépend que de la rugosité et du gradient de température entre l'objet et l'air,
- l'environnement d'un objet est composé de ses voisins immédiats ; les interactions, quand elles existent, ont lieu exclusivement par conduction.

Il existe des paysages répondant à de tels critères : cela est notamment le cas de paysages naturels avec de faibles dénivelés, tels que champs cultivés, forêts, plaines... Dans le cas d'une ville, le paysage est davantage complexe, et aucune des hypothèses précédentes n'est plus valable. Cela est d'autant plus vrai que la précision avec laquelle la ville est modélisée est élevée. La résolution de 50 cm, souhaitée pour l'image, impose une modélisation plus précise du paysage ; dans ce cas, une modélisation 3-D est nécessaire.

4.3.2. *Les interactions conductive et convective*

Les interactions conductive et convective sont des interactions objets-objets. Ces interactions ont pour conséquence de perturber le bilan des flux à la surface des objets, et/ou leur température. Elles ne dépendent que de la position et de la constitution des objets.

4.3.2.1. *La conduction de la chaleur*

La conduction (ou diffusion) de la chaleur n'est pas spécifique à une description 3-D du paysage ; cependant, son étude s'est avérée nécessaire, l'échantillonnage sub-métrique lié à la description du paysage imposant de s'intéresser à la diffusion de la chaleur à l'intérieur des objets et entre les objets.

La conduction de la chaleur entre deux objets existe lorsque ceux-ci sont en contact. Dans ce cas, dès qu'un gradient de température existe, un transfert de chaleur a lieu de la source chaude vers la source froide.

A l'intérieur des objets solides, la chaleur se propage selon les trois dimensions. Dans le cas d'un objet homogène¹, soumis à des conditions aux limites particulières telles celles rencontrées pour la prédiction de la température, la chaleur se propage de la surface vers les couches profondes et réciproquement. Lorsque deux objets homogènes sont mis en contact, un échange de chaleur fonction du gradient de température et des caractéristiques thermiques de chacun des objets, a lieu selon les autres directions (figure 4.2).

Dans le cas d'une juxtaposition d'objets de grande taille et de caractéristiques thermo-optiques différentes, la conduction de la chaleur selon les directions transverses n'affecte que localement le bilan des flux et la température en périphérie des objets. Dans le cas d'objets dont la taille est plus petite, un transfert de chaleur transversalement aura un impact sur la température, et par suite, sur le signal provenant de cet objet. Afin d'évaluer cet impact, nous avons tout d'abord étudié l'influence de la conduction sur la température selon une direction, puis la diffusion de la chaleur selon plusieurs directions.

¹ Dans la totalité du chapitre, un objet est qualifié d'homogène lorsque une profondeur étant fixée, il existe un seul et unique matériau le constituant ; l'objet est composé de différentes couches ou strates, toujours parallèles à la surface.

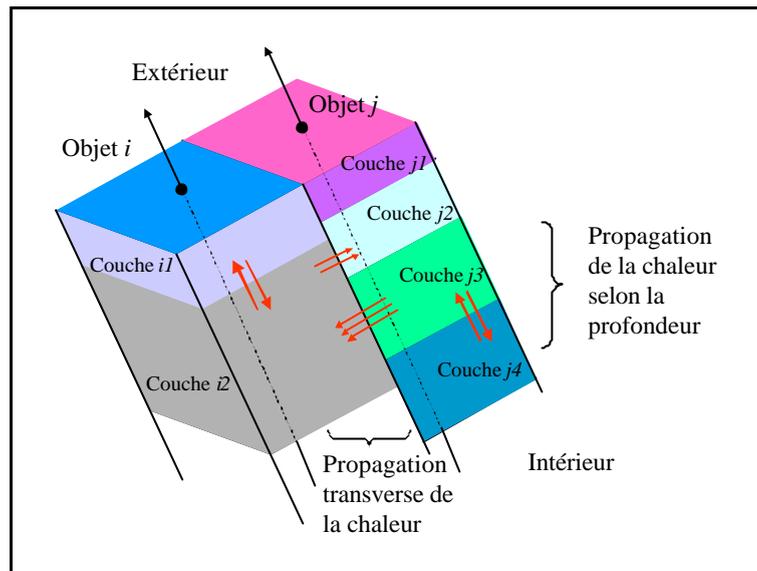


Figure 4.2 : illustration de la conduction de la chaleur selon la profondeur et selon les directions transverse entre deux objets en contact

Diffusion de la chaleur selon une direction

Afin d'évaluer les longueurs caractéristiques de diffusion de la chaleur à l'intérieur des matériaux, nous nous sommes intéressés à la diffusion de la chaleur dans un matériau homogène selon une direction. Dans ce cas, une expression analytique de la solution de l'équation de diffusion de la chaleur est donnée, par exemple, par Jakob (1949) ou Guyon *et al.* (1991) :

$$T = T_0 + \Delta T \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{\mathbf{k}t}} \right) \right) \quad (4.5)$$

T_0 désigne la température initiale et ΔT le gradient de température entre la source chaude et la source froide. \mathbf{k} désigne la diffusivité thermique, x la distance entre le point de mesure de la température T et la source, et t le temps pendant lequel la diffusion a opéré. La fonction *erf* est la fonction erreur de Gauss, donnée par :

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-v^2} dv \quad (4.6)$$

A titre d'exemple, nous avons évalué l'impact d'une source à la température $T_0 + \Delta T$ sur un objet initialement à la température T_0 en fonction du couple de paramètres distance / temps. Cette évaluation a été effectuée sur de l'acier, matériau possédant une diffusivité thermique élevée ($\mathbf{k}_{\text{acier}} = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). En pratique, les matériaux ont souvent des diffusivités thermiques plus faibles : $5.96 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la terre par exemple, $9.45 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour le plastique. Le tableau 4.2 donne, en pourcentage, la contribution de la conduction à l'augmentation de la température.

Dans le simulateur, nous traitons des objets dont la taille est de l'ordre de 50 cm ou davantage. A cette distance, la chaleur se propage en environ 12 minutes dans une barre d'acier et fait augmenter sa température de plus de 0.1 %. En moins de dix minutes, l'augmentation de chaleur n'est pas significative. Cependant, si deux objets accolés sont soumis à des différences de bilan de flux importantes sur de longues périodes, de l'ordre d'une heure ou davantage, induisant ainsi de forts gradients de température, la conduction de la chaleur entre les deux objets devrait être prise en compte dans la simulation.

Durée (t)	Distance (x)				
	1 m	50 cm	20 cm	10 cm	5 cm
1 seconde	0.	0.	0.	0.	0.
30 secondes	0.	0.	0.	0.2	11.7
1 minute	0.	0.	0.	2.7	26.8
5 minutes	0.	0.	4.7	32.2	62.1
10 minutes	0.	0.	16.1	48.4	72.6
1 heure	0.4	15.3	56.8	77.5	88.6
2 heures	4.3	31.2	68.6	84.0	92.0
6 heures	24.3	60.0	81.5	90.7	95.3

Tableau 4.2 : influence de la conduction sur l'augmentation de la température en fonction du couple distance / temps pour l'acier (diffusivité thermique $k_{acier} = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$). En grisé, les couples distance / temps pour lesquels la variation de température due à la conduction est significative

Diffusion de la chaleur selon plusieurs directions

En toute rigueur, la chaleur diffuse toujours selon les trois directions comme l'illustre la figure 4.2. L'équation de propagation de la chaleur doit être résolue en tenant compte de ces aspects directionnels. Cependant, connaissant :

- l'échantillonnage spatial de la scène,
- la vitesse d'évolution des conditions aux limites à la surface des objets,
- la précision souhaitée sur la température de surface,

il n'est pas nécessaire de résoudre l'équation de diffusion de la chaleur à trois dimensions sur l'ensemble de la scène.

A titre d'exemple, nous avons étudié le cas d'un angle entre deux façades d'un bâtiment. Celles-ci sont orientées sud-est (SE) et sud-ouest (SO), comme illustrées par la figure 4.3. Les façades sont constituées (de l'extérieur vers l'intérieur), d'un mur de 20 cm de béton, puis 5 cm d'isolation en polystyrène, puis 5 cm de béton. La température de l'air à l'intérieur du bâtiment est constante, et a été fixée à 19 °C. La simulation a lieu le 12 mai, à 45 N et à longitude nulle ; la température de l'air oscille entre 7 °C et 18 °C au cours de la journée. Les autres conditions de simulation sont identiques sur chacune des façades.

Sur cette figure, nous avons indiqué 7 points, A_0 , A_1 , A_2 , B, C_0 , C_1 et C_2 , pour lesquels l'évolution de la température est discutée dans les pages suivantes.

L'équation de la chaleur a été résolue à deux dimensions en supposant la structure décrite par la figure 4.3 identique selon la troisième dimension. Nous avons utilisé la méthode des différences finies, en prenant pour cet exemple un pas de temps de 200 secondes, et un maillage en cellules carrées de 2.5 cm de côté. Ce pas de temps, relativement faible, est imposé par le respect de la condition de convergence de l'équation de diffusion écrite en 3.54.

La figure 4.4 présente l'évolution de la température de surface des points A_0 , B et C_0 au cours de la journée ; ces points sont respectivement situés :

- sur la façade sud-ouest, à 20 cm de l'angle sud,
- exactement sur l'angle entre les deux façades,
- sur la façade sud-est, à 20 cm de l'angle sud.

Les points C_0 et B sont les premiers à subir l'influence du soleil. Le matin, la température croît rapidement pour ces deux points. Néanmoins, la température en B est toujours inférieure le matin à celle en C_0 , et le maximum en température est obtenu en C_0 vers 10 h, alors qu'il est obtenu vers 14 h en B. Cela s'explique par la diffusion de la chaleur accumulée en B d'une part vers l'intérieur du bâtiment, mais également vers la façade sud-ouest, qui s'échauffe sensiblement près du point B et

contribue ainsi à une dissipation significative de la chaleur. L’allure de la courbe de température en A_0 est similaire à celle en C_0 . Ceci est dû à la similarité des conditions aux limites ; seuls un déphasage temporel (soleil l’après-midi dans le cas de A_0 , le matin dans le cas de C_0) et une température de l’air plus élevée l’après-midi différencient les conditions aux limites.

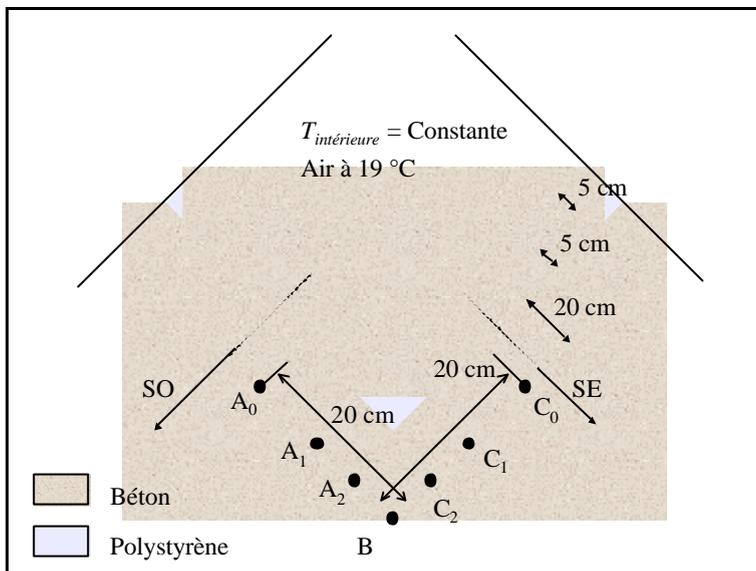


Figure 4.3 : illustration de l’orientation des façades, de la constitution des murs et des points pour lesquels nous avons contrôlé l’évolution journalière de la température de surface

Le maximum en température est obtenu vers 16 h en A_0 , tandis qu’à cette heure-ci, a contrario de ce qui se passe le matin, la chaleur diffuse de la façade sud-ouest vers la façade sud-est en B . Il est également intéressant de noter que la température en B est supérieure aux températures en A_0 et C_0 à 13 h ; cela est dû à l’accumulation de chaleur dans l’angle sud, du fait des caractéristiques thermiques du béton et de l’éloignement de l’intérieur du bâtiment (maintenu à 19 °C). Vers 4 h 30, le phénomène est inversé, le point B présente la température la plus faible, environ 2 °C.

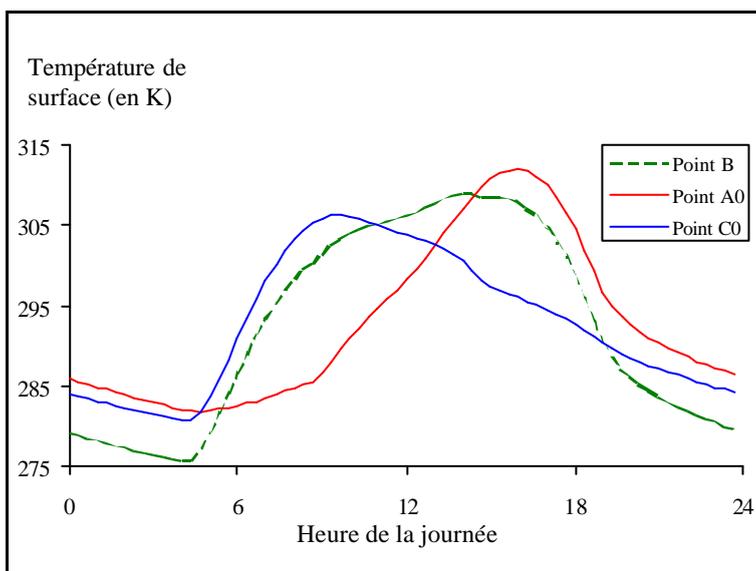


Figure 4.4 : évolution de la température de surface des points A_0 , B et C_0 au cours de la journée

L’équation de la chaleur a également été résolue à une dimension, sur chacune des façades, au centre de celles-ci. La figure 4.5 représente les différences entre l’évolution journalière de la température de

surface obtenue en résolvant l'équation de diffusion de la chaleur sous l'approximation unidimensionnelle, et le calcul effectué à deux dimensions. Ces différences ont été évaluées aux points C_0 , C_1 et C_2 de la façade sud-est, respectivement distants de 20, 10 et 5 cm de l'angle sud.

Au point C_0 , la différence de température entre les deux modes de calcul est quasi nulle ; elle avoisine le dixième de degré. Plus on se rapproche de l'angle du bâtiment, moins l'approximation unidimensionnelle est valide ; à 10 cm (point C_1), l'écart maximal reste néanmoins faible, de l'ordre du degré. Par contre, à 5 cm ou moins, cette approximation devient fautive, des écarts de température de plusieurs degrés étant constatés.

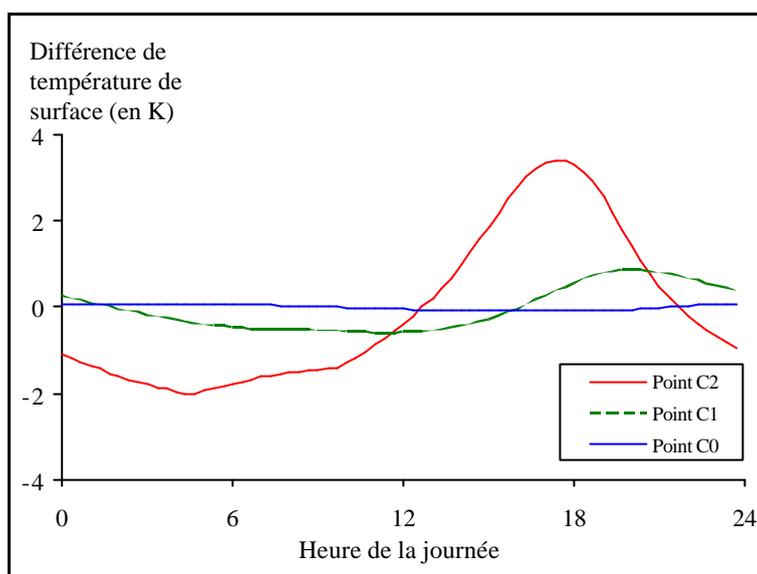


Figure 4.5 : différence de l'évolution de températures de surface entre le calcul effectué en résolvant l'équation de la chaleur à deux dimensions, et l'approximation unidimensionnelle, pour les points C_0 , C_1 et C_2

Les erreurs quadratiques moyennes ainsi que les erreurs maximales de température de surface entre les solutions obtenues par la résolution de l'équation de diffusion respectivement à une et deux dimensions sont reportés dans le tableau 4.3. Ces erreurs ont été calculées pour les points A_0 , A_1 , A_2 , B , C_0 , C_1 , et C_2 .

		Erreur d'estimation de la température de surface	
		EQM	Erreur maximale (K)
Façade sud-ouest	Point A_0	0.012	0.162
	Point A_1	0.104	1.313
	Point A_2	0.315	4.187
Angle sud	Point B	0.890	14.520
Façade sud-est	Point C_0	0.007	0.104
	Point C_1	0.059	0.889
	Point C_2	0.206	3.384

Tableau 4.3 : erreur quadratique moyenne (EQM) et valeur absolue de l'erreur maximale effectuées en utilisant l'approximation unidimensionnelle au lieu d'une résolution bidimensionnelle de l'équation de diffusion de la chaleur

Ce tableau illustre la faible portée des phénomènes conductifs, notamment avec des erreurs quadratiques moyennes toujours inférieures au degré, à l'exception de la comparaison avec le point B.

Sur cet exemple particulier, et compte tenu des spécifications que nous nous sommes imposées, la température obtenue par résolution unidimensionnelle de l'équation de la chaleur est satisfaisante jusqu'à 10 cm de l'extrémité de la façade. Etudiant des objets dont la taille caractéristique est de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, il ne paraît pas déraisonnable de considérer valables les solutions données par l'approximation unidimensionnelle.

Ce travail de comparaison entre résolution uni et bidimensionnelle de l'équation de la chaleur aurait sans aucune difficulté pu être étendu à la troisième dimension. Ceci n'a néanmoins que peu d'intérêt, les conclusions étant similaires aux résultats de la comparaison entre une et deux dimensions. Seules des configurations de type « coin de cube » sur des distances de l'ordre de la dizaine de centimètres auraient présenté de l'intérêt ; ces configurations n'occupent néanmoins pas la surface majoritaire dans la description d'un paysage.

4.3.2.2. La convection

Ces effets affectent exclusivement le bilan des flux globaux ; ils se font sentir au niveau de la température de surface du paysage et du rayonnement émis par celui-ci. Leur influence est davantage sensible dans les bandes thermiques, alors qu'elle devient plus faible aux courtes longueurs d'onde. Une description 3-D du paysage oblige à prendre en compte les perturbations d'écoulement de vent autour des objets 3-D.

Nous avons analysé l'impact de la variation de la vitesse du vent à la surface d'une pelouse supposée rase, placée derrière un immeuble, et subissant les effets de variation de vent. Cette situation fictive est décrite par les paramètres suivants :

- simulation le 21 mars 2002, à 45 N et à longitude nulle,
- température de l'air oscillant entre 7 et 18 °C, humidité relative de 0.6,
- propriétés du matériau : humidité relative de 0.5, albédo de 0.15 et émissivité de 0.8 (à humidité nulle), rapport 10 entre les rugosités aérodynamique et du sol.

Les variations journalières de la température de surface de la pelouse sont décrites sur la figure 4.6. En pointillés, nous avons également représenté la variation de la température de l'air. Plus la vitesse du vent augmente, plus le brassage convectif est important. Les échanges de chaleur par convection, chaleur sensible et chaleur latente, tendent à homogénéiser les masses d'air et leurs températures. La température de surface évolue alors de manière similaire à la température de l'air. De jour, la température de surface décroît avec l'augmentation de la vitesse du vent. Cette décroissance n'est pas linéaire avec la vitesse du vent ; toutes proportions gardées, une même variation de vitesse de vent à faible vitesse engendre des perturbations de température plus importantes qu'à grande vitesse.

Les impacts de ces variations de vitesse sur la température de surface se traduisent au niveau des luminances par des variations plus faibles, notamment en bande II. Celles-ci sont reportées dans le tableau 4.4.

	Température maximale (° C)	Luminance maximale ($W.m^{-2}.sr^{-1}$)	
		Bande II	Bande III
Vitesse de 1 $m.s^{-1}$	29.1	2.86	35.0
Vitesse de 3 $m.s^{-1}$	24.6	2.61	32.7
Vitesse de 8 $m.s^{-1}$	19.8	2.39	30.3
Vitesse de 20 $m.s^{-1}$	16.3	2.23	28.6

Tableau 4.4 : influence de la variation de la vitesse du vent sur la température et la luminance maximale provenant de la situation étudiée

Une perturbation sur la vitesse du vent de 3 à 1 ms⁻¹ engendre une variation d'environ 10 % du signal aussi bien en bande II qu'en bande III. La difficulté de simulation viendra des faibles vitesses de vent, qui devront être correctement modélisées.

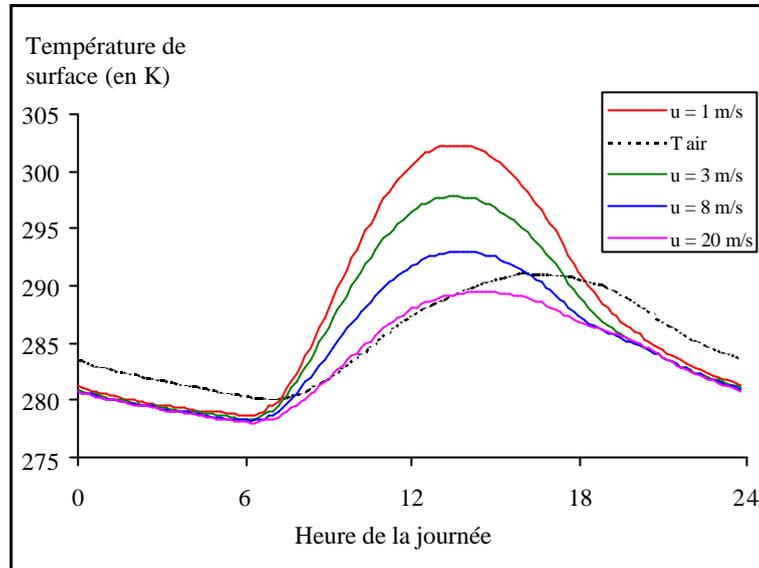


Figure 4.6 : illustration de la variation journalière de température de surface en fonction de la variation de vitesse de vent, u

4.3.2.3. Impact des variations de température sur la luminance

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'importance de chacun des phénomènes physiques jouant un rôle dans le domaine spectral, sur le rayonnement provenant de la scène. Les deux études précédentes, concernant la conduction et la convection, nous ont conduit à estimer des variations de température de surface. Les variations de luminance induites par les variations de température se déduisent de l'équation 3.1 et de l'expression de la luminance du corps noir. Le rayonnement réfléchi par un objet étant indépendant de la température de surface de cet objet, les variations de luminance ne dépendent que des variations de température. En supposant l'émissivité indépendante de la température :

$$dL = e \, dL^{bb} \quad (4.7)$$

$$\frac{dL^{bb}}{L^{bb}} = \frac{c_2}{1T} \left(\frac{1}{1 - \exp\left[-\frac{c_2}{1T}\right]} \right) \frac{dT}{T} \quad (4.8)$$

Il est alors possible, à partir de la connaissance des variations de température, de prédire les variations de luminance.

4.3.3. Les interactions radiatives

Ces interactions sont des interactions onde-matière et ont de multiples causes :

- masquage d'une source par un objet ; c'est le cas des ombres solaires, ou des phénomènes de visibilité partielle liés à l'agencement des objets dans la scène,
- phénomène de réflexions multiples.

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à l'influence des ombres solaires sur la luminance provenant d'un objet, ainsi qu'à l'influence du masquage des objets entre eux. L'impact du masquage est généralement difficile à évaluer. Lorsqu'un objet j constitue un masque pour un objet i vis à vis d'une source, il constitue lui-même une source pour l'objet i , d'une part à cause de sa propre température, d'autre part à cause du fait de réflexions multiples.

4.3.3.1. Les ombres solaires

Communément, on parle d'ombre dès lors que la source de rayonnement que constitue le soleil pour un objet est masquée. L'objet ne reçoit plus aucun rayonnement provenant directement du soleil. Néanmoins, il reçoit une fraction du rayonnement diffus. Celle-ci dépend de la taille du masque et de la position de l'objet par rapport au masque. Comme nous le verrons en 4.3.3.2, un objet au pied d'un grand bâtiment ne voit, au plus, que la moitié de la sphère céleste ; le rayonnement diffus qu'il reçoit est divisé par deux. Dans le même temps, le masque se comportant comme une source, il émet un certain flux en direction de l'objet à l'ombre. La prise en compte de ces trois phénomènes, ombre, portion de ciel vu, et émission du masque, perturbant le bilan radiatif net, permet l'étude précise de l'impact des ombres solaires sur la luminance.

La figure 4.7 illustre l'influence des ombres pour l'exemple décrit au 4.3.2.2. Le cas n° 1 représente l'évolution journalière de la luminance provenant d'un objet toujours au soleil en bande II. Cette dernière augmente continûment du lever du soleil jusqu'à 13 h environ, puis diminue ensuite. Le cas n° 2 représente le comportement d'un objet dans les mêmes conditions, mais celui-ci est à l'ombre de 9 h à midi. Le cas n° 3 est l'analogue du cas n° 2 pour un objet à l'ombre de 13 h à 16 h.

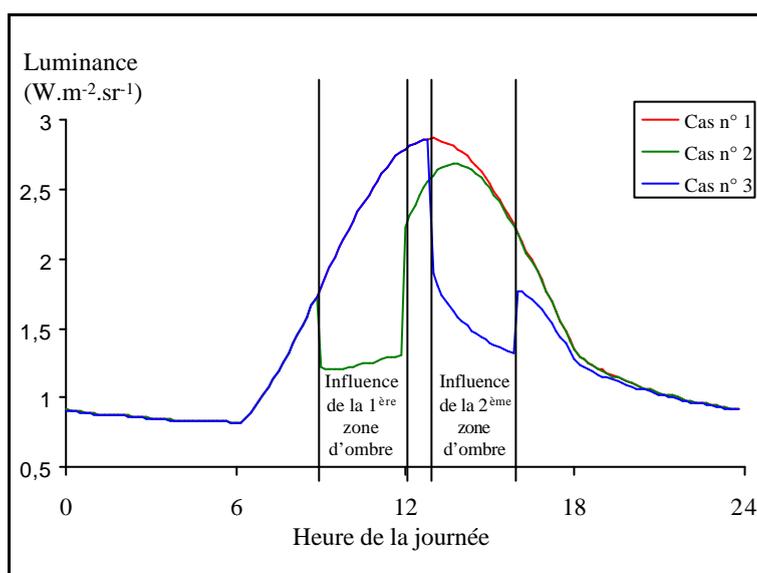


Figure 4.7 : impact de l'ombre sur la luminance provenant du paysage en bande II pour les 3 cas discutés dans le texte

La simulation des rayonnements solaires a été effectuée en utilisant le modèle ESRA (<http://www.soda-is.com>). Celui-ci est détaillé en 4.4.4.1. Entre 9 h et 12 h, et compte tenu des conditions météorologiques, le rayonnement diffus représente en moyenne 18,5 % du rayonnement global (20,5 % de 9 h à 10 h, 18,3 % de 10 h à 11 h, et 17,2 % de 11 h à midi). L'après-midi, ce rapport atteint 20,4 %. Bien que les variations de température de surface soient continues, au passage dans une région à l'ombre, la luminance est discontinue, notamment en bande II. Ceci s'explique car les ombres affectent la température et le flux réfléchi par l'objet.

Le tableau 4.5 donne les valeurs moyennes de la température et des luminances provenant d'un objet pour les trois cas précédemment décrits. La figure 4.7 et le tableau 4.5 montrent que l'impact des

ombres sur la luminance est important, quelle que soit la bande spectrale considérée, puisque des variations de plus de 20 % existent en bande III pour notre cas typique. D'autres simulations, effectuées en été sur des matériaux artificiels (tôle ondulée, aluminium, plaque en acier...) exhibent des variations de luminance de plus de 60 % en bande II et 35 % en bande III. Ces variations sont toujours calculées en supposant la situation au soleil comme la référence ; lorsque la référence est la situation à l'ombre, ces variations ne sont plus de 60 % ou 30 %, mais de 200 % ou 100 %.

	Température moyenne (° C)	Luminance moyenne (bande II)	Luminance moyenne (bande III)
Ombre simulée de 9 h à midi			
Référence (cas n° 1)	21.6	2.29	30.8
Cas n° 2	12.6 (-3.1 %)	1.27 (-44.4 %)	26.5 (-23.5 %)
Ombre simulée de 13 h à 16 h			
Référence (cas n° 1)	28.2	2.64	34.6
Cas n° 3	19.6 (-7.9 %)	1.53 (-42.2 %)	30.1 (-20.4 %)

Tableau 4.5 : influence des ombres sur la température de surface et la luminance moyenne ; en italique, les différences en pourcentage entre le cas n° 1 de référence et les cas n° 2 et n° 3

Il est également intéressant de regarder les temps de retour à la situation qualifiée de nominale après application des perturbations. Par exemple, l'objet à l'ombre de 9 h à midi retrouve une température proche du cas n° 1 à 1 °C près à 14 h 30, alors qu'il faut attendre 16 h 10 pour que l'écart de température soit inférieur à 0.2 °C. Dans le cas n° 3, le temps de retour à l'équilibre est encore plus long ; il faut attendre 19 h pour avoir une différence inférieure au degré, et 22 h 50, soit près de 7 heures de délai pour que cette différence n'excède pas 0.2 °C.

4.3.3.2. Importance de la portion de ciel vu

Chaque objet qui compose le paysage reçoit un flux (global ou spectral) dépendant de son environnement. Celui-ci est composé, d'une part, d'objets à une température donnée. Ces objets possèdent leurs propres caractéristiques optiques, émissivité et réflectance. En fonction de ces paramètres et de l'intensité des rayonnements incidents, la contribution de l'environnement au bilan des flux reçus par l'objet auquel on s'intéresse est différente. D'autre part, l'environnement comprend une certaine portion de ciel ou d'atmosphère, variant de 0 à 2π sr.

Le flux reçu par un objet, provient de ses voisins, ou de l'atmosphère. Il s'agit de corps dont la température est voisine de 300 K. Leurs émissions agissent essentiellement dans les longueurs d'onde thermiques ; cela signifie qu'ils participent au bilan des flux et aux variations de température de surface, et impactent davantage les rayonnements réfléchis en bande III.

La portion de ciel vu est le complémentaire à l'unité de l'angle solide sous lequel est vu l'ensemble des voisins d'un objet i . La figure 4.8 illustre les variations de facteurs de forme en fonction de la distance, pour des objets dont la taille caractéristique est donnée en légende.

Le facteur de forme au pied d'un obstacle semi-infini vaut toujours 0.5. Dans ce cas, le rayonnement onde longue reçu par l'objet (deuxième terme de l'équation 3.36), provient pour moitié de l'atmosphère, et pour moitié de l'obstacle. En supposant la réflectance de l'objet égale à 0.2, un obstacle à 300 K, avec une émissivité moyenne intégrée sur tout le spectre de 0.8, et en considérant l'atmosphère à 290 K, la différence de flux reçu entre un objet masqué par l'obstacle et un objet isolé est d'environ 5 W.m^{-2} . Cette différence de flux augmente de façon significative lorsque :

- l'émissivité de l'obstacle augmente,
- la réflectance de l'objet diminue,
- la différence de température entre l'objet et l'atmosphère est importante.

L'analyse effectuée sur le bilan radiatif net peut être reconduite à l'identique sur le bilan de flux spectral. Le nombre de paramètres mis en jeu fait qu'il est extrêmement complexe d'estimer l'influence de la portion de ciel vu sur la température de surface, et par suite sur la luminance. Néanmoins, sur l'ensemble des exemples que nous avons pu tester, la différence engendrée par la non prise en compte de l'environnement d'un objet, et par le masquage du ciel n'a jamais excédé 10 %.

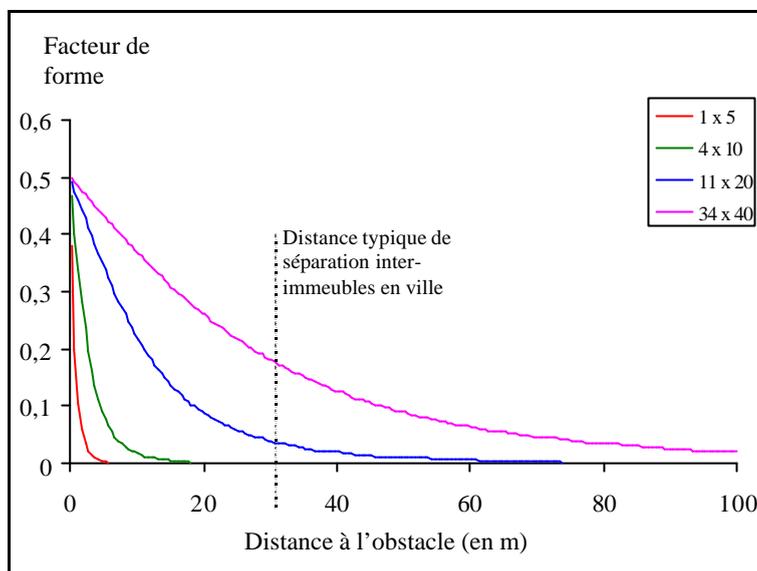


Figure 4.8 : variations du facteur de forme en fonction de l'éloignement à un masque dont la taille est donnée en légende (en m x m)

4.3.3.3. Les réflexions

Les réflexions des rayonnements constituent probablement le phénomène le plus complexe à appréhender. Les réflexions multiples, dues aux réflexions successives des rayonnements sur un objet, dépendent de la constitution et de l'agencement des objets. Celles-ci concernent l'ensemble des phénomènes physiques mis en jeu par rayonnements ; pour des raisons pratiques liées à l'évaluation de l'équation 3.36, nous distinguerons deux classes de rayonnements réfléchis en fonction de la nature de la source impliquée :

- les rayonnements d'origine solaire ou atmosphérique,
- les rayonnements liés à l'émission propre de l'environnement.

La première classe est toujours évaluée en même temps que l'émission propre des objets, permettant ainsi d'obtenir une première approximation correcte du rayonnement provenant de l'objet. La deuxième classe est évaluée dans un second temps, s'il y a lieu.

Nous proposons d'illustrer notre étude à l'aide d'un exemple montrant la contribution des réflexions multiples au flux provenant d'un objet. L'exemple est le suivant : trois bâtiments identiques sont disposés sur une place ; le premier des bâtiments (n° 1), auquel nous nous intéresserons, fait face à un autre bâtiment qu'il voit avec un facteur de forme de 0.095, et en juxta un autre sur le côté, tourné de 90°, qu'il voit avec un facteur de forme de 0.061 (figure 4.9).

Les dimensions reportées sur la figure sont telles que $c = 1.5 d = 2 a = 3 b$. Pour chaque bâtiment, température et émission propre ont été calculées, ainsi que les flux incidents. Par approximation successive de l'équation 3.31, les flux réfléchis à l'ordre n ont pu être estimés à partir de la connaissance des flux réfléchis à l'ordre $n-1$. Seules les valeurs numériques correspondant aux trois premiers ordres sont reportées dans le tableau 4.6.

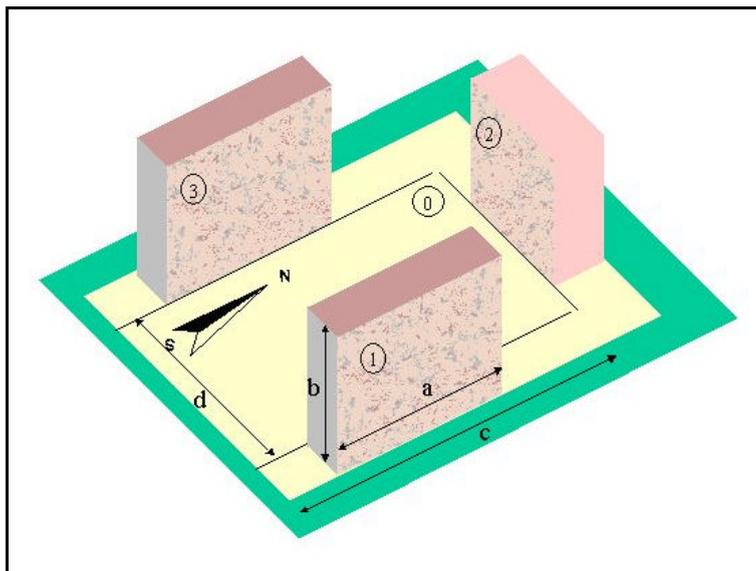


Figure 4.9 : illustration de la disposition des bâtiments et des dimensions inter-bâtiments utilisées dans l'exemple (voir texte)

		Température (° C)	Luminance ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$)			
			Emis	Réfléchis #1	Réfléchis #2	Réfléchis #3
Minuit	Bande II	14.9	1.06	1.17 (+9.2)	1.17 (+0.3)	1.17 (N.S.)
	Bande III		29.6	30.7 (+3.5)	30.7 (+0.1)	30.7 (N.S.)
Midi	Bande II	21.6	1.38	1.77 (+22.3)	1.79 (+1.6)	1.79 (N.S.)
	Bande III		33.3	34.8 (+4.3)	34.8 (+0.1)	34.8 (N.S.)

Tableau 4.6 : prédiction des flux émis et réfléchis. Ordre 0, 1, 2 et 3 cumulés pour le premier bâtiment ; en italique, contribution de l'ordre courant comparée à la somme des précédents (en pourcentage). N.S. : Non Significatif

L'intérêt de cet exemple réside dans l'augmentation perceptible du flux global provenant de l'objet du fait des réflexions multiples. A midi, bien qu'éclairé par le soleil avec une incidence tangentielle, le flux réfléchi par le premier bâtiment en bande II représente 23 % du flux global. Les proportions du flux global provenant de ce bâtiment sont les suivantes :

- 77 % proviennent de l'émission propre,
- 22 % de la réflexion des flux incidents calculés au premier ordre (rayonnements solaire et atmosphérique),
- 1 % provient des réflexions calculées au second ordre et au delà.

De manière générale, le premier ordre est toujours prépondérant pour le calcul des réflexions, quelles que soient l'heure de la journée et la bande spectrale considérées. La contribution des réflexions au flux global décroît avec l'ordre de diffusion. En bande III, le calcul des réflexions au premier ordre semble suffisant, au vu des spécifications du simulateur. Ceci est dû à la faible influence du rayonnement solaire dans cette bande spectrale. En bande II, et pour cet exemple, le second ordre représente seulement 1 % du flux global. Néanmoins, cela correspond à environ 1 / 50^{ème} des perturbations évaluées dans les paragraphes précédents. Cette valeur est faible, mais pourrait être significative en comparaison des capacités de codage analogique-numérique d'un futur système d'observation.

Les réflexions multiples dépendent très fortement de la réflectance spectrale du matériau de surface qui compose l'objet ; dans l'exemple précédent, pour le béton constituant les bâtiments, la réflectance

moyenne est de 0.11 en bande II, et 0.06 en bande III. D'autres matériaux, tels les métaux ou les verres, ont des réflectances plus élevées. Dans ce cas, l'évaluation du rayonnement global provenant de ces objets passera par le calcul des réflexions multiples au moins au second ordre.

4.3.4. Classification de l'importance des différents phénomènes physiques

Les simulations présentées dans cette section et d'autres simulations dont les résultats ne peuvent être exposées ici, nous ont permis, bien que basées sur des exemples, d'effectuer une classification des phénomènes physiques en fonction de leur influence sur le signal provenant de la scène. Cette classification ne saurait être universelle, tant l'influence de chacun des phénomènes étudiés est intimement lié aux conditions de la simulation. Elle est présentée dans le tableau 4.7.

Ce tableau montre néanmoins les ordres de grandeur de l'impact des perturbations des flux sur la luminance provenant du paysage. Deux catégories de phénomènes physiques se distinguent : ceux ayant une influence fondamentale, tels les variations de rayonnement solaire et de vitesse de vent, et ceux ayant une influence moindre. La première catégorie de phénomènes devra être parfaitement modélisée par le simulateur, afin de ne pas commettre de non-sens. La seconde, quant à elle, pourra être simulée dans un second temps, afin d'obtenir une image davantage réaliste.

Effets analysés	Influence moyenne
Occultation du rayonnement solaire : effet des ombres	de 50 % à 200 %
Perturbation de l'écoulement du vent autour des objets 3-D	de 10 % à 40 %
Réflexions multiples	de 0 % à 2 %
Portion de ciel vu	de 0 % à 10 %
Conduction / diffusion de la chaleur entre les objets	de 0 % à 5 % (localement davantage)

Tableau 4.7 : ordre de grandeur des perturbations engendrées par une méconnaissance des phénomènes physiques tridimensionnels agissant sur le signal provenant d'un paysage

4.4. Spécifications du simulateur OSIRIS

4.4.1. Fonctionnement du simulateur OSIRIS

Le mécanisme global de la synthèse paramétrique de paysages est illustré par la figure 4.10. Les entrées nécessaires à la synthèse sont :

- des paramètres utilisateur, tels la description géométrique du paysage, les conditions de simulation, la réponse spectrale du capteur ...,
- des bases de données contenant les paramètres physiques primordiaux : paramètres thermiques (capacité calorifique, conductivité thermique...), optiques (albédo, réflectances spectrales, émissivité...), aérodynamique (rugosité des objets), des paramètres liés à l'état hydrique (conductivité hydrique, potentiel hydrique...) et à la végétation (LAI ou indice foliaire, résistance stomatale, émissivité...),
- des méthodes physiques et mathématiques permettant de prédire les valeurs physiques pertinentes (température, humidité, luminance...) pour la simulation.

Les sorties du simulateur sont des scènes 3-D, ou des images fictives en luminance au niveau du sol, suivant les besoins de l'utilisateur. Ces différents points sont détaillés dans les deux paragraphes suivants.

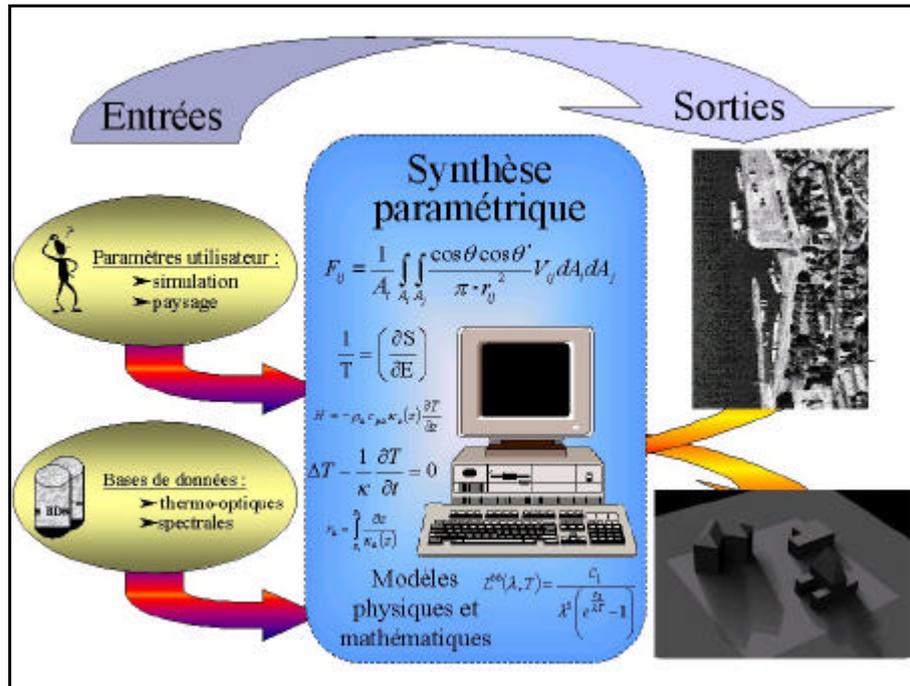


Figure 4.10 : illustration schématique de la synthèse paramétrique de scènes et des entrées - sorties du simulateur OSIRIS

A partir des paramètres fournis par l'utilisateur, de bases de données et de modèles physiques et mathématiques, le simulateur va prédire la luminance de chaque objet du paysage. Pour cela, il simule successivement la température à la surface de chaque objet puis les luminances émises et réfléchies. L'estimation de la température de surface est itérative ; à partir d'un instant initial, température et humidité sont calculées en résolvant les équations de diffusion de la chaleur et de l'humidité dans l'épaisseur des matériaux pour un pas de temps donné.

4.4.2. Les entrées

4.4.2.1. Les données utilisateur

Ce sont les données qui décrivent les conditions de la simulation. Elles sont fournies par l'utilisateur, et peuvent être classées en trois grands groupes ; les entrées du simulateur sont détaillées dans le tableau 4.8.

Ces paramètres peuvent être réels, et avoir une signification physique. Le modèle altimétrique peut provenir d'un relevé topographique correspondant à un lieu existant et la température de l'air être issue de mesures. Dans ce cas, le simulateur génère une scène représentative d'un paysage réel. Par ailleurs, les paramètres peuvent également être totalement arbitraires, choisis par l'utilisateur. La scène en sortie du simulateur est ainsi «de synthèse» et n'a pas d'équivalent réel ; cet aspect est très intéressant pour l'étude de cas particuliers et la formation des futurs utilisateurs : génération de scènes de géométrie simple, simulation pour des paramètres météorologiques stables, etc...

Entrées du simulateur <i>OSIRIS</i> fournies par l'utilisateur	
➤	<p>Les paramètres décrivant la simulation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - lieu de la simulation (latitude, longitude), - date et heure, - bande spectrale ou réponse spectrale du capteur, - angle de prise de vue,
➤	<p>Les paramètres décrivant le paysage :</p> <ul style="list-style-type: none"> - modèle altimétrique du terrain (M.N.T. ou M.N.E.), - connaissance des matériaux composant les objets présents dans le paysage, - connaissance des conditions régnant à l'intérieur des objets (côtés cachés au capteur),
➤	<p>Les paramètres météorologiques aux instants qui précèdent la simulation :</p> <ul style="list-style-type: none"> - températures minimale et maximale de la journée, - humidité de l'air, - humidité des objets lors de l'initialisation du simulateur.

Tableau 4.8 : entrées nécessaires au simulateur *OSIRIS*. Ces entrées sont fournies par l'utilisateur; tous les champs sont obligatoires

4.4.2.2. Les bases de données

Les bases de données regroupent l'ensemble des paramètres caractérisant les matériaux primaires manipulés par le simulateur. A partir de ces matériaux primaires, l'utilisateur construit les matériaux servant à modéliser les objets qui composent le paysage. Par exemple, à l'aide des caractéristiques du béton et du polystyrène ou de la laine de verre présentes dans les bases de données, il est possible de construire le matériau *mur de façade*, comme juxtaposition de 20 cm de béton, 5 cm d'isolation et 2 cm de crépi par exemple.

OSIRIS gère deux bases de données. La première regroupe les paramètres utiles au calcul de la température de surface. Pour chaque matériau, la base de données contient :

- l'identifiant du matériau,
- les paramètres thermiques : capacité calorifique, conductivité thermique, inertie,
- les paramètres optiques : émissivité moyenne à température donnée, albédo,
- la rugosité du matériau,
- les caractéristiques hydriques des matériaux : humidité au flétrissement et à saturation.

Pour tous les matériaux perméables, elle contient en plus l'ensemble des caractéristiques utiles au calcul de l'évolution de l'humidité en profondeur. Dans le cas particulier de la végétation, d'autres données sont également présentes, telles que l'émissivité de la végétation, la résistance stomatale minimum ou le LAI par exemple.

La seconde base de données regroupe les réflectances spectrales des matériaux de surface ; elle a été créée à partir des données ASTER (ASTER, 2000). Elle est utilisée pour les calculs de luminance dans une bande spectrale donnée avec un gabarit spectral de capteur donné.

4.4.3. Les sorties

Le simulateur *OSIRIS* est un simulateur de scènes. Il prédit la luminance des objets qui composent le paysage. La sortie naturelle du simulateur est une scène 3-D pour laquelle les luminances sont connues en tous points. Les valeurs des luminances dépendent de l'angle de prise de vue qu'aurait le capteur, ainsi que de son gabarit spectral.

D'autres sorties sont prévues pour le simulateur ; la possibilité de simuler une image au niveau du sol a été envisagée. Cette image est simulée en visée parallèle (capteur à l'infini) ; elle peut représenter au choix la scène en luminance ou en température de surface.

Une fois la scène 3-D en luminance prédite au niveau du sol, l'utilisateur pourra utiliser un logiciel de transfert radiatif pour simuler l'image au sommet de l'atmosphère, ou à une altitude quelconque, dans le cas de la simulation de l'acquisition d'une image par un capteur aéroporté.

L'utilisateur pourra également simuler l'ensemble du comportement du système d'observation, en utilisant par exemple le simulateur *AS³-I* développé par Alcatel Space.

En plus des paramètres de simulation fournis par l'utilisateur, et des bases de données, le simulateur *OSIRIS* comprend des modèles, nécessaires au calcul des températures et des luminances.

4.4.4. Les modèles physiques et mathématiques utilisés

En premier lieu, une quantité intervenant dans les échanges radiatif et convectif, et fondamentale en infrarouge thermique est la température de l'air T_a . Celle-ci pourrait être fournie par l'utilisateur. Néanmoins, le besoin de connaître cette température à chaque itération rend cette perspective peu conviviale, et un modèle statistique est utilisé. La résolution de l'équation donnant le bilan des flux à la surface du sol passe par la connaissance des contributions :

- du flux de rayonnement solaire,
- du rayonnement atmosphérique,
- du calcul des pertes radiatives,
- du flux de chaleur sensible,
- du flux de chaleur latente.

Chaque contribution est étudiée dans les paragraphes suivants.

4.4.4.1. La température de l'air

Le modèle statistique utilisé pour la prédiction de la température de l'air est le suivant :

$$T_a(t) = c(t)T_{a_{\max}} + (1 - c(t))T_{a_{\min}} \quad (4.9)$$

La statistique réside dans le coefficient c utilisé pour pondérer l'équation précédente. Nous disposons d'une base de données comprenant un coefficient par heure et par saison ; celle-ci provient d'une étude réalisée par Météo-France (Calvet, 1990). Pour obtenir la température à n'importe quel moment de la journée, une interpolation sur les coefficients est effectuée.

4.4.4.2. Le modèle de rayonnement solaire, ou modèle ESRA

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est en partie absorbé, en partie diffusé et en partie directement transmis. Seules les composantes diffusée D_c et transmise B_c sont perçues au niveau du sol. Le modèle ESRA permet d'obtenir ces contributions (Rigollier *et al.*, 2000) :

$$D_c = I_0 \mathbf{e} T_{rd}(T_L) F_d(\mathbf{q}_s, T_L) \quad (4.10)$$

$$B_{c,\perp} = I_0 \mathbf{e} \exp[-0.8662 T_L m \mathbf{d}_R(m)] \quad (4.11)$$

où $B_{c,\perp}$ est la composante directe orthogonale à la direction d'éclairement. La composante B_c atteignant une surface se déduit de $B_{c,\perp}$ par multiplication par le produit scalaire entre la direction d'éclairement et la normale à l'objet considéré. I_0 est la constante du rayonnement extraterrestre, \mathbf{e} est la correction liée à l'excentricité de l'orbite de la Terre, T_{rd} la fonction de transmission diffuse au zénith et F_d la fonction de diffusion angulaire. \mathbf{q}_s désigne l'angle zénithal sous lequel le soleil est vu, et T_L représente le trouble de Linke. Cette quantité traduit la transparence de l'atmosphère au rayonnement solaire. m

désigne la longueur relative du chemin optique par rapport à la longueur qu'aurait ce chemin si le soleil était au zénith. $d_R(m)$ caractérise l'épaisseur optique de Rayleigh.

(Rigollier *et al.*, 2000) ont comparé le modèle ESRA à des mesures *in situ*. L'erreur quadratique moyenne est comprise entre 11 et 35 $W.m^{-2}$, quelque soit la transparence de l'atmosphère ; il n'y a pas de dépendance significative de la précision à la localisation géographique et à l'altitude. Ces auteurs ont également comparé le modèle à d'autres. Bien que tous ces modèles donnent des résultats similaires, le modèle ESRA est le plus constant quelles que soient les conditions. C'est pourquoi nous avons sélectionné ce modèle pour l'implanter dans le simulateur *OSIRIS*.

4.4.4.3. Le modèle de rayonnement atmosphérique

Les modèles donnant le rayonnement atmosphérique sont généralement empiriques, tels ceux de Brutsaert (1975), Brunt (1932), Idso et Jackson (1969) et Swinbank (1963). Ils dépendent tous de la température de l'air T_a , ainsi que de la pression partielle en vapeur d'eau pour les trois premiers. Une étude récente (Ortega-Farias *et al.*, 1999) a étudié la pertinence du modèle de Brutsaert pour l'estimation du rayonnement net ; elle conclue en une sous-estimation du rayonnement par ce modèle d'environ 6 %, et une dépendance des performances du modèle aux conditions atmosphériques en présence de nuages notamment. Olseth *et al.* (1994) ont montré que parmi l'ensemble des modèles prédisant le rayonnement atmosphérique, le modèle développé par Swinbank était parmi les plus précis et était le plus constant. Il a été choisi pour le simulateur *OSIRIS*, en incluant l'amélioration apportée par Olseth *et al.* (1994) concernant le paramètre d'échelle T^* :

$$L_a = \left(\frac{T_a}{T^*} \right)^2 \epsilon T_a^4 \quad (4.12)$$

avec $T^* = 317.8 \text{ K}$

4.4.4.4. Les pertes radiatives

Les pertes radiatives pour des objets émettant de manière isotrope sont données par l'expression mathématique suivante :

$$E(T_s) = \epsilon \int_0^\infty \mathbf{e}(\mathbf{I}, T_s) L^{bb}(\mathbf{I}, T_s) d\mathbf{I} \quad (4.13)$$

L'étude effectuée dans le chapitre précédent vis-à-vis de la dépendance de l'émissivité en fonction de la température, a montré la faible influence de la température sur les pertes radiatives dans la plage de température (270 à 340 K) habituellement concernée. Les pertes radiatives seront modélisées par la loi de Stefan :

$$E(T_s) = \epsilon \epsilon_s T_s^4 \quad (4.14)$$

où ϵ est déterminé pour une température de 300 K.

4.4.4.5. Le modèle de flux de chaleur sensible

Nous utiliserons le modèle de Louis (1979) dans le simulateur *OSIRIS*. Ce modèle, basé sur l'équation 3.39 est fonction du gradient de température $T_s - T_a$ et de la résistance aérodynamique r_a traduisant la résistance au transfert de chaleur. Le flux de chaleur sensible H est estimé de la façon suivante :

$$H = \mathbf{r}_a c_{pa} \frac{T_s - T_a}{r_a} \quad (4.15)$$

4.4.4.6. Le modèle de flux de chaleur latente

Noilhan et Planton (1989) modélisent le flux de chaleur latente sur un sol nu ou partiellement couvert de végétation par :

$$L_e = \frac{r_a c_{pa}}{g} \left(\frac{a q_{sat}(T_s) - q_a}{r_a} \right) \quad (4.16)$$

où a est un coefficient dépendant de l'humidité du sol, q_a l'humidité de l'air et q_{sat} la pression de vapeur saturante à la température T_s . Le coefficient g est un paramètre du modèle et vaut : $g = 2/3 \text{ Pa.K}^{-1}$. Ces trois quantités s'expriment à l'aide de modèles :

$$a = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{p}{2} \cdot \frac{w_s}{w_{fc}} \right) \right] \quad \text{si } w_s < w_{fc} \quad (4.17)$$

$$a = 1 \quad \text{si } w_s > w_{fc}$$

où w_s désigne l'humidité du sol et $w_{fc} = 0.135$ est un paramètre fixé du modèle.

$$q_a = h_a \cdot 6.107 \cdot \left(1 + \sqrt{2} \cdot \sin \left(p \frac{T_a - 273.15}{540} \right) \right)^{8.827} \quad (4.18)$$

$$q_{sat}(T_s) = 6.1078 \cdot e^{\frac{17.27 T_s - 273}{T_s - 35.83}} \quad (4.19)$$

où la pression de vapeur saturante s'exprime à l'aide du modèle de Collatz *et al.* (1991). L'humidité du sol w_s se calcule pour un sol nu, soit à l'aide de modèles résolvant analytiquement l'équation de diffusion hydrique, tel Noilhan et Mahfouf (1996) utilisé dans *SPIROU*, soit de manière numérique. Nous adopterons cette dernière approche dans le simulateur *OSIRIS*, où l'évolution de l'humidité à l'intérieur des matériaux est calculée en utilisant la méthode des différences finies. Néanmoins, dans le cas d'un couvert végétal, nous utiliserons le modèle de Noilhan et Mahfouf (1996). Lorsque de la végétation est présente sur le sol, le flux de chaleur latente s'écrit comme la somme des flux de chaleur provenant du sol nu et de la végétation :

$$L_e = (1 - veg) \cdot L_{e_{sol}} + veg \cdot L_{e_{végétation}} \quad (4.20)$$

Ces flux sont respectivement pondérés par la fraction de surface ($1 - veg$) occupée par le sol nu et par la fraction de surface veg couverte par la végétation.

4.4.4.7. Le modèle de rayonnement solaire spectral

Le rayonnement solaire spectral est calculé en considérant le soleil comme un corps noir à $T_{soleil} = 5814 \text{ K}$ et vu sous un angle solide $W = 6.84 \cdot 10^{-5} \text{ sr}$. L'absorption due à la traversée de l'atmosphère est modélisée à l'aide du code MODTRAN (Kneizys *et al.*, 1996) ; l'orientation de l'objet est prise en compte via sa normale. L'expression du rayonnement solaire spectral s'écrit :

$$L_{soleil}(\mathbf{I}) = c(\mathbf{I}) \Omega L^{bb}(\mathbf{I}, T_{soleil}) [\hat{n} \cdot \hat{n}_s(\mathbf{q}_s, \mathbf{j}_s)] \quad (4.21)$$

où $c(\mathbf{I})$ est le coefficient de transmission spectral donné par le code MODTRAN.

4.4.4.8. Le modèle de rayonnement atmosphérique spectral

Nous avons choisi d'utiliser le modèle de Berger (1988) pour la prédiction du rayonnement atmosphérique spectral. Celui-ci prédit l'émission spectrale de l'atmosphère comme le produit de l'émission par un corps noir à la température de l'air, et d'une émissivité dépendant à la fois de la longueur d'onde, de l'instant de la journée, et de la température de rosée.

Ce modèle prédit le rayonnement atmosphérique spectral par ciel clair avec une précision de quelques watts par mètre carré quelles que soient les conditions météorologiques. Néanmoins, il ne peut être utilisé pour des conditions extrêmes, telles les conditions météorologiques polaires ou tropicales, des paramètres spectraux supplémentaires étant nécessaires à l'amélioration du modèle.

Chapitre 5

Modélisation du paysage

5.1. L'élément

5.1.1. Principales difficultés liées au domaine infrarouge

La problématique de la synthèse d'images dans les courtes longueurs d'onde consiste exclusivement à prédire des flux réfléchis par le paysage (Sillion et Puech, 1994). Ces calculs de flux sont effectués sur des facettes, définies comme des éléments plans de la surface extérieure formant les objets.

Une des différences principales entre la synthèse d'images dans les domaines de l'infrarouge et du visible est la prise en compte de l'évolution temporelle des interactions onde-matière. Les méthodes de synthèse d'images utilisées pour la simulation de paysages dans les courtes longueurs d'onde n'ont pas besoin de reproduire l'historique du paysage. Une approche de type radiosité peut être utilisée dans de tels cas. En infrarouge thermique, cela n'est plus possible, sauf à considérer la méthode de radiosité pour chaque *voxel*, extension 3-D des pixels (contraction de volume et pixel) et pour chaque pas de temps.

A titre d'exemple, considérons une scène inscrite dans un carré de 400 m de coté avec un pas d'échantillonnage de 50 cm. Compte tenu du 3-D, celle-ci comporte environ 700 000 voxels. Une simulation à 12 h requiert une initialisation au lever du soleil le jour précédent, soit une amplitude de 30 h, correspondant à 180 itérations. La prédiction de la température de surface sur un tel exemple nécessite d'effectuer plus de 100 millions de fois le calcul de la température. Une entité permettant de calculer à la fois les températures à chaque instant durant le processus de synthèse et la luminance provenant de la scène permettrait de réduire considérablement le nombre d'opérations.

5.1.2. Définition

L'élément est l'entité sur laquelle va être effectué l'ensemble des calculs nécessaires à la prédiction de la luminance provenant de la scène. Cette entité satisfait aux différentes contraintes inhérentes à la synthèse d'images dans l'infrarouge :

- elle est spatialement localisée,
- le matériau qui la compose est identique en tout point iso-profondeur,
- les conditions aux limites qui règnent sur cette entité sont identiques en tout point ; cela concerne également les conditions aux limites en profondeur (température de couche profonde) et celles qui règnent en surface (bilan des flux).

Afin de réduire le nombre d'éléments composant la scène, et par conséquent le temps de calcul, l'élément est défini comme la plus grande entité satisfaisant aux contraintes précédentes.

5.1.3. Les différentes caractéristiques

5.1.3.1. La dimension spatiale – Le volume de l'élément

L'élément est spatialement localisé ; sa position à l'intérieur de la scène est déterminée par la connaissance de la position des sommets s_k qui le décrivent. Relier les différents sommets permet de construire une ligne polygonale L_s fermée définissant la surface extérieure à l'élément. Le sens de parcours délimite un extérieur (à gauche) et un intérieur (à droite) à l'élément. L'extrusion de cette ligne selon la normale rentrante à L_s sur une longueur donnée définit un volume. La longueur à laquelle nous faisons référence ici sera par la suite appelée profondeur de l'élément. Cette profondeur l_{max} se déduit de la longueur pour laquelle l'évolution journalière du bilan des flux a une influence de moins de 1 % sur la température calculée selon la méthode de Bhumralkar (1975). Celle-ci dépend des paramètres thermiques des matériaux qui constituent l'élément. Deux cas peuvent se présenter :

- l'élément a par sa constitution une épaisseur p_i (mur de bâtiment par exemple) inférieure à l_{max} ; la profondeur qui lui est associée est p_i ,

- l'élément a une profondeur inconnue (sol en terre battue par exemple) ; dans ce cas, la profondeur associée à l'élément est l_{max} .

L'ensemble des informations précédentes permet d'obtenir une entité spatialement localisée et orientée, et de volume fini et connu.

L'élément est géométriquement inclus dans un espace à trois dimensions. En synthèse d'images, la notion de 3-D sert généralement à désigner une ou plusieurs surfaces appartenant à l'espace. Dans le cas de la synthèse dans l'infrarouge thermique, cette ou ces surfaces ont une épaisseur non nulle, ce qui crée ainsi de véritables entités volumiques appartenant à l'espace. Ceci constitue la première différence fondamentale entre la synthèse d'images dans les courtes longueurs d'onde et la synthèse d'images dans l'infrarouge thermique.

5.1.3.2. Le matériau

La caractérisation de l'élément en profondeur est possible grâce à la connaissance, non seulement de l'épaisseur des différentes couches qui constituent le volume de l'élément, mais aussi du type de matériau constituant ces couches. Cette dernière caractéristique constitue un paramètre supplémentaire par rapport à la dimension spatiale (figure 5.1).

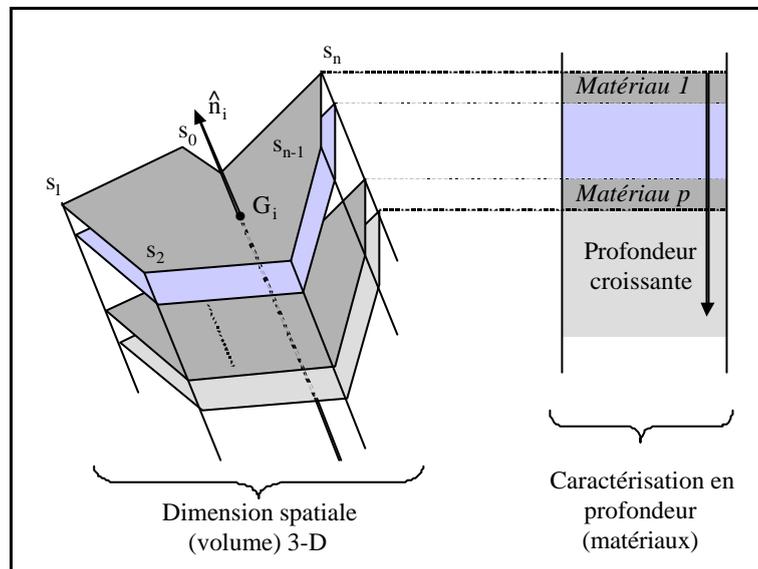


Figure 5.1 : illustration des caractéristiques volumiques et des matériaux de l'élément

L'élément est composé d'une ou plusieurs couches, chaque couche étant constituée d'un même matériau primaire, référencé dans la base de données des matériaux par ind_k . Ces couches sont d'épaisseur variable d_k , et caractérisent l'entité considérée en profondeur (figure 5.2). La description en profondeur de l'élément i est donnée par la connaissance du puplet des couples (*épaisseur, matériau*). Ce p-uplet sera par la suite noté **Comp(i)**, avec :

$$Comp(i) = ((d_1, ind_1), (d_2, ind_2), \dots, (d_k, ind_k), \dots, (d_p, ind_p)) \quad (5.1)$$

De la connaissance des p matériaux qui composent les différentes couches de l'élément, il est possible de récupérer à la fois les caractéristiques thermiques - permettant d'effectuer les calculs de diffusion de la chaleur et de l'humidité - et les caractéristiques thermo-optiques utiles au calcul du bilan des flux à la surface.

5.1.3.3. La dimension temporelle

La résolution numérique de l'équation différentielle de la chaleur nécessite une discrétisation temporelle et le choix d'un pas de temps de calcul adapté à la problématique. Le pas de temps est dépendant de l'évolution des conditions aux limites ; il doit être petit devant ces variations. Dans le cas du calcul de l'évolution de la température de surface d'un paysage, un pas de temps de 10 minutes est correctement adapté (Deardorff, 1978). On peut montrer analytiquement que ce pas de temps est compatible avec une description fine de l'évolution temporelle des phénomènes physiques impliqués, sauf cas très particuliers : bourrasques, bâtiments élevés conjointement avec un soleil bas sur l'horizon... Toute diminution d'un facteur n de ce pas de temps entraînerait l'accroissement du temps de calcul de n à la puissance $3/2$. Bien que les différents processus physiques varient continûment au cours du temps, nous avons choisi d'étudier ces derniers avec le même échantillonnage temporel que celui utilisé pour la résolution de l'équation de la chaleur.

La résolution de l'équation de la chaleur nécessite la connaissance des conditions aux limites $CL_i(i)$ en surface et en profondeur. Pour que la solution de cette équation ait un sens, autrement dit pour que la température prédite soit représentative de la réalité, l'entité doit être la plus homogène possible vis-à-vis des conditions aux limites (figure 5.2).

Afin de limiter le temps de calcul, et conformément aux résultats du chapitre précédent, la température de l'élément est calculée en résolvant l'équation de la chaleur à une dimension. Le profil considéré passe par le centre de gravité et suit la profondeur de l'élément.

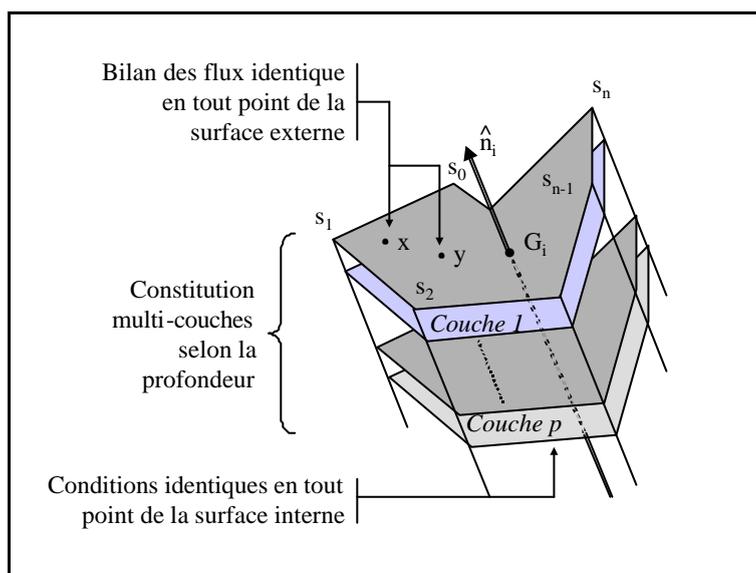


Figure 5.2 : illustration de l'élément : le volume (géométrie 3-D), la constitution en profondeur (matériaux), et la dimension temporelle (1-D)

En deux points distincts x et y de la surface de l'élément, la température est d'autant plus représentative de la réalité que les conditions aux limites en ces points sont similaires.

La condition à la limite extérieure est donnée par la valeur du bilan des flux. Celui-ci est dû à diverses contributions, dont certaines ne dépendent pas de la température de surface. C'est notamment le cas du rayonnement solaire et de la vitesse du vent lors d'une convection forcée. Ces grandeurs peuvent ainsi être déterminées en dehors du processus itératif de prédiction de la température. L'impact de ces contributions peut être quantifié ; en fonction de ce dernier, des règles établies *a priori* permettent de décider de la nécessité de subdiviser à l'instant t une entité homogène jusqu'à l'instant $t-dt$.

La condition à la limite intérieure est généralement donnée par la connaissance de la température interne de l'entité. La nécessité de subdiviser une entité en plusieurs éléments lorsque différentes températures internes sont appliquées est évidente.

5.1.4. Expression de l'élément

5.1.4.1. Paramètres intrinsèques

Par convention, les paramètres qui définissent l'élément sont les suivants :

- paramètres spatiaux : localisation, géométrie, volume et orientation,
- paramètres de profondeur : matériaux constituant les différentes couches,
- paramètres d'évolution temporelle : même bilan des flux (ou de température) en tout point des surfaces extérieure et intérieure de l'élément et ce, à chaque instant.

Ces paramètres sont intrinsèques à l'élément. Ils appartiennent à la structure contenant l'ensemble des informations nécessaires aux calculs de la température et de la luminance et associée à l'élément.

5.1.4.2. Vecteur d'état v_e de l'élément

L'élément est caractérisé par un vecteur d'état v_e qui comprend ses paramètres intrinsèques ainsi que des informations additionnelles (paramètres extérieurs) nécessaires pour effectuer l'ensemble des calculs.

Les flux convectifs dépendent, pour chaque élément, de la vitesse du vent à la surface de l'élément ainsi que son bilan hydrique (paramètres intrinsèques). Il était prévu d'utiliser un logiciel extérieur (<http://www.fluent.com> ; Baléo et Lecointe, 1995) pour effectuer les calculs d'écoulement du vent dans le paysage, et d'obtenir ainsi les vitesses de vent pour chacun des éléments. Compte tenu des difficultés d'interfaçage entre ce logiciel et les outils de prédiction de température et de luminance, la vitesse du vent U n'a pas été prise en compte en tant que paramètre intrinsèque. Toutefois, elle pourra l'être en tant que paramètre extérieur, en la supposant constante sur la surface de l'élément.

Le calcul des flux radiatifs à la surface de chaque élément dépend de l'environnement radiatif de l'élément. Cet environnement, Env , est constitué de l'ensemble des éléments voisins ayant un impact sur le bilan des flux. Ces voisins peuvent être en visibilité directe de l'élément considéré, mais peuvent également influencer sur le bilan des flux par le biais de réflexions multiples. La détermination des voisins influents, et de fait de l'environnement de l'élément, s'appuie sur des considérations énergétiques. Le vecteur d'état associé à l'élément comprend l'identification de l'ensemble de tous ses voisins en visibilité directe (ordre 1), Env_R . Les voisins d'ordre supérieur sont connus par transitivité.

Bien que nous ayons montré dans le chapitre précédent que les échanges de chaleur par conduction entre les éléments étaient minimes et pourraient être négligés, nous prévoyons néanmoins la possibilité que ces échanges puissent exister entre un élément et ses voisins. Ces échanges ont lieu lorsque deux éléments sont en contact. L'environnement conductif, Env_C , d'un élément i permet d'identifier ces voisins ; ceux-ci ont une frontière commune avec l'élément i .

La résolution des équations de la chaleur et du bilan hydrique impose de connaître les vecteurs température, $Temp$, et état hydrique, $Humid$, suivant la profondeur de l'élément. La taille de ces vecteurs dépend de la composition de l'objet, des différentes couches qui le constituent, de leurs épaisseurs respectives, ainsi que du pas de temps choisi pour la résolution des équations différentielles.

Cette même résolution pour un élément donné à l'instant $t+dt$, impose la connaissance du bilan des flux à la surface de chaque élément. La solution doit être indépendante de l'ordre dans lequel les éléments sont traités. Nous avons choisi de calculer le bilan des flux à la surface de chaque élément (cf. équation 3.35) à l'aide de la connaissance des températures de surface T_s de tous les voisins à l'instant t . Cette information est contenue dans le vecteur d'état de l'élément.

Ce vecteur d'état \mathbf{v}_e de l'élément est illustré en figure 5.3. Il contient l'ensemble des informations utiles aux calculs de température et de luminance. La représentation du paysage sous forme d'éléments est obtenue par pré-traitements ; elle sera présentée dans la seconde partie de ce chapitre. Les pré-traitements font l'objet d'un module spécifique du simulateur *OSIRIS* et seront décrits dans le chapitre suivant.

Paramètres intrinsèques	$L_s(i)$	s_1 s_2 . . s_n	Paramètres donnant accès à la localisation spatiale de l'élément, à sa géométrie ainsi qu'à son orientation
	$Comp(i)$	(d_1, ind_1) (d_2, ind_2) . . (d_p, ind_p)	Description de l'élément en profondeur ; épaisseur et matériau
	$CL_t(i)$	$CL_{h-kDt}(i)$. . $CL_{h-Dt}(i)$ $CL_h(i)$	Paramètres relatifs aux conditions aux limites indépendantes de la température à chaque itération
Paramètres extérieurs	$U(i)$		Vitesse de vent efficace
	$Env(i)$	$Env_R(i)$ $Env_C(i)$	Environnement de l'élément ; au sens radiatif (Env_R) et conductif (Env_C)
	$Temp(i)$		Description de la température de l'élément en fonction de la profondeur
	$Humid(i)$		Description de l'humidité de l'élément en fonction de la profondeur
	$T_s(i)$		Température de surface de l'élément à l'itération précédente

Figure 5.3 : description des composantes intrinsèques et extérieures du vecteur d'état $\mathbf{v}_e(i)$ associé à un élément i

5.2. Modélisation du paysage

Dans les chapitres suivants, les objets sont définis par des équations mathématiques ; ils sont toujours représentés avec une précision infinie. Ces objets peuvent être des lignes, des courbes ou tout type de formes avec différents attributs, tels leur couleur, leur matière, ou leur apparence par exemple. Deux approches existent pour modéliser un objet : l'approche raster et l'approche vectorielle.

5.2.1. *Les approches raster et vecteur*

5.2.1.1. *L'image raster*

Les images au format « *raster* » (ou *bitmap*) sont formées par un ensemble de pixels dans une grille (Norme ISO 4.07, 1999). Un objet est ainsi décrit par un ou plusieurs pixels, chaque pixel étant indivisible.

L'image raster est fonction de la résolution ; cela signifie que la qualité de la description des objets dépend du nombre de pixels (de taille fixée) de l'image. Lors d'un changement de taille de l'image (augmentation ou diminution), la qualité de la description est modifiée. Les intensités lumineuses des nouveaux pixels sont généralement obtenues par interpolation, ce qui affecte également la qualité de l'image.

De manière générale, le nombre de pixels composant une image se déduit du rapport entre la surface de l'image et la surface du pixel. Cette définition possède l'avantage de pouvoir s'étendre à la modélisation 3-D d'une scène, en définissant le nombre de voxels qui composent la scène de manière identique à la définition du nombre de pixels.

5.2.1.2. *L'approche vecteur*

Les représentations de scène au format « *vecteur* », ou par abus de langage les « *images vectorielles* », sont constituées par juxtaposition d'objets mathématiques indépendants (Norme ISO 4.10, 1999). Ces représentations ne dépendent pas de la résolution et leur qualité n'est pas affectée par un changement de taille.

Ces représentations vectorielles possèdent de nombreux avantages : indépendance vis à vis de la résolution, gestion aisée des objets qui la composent... Cependant, un des inconvénients majeurs est qu'elles sont inadaptées pour produire des images photo-réalistes. Généralement constituées par des surfaces ou des volumes d'intensité lumineuse constante, ou des gradients d'intensité entre des entités voisines, elles ne peuvent représenter les nuances subtiles, le grain et le dégradé continu observé sur des photographies réelles.

Néanmoins, l'utilisation de l'approche vectorielle dans la gestion des scènes, notamment la gestion des scènes tridimensionnelles, devient de plus en plus coutumière. Aujourd'hui, des outils existent, permettant d'appliquer une texture fournie par une image raster à une représentation vectorielle, lui conférant ainsi cette apparence photo-réaliste, quoique peu précise d'un point de vue radiométrique sauf traitement particulier.

5.2.2. *Contraintes de la synthèse*

La synthèse d'images à deux dimensions, ou la synthèse de scènes à 3-D, consiste à simuler une image ou une scène en luminance à partir de la connaissance d'un modèle géométrique de la scène, des matériaux qui la compose et de la connaissance de l'ensemble des processus physiques qui contribuent au signal (*cf.* chapitre 4). Cela impose d'effectuer de multiples traitements sur chacune des entités composant la scène, qui sont généralement des polyèdres ou des unions de polyèdres.

Le temps de calcul permettant d'obtenir la scène par synthèse est dépendant du nombre d'entités N qui composent cette scène. Sur chacune d'elle, les traitements sont complexes, et leur nombre est imposé par la précision de la modélisation de l'ensemble des phénomènes physiques qui agissent sur ces entités. Le nombre N à considérer a ainsi une importance capitale pour la synthèse et a tout intérêt à être minimisé, du point de vue de la puissance et du temps de calcul. Ce nombre N doit également être mis en relation avec la précision radiométrique souhaitée, c'est-à-dire l'écart que l'utilisateur autorise entre simulation et réalité.

Considérant une scène représentée en voxels, une minimisation de N s’effectue en regroupant des voxels de propriétés identiques entre eux ; ces propriétés concernent l’ensemble des paramètres qui caractérisent le voxel et ont une influence sur la scène simulée (orientation, matériau constituant, bilan de flux...). Ces regroupements peuvent être effectués par segmentation et classification des voxels. Les inconvénients majeurs d’une telle méthode pour la synthèse de scènes sont de devoir gérer un grand nombre de voxels, ainsi que des entités dépendant de l’échelle à laquelle la scène est considérée.

Une autre approche consiste à adopter une représentation vectorielle de la scène. Celle-ci traduit l’ensemble des contraintes inhérentes à la scène : sa constitution (géométrie et matériaux constitutants) ainsi que la possibilité d’effectuer l’ensemble des traitements donnant accès au signal. Elle permet également un traitement aisé et précis des transitions fortes, indépendantes de l’échelle à laquelle la scène simulée est vue.

La prise en compte de ces différents critères et propriétés, relatifs à la synthèse et au mode de représentation de la scène, nous a incité à opter pour une représentation vectorielle de la scène pour effectuer la synthèse de paysages.

Dans la suite de cette thèse, la nomenclature adoptée est la suivante :

- une *entité* : terme générique, désignant suivant le contexte, des quantités vectorielles ou raster, 2-D ou 3-D, basées sur une définition mathématique ou pixel (ou voxel),
- un *élément* : la plus petite des entités 3-D sur laquelle vont s’appuyer l’ensemble des calculs et traitements nécessaires pour effectuer la synthèse (cf. partie 5.1),
- une *facette* : une entité 2-D, de forme polyédrique, support géométrique d’un ou plusieurs éléments ; cette entité est analogue à la facette telle que définie par les simulateurs d’images dans les courtes longueurs d’ondes,
- un *objet* : une entité mathématique, 2-D ou 3-D, de forme polyédrique, constitué d’un groupement de plusieurs facettes et des informations 3-D associées, ou d’un regroupement de plusieurs éléments.

5.2.3. Modélisation du paysage

Le paysage est constitué de différents objets (définition sémantique) tels que des maisons, des arbres, des routes, des étendues d’eau... Nous avons opté pour la modélisation suivante (figure 5.4) pour représenter conceptuellement un paysage.

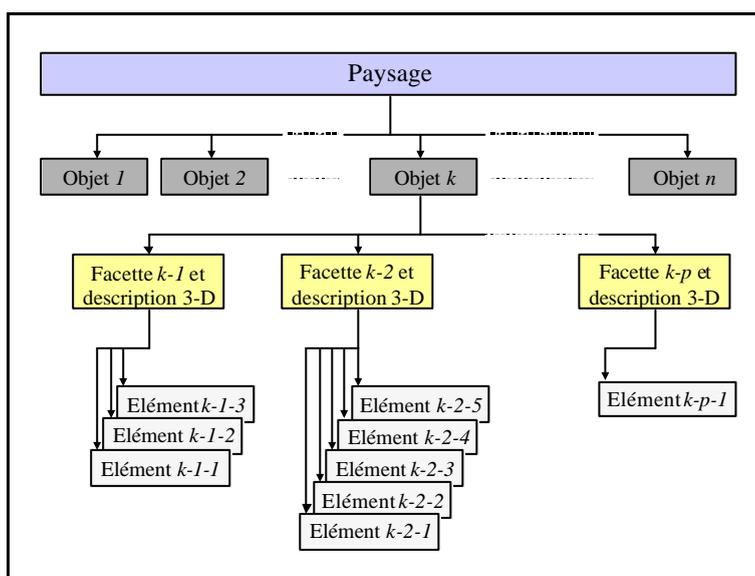


Figure 5.4 : illustration de la modélisation hiérarchique du paysage en objets, facettes, éléments

Ces objets possèdent des propriétés propres, tel leur emplacement dans la scène ou leur température interne par exemple. Ils possèdent également des propriétés d'environnement, inhérentes à leur localisation et agencement dans le paysage. D'un point de vue géométrique, un objet k est constitué de p facettes. Une facette géométrique k - p sert de support à la surface extérieure des éléments.

Pour simplifier considérablement les algorithmes de traitement géométrique, nous avons choisi tout au long de l'étude de travailler avec des facettes et éléments de surface triangulaire. La contrepartie de cette décision est la gestion d'un nombre non minimal d'éléments pour représenter le paysage.

5.2.4. Obtention du modèle

5.2.4.1. Paysage, objets et facettes

Nous n'avons pas cherché à automatiser la modélisation du paysage, cette étape ne présentant qu'un faible intérêt vis-à-vis de l'objet de la thèse. La modélisation est pour l'instant effectuée et fournie par l'utilisateur. Le modèle 3-D du paysage est donné au format VRML (VRML⁹⁷, 1997) ; un fichier texte fait le lien entre les facettes qui composent le paysage et les matériaux qui constituent ces facettes. Lors de l'industrialisation de l'outil par Alcatel, cette partie du simulateur *OSIRIS* sera développée. Une modélisation du paysage au sens d'un Système d'Information Géographique (Laurini *et al.*, 1992 ; Maguire *et al.*, 1991) contenant à la fois le modèle 3D et les informations sémantiques associées, permettrait à l'utilisateur une utilisation plus conviviale du simulateur.

5.2.4.2. Eléments

Modélisation du volume et des matériaux

A partir de la modélisation géométrique 3-D du paysage, de la connaissance des matériaux constituant les facettes, ainsi que du pas de temps de calcul (paramètres de la simulation), il est possible de déterminer :

- le volume de l'entité intermédiaire donnant naissance aux éléments,
- la longueur des composantes température et humidité pour un matériau donné.

Le maillage selon la profondeur de l'élément, nécessaire à la résolution des équations de diffusion (température et humidité) est effectué en respectant le critère de convergence donné par l'équation 3.51. Dans le cas où l'épaisseur d_k du matériau est trop petite par rapport au pas de temps choisi, l'équation n'est pas satisfaite. Deux solutions s'offrent à l'utilisateur :

- diminuer le pas de temps de calcul, ce qui engendrera un temps de simulation plus long,
- générer un matériau hybride entre les couches k et $k+1$.

Ce matériau aurait les caractéristiques thermiques moyennes des matériaux ind_k et ind_{k+1} , soit une capacité calorifique c_{c-eq} et une conductivité thermique c_{t-eq} définies par :

$$c_{c-eq} = c_{c-k} + c_{c-k+1} \quad (5.2)$$

$$c_{t-eq} = c_{t-k} c_{t-k+1} \frac{d_k + d_{k+1}}{d_k c_{t-k+1} + d_{k+1} c_{t-k}} \quad (5.3)$$

Dans le cas où ce matériau serait en surface ($k=1$ dans les équations précédentes), les paramètres optiques, convectifs et les paramètres liés à l'humidité seraient ceux du matériau de surface.

La modélisation ainsi obtenue permet d'effectuer des calculs de température et de luminance ; cependant, elle ne satisfait pas aux critères d'homogénéité de l'élément vis-à-vis de l'évolution temporelle des conditions aux limites. Elle donne naissance à un maillage initial support des éléments, qui va être utilisé comme référence lors du maillage selon les discontinuités des phénomènes physiques.

Modélisation de l'évolution temporelle

L'évolution temporelle des phénomènes physiques est prise en compte lors de la dernière étape de génération des éléments. Les régions de conditions aux limites identiques scindent la scène en un certain nombre de zones homogènes, séparées par une frontière. Ces frontières déterminent les contraintes à appliquer au maillage de référence, afin d'obtenir un nouveau maillage, correspondant à la modélisation en éléments.

Pour des raisons pratiques, de temps de calcul et d'algorithmique, les mailles considérées sont triangulaires ; la définition d'un maillage satisfaisant un ensemble de contraintes se ramène alors à de la triangulation sous contraintes. Celle-ci peut être effectuée à l'aide de logiciels tels *CGAL* (Boissonnat *et al.*, 2002), ou *Triangle* (Shewchuck, 1996 ; Shewchuck, 2002) par exemple.

5.2.5. Obtention du maillage

La contrainte la plus forte de jour est le respect précis des ombres solaires que les objets se font entre eux. Cette contrainte va être utilisée ici pour illustrer la création du maillage sur lequel s'appuie la représentation de la scène en éléments.

Le maillage initial M_i est utilisé pour déterminer l'ensemble des facettes géométriques à l'ombre uniquement du fait de leur orientation. Ce sous-ensemble de facettes de M_i , associé à la direction d'éclairage solaire, constitue l'ensemble des cônes de contraintes définissant par projection sur la scène selon la direction d'éclairage, l'ensemble des régions à l'ombre. L'intersection de ces cônes avec la scène est un ensemble de lignes polygonales continues et fermées L_c (figure 5.5).

Une facette de M_i homogène à l'instant t ne l'est plus nécessairement à l'instant $t+dt$, du fait des deux régions « à l'ombre » et « au soleil » à sa surface. Un découpage en régions homogènes vis à vis de l'éclairage solaire crée le nouveau maillage M_n . Les contraintes sont représentées par l'ensemble des segments de L_c . Une triangulation 2-D sous contraintes est effectuée sur chacune des facettes initiales pour obtenir un maillage en régions homogènes. Le maillage de l'intégralité du paysage à l'instant t est obtenu en considérant successivement chacune des entités non directement à l'ombre.

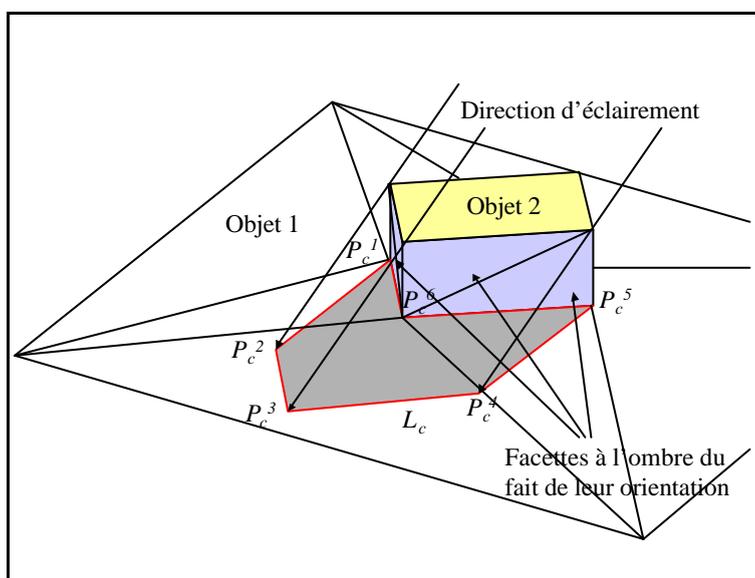


Figure 5.5 : illustration de l'obtention de la contrainte L_c

Le maillage global, sur toute la durée du processus de synthèse, est obtenu en appliquant cette procédure à chaque pas de temps (figure 5.6). La procédure précédemment décrite est appliquée de façon anti-chronologique, en partant de l'heure de simulation h_s , jusqu'à un instant $h_s - Dh$ à déterminer. Cet instant est fonction des caractéristiques thermo-optiques du matériau et du temps de latence

nécessaire au retour à une situation nominale faisant suite à une perturbation de bilan de flux. En pratique, il se situe en moyenne 3 à 4 heures avant l'heure de simulation h_s .

Pour des besoins de précision souhaitée pour les simulations, le pas d'échantillonnage temporel utile à la simulation des ombres portées n'est pas linéaire, par opposition au pas de temps utilisé pour résoudre les équations de diffusion. Il augmente avec le laps de temps Dh séparant l'instant de calcul de l'heure de la simulation. Dans le même temps, la précision spatiale souhaitée pour effectuer le maillage est relâchée (cf. paragraphe 5.2.5.1). En s'intéressant à l'erreur commise sur les simulations, et par itérations successives, nous avons opté pour une relaxation des contraintes effectuée comme suit :

- à l'instant de la simulation h_s , les ombres portées sont modélisées avec une précision infinie (pas de relaxation géométrique),
- durant la demi-heure qui précède h_s , les contraintes sont relâchées pour autoriser une erreur équivalente inférieure au pixel,
- les contraintes sont progressivement relâchées jusqu'à $h_s - Dh$, en autorisant un maximum équivalent à quelques pixels d'erreur.

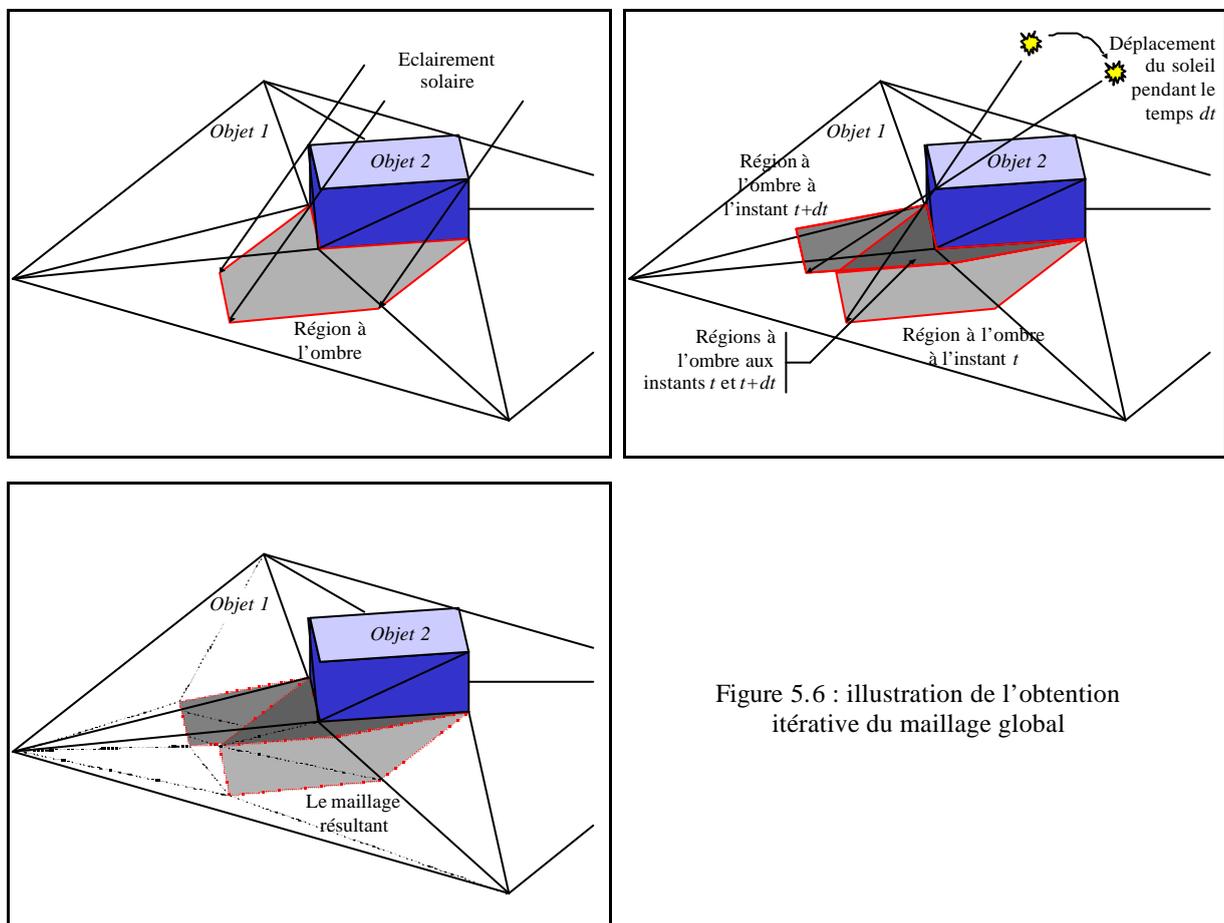


Figure 5.6 : illustration de l'obtention itérative du maillage global

En deçà de cet instant, il n'est plus utile, compte tenu de la réponse des matériaux en température, de prendre en compte l'influence des ombres dans la modélisation du paysage, et par suite dans la création du maillage support des éléments.

5.2.5.1. Critères de relaxation de la précision spatiale

Ces critères sont tous basés sur des considérations physiques, et agissent sur des paramètres métriques du maillage. Le but du simulateur *OSIRIS* est de pouvoir simuler une image à une résolution spatiale

de l'ordre de 50 cm (taille du pixel pour une prise de vue simulée au nadir). La gestion d'entités dont la taille caractéristique est très inférieure à 50 cm n'est pas utile ; ces entités n'auraient qu'un faible impact sur l'image finale. L'intérêt d'éviter de manipuler des entités trop petites, et par voie de conséquence un nombre d'entités trop élevé, est de diminuer les temps de calcul.

Le simulateur *OSIRIS* permet à l'utilisateur, à chaque itération:

- de créer des entités géométriques de taille minimale,
- de toujours maîtriser les approximations effectuées lors des triangulations successives.

Gestion des entités géométriques de petite taille

La taille d'une entité géométrique triangulaire, qu'il s'agisse d'une facette ou d'un élément, peut être empiriquement caractérisée par deux paramètres :

- la longueur l_{max}^i du plus grand de ses cotés,
- sa surface S .

Le simulateur *OSIRIS* prévoit que l'utilisateur puisse définir une surface minimale S_{min} ainsi qu'une longueur minimale l_{min} pour lesquelles chaque entité sera considérée. Toutefois, la relation suivante entre l_{min} et S_{min} devra toujours être vérifiée :

$$\sqrt{3} l_{min}^2 \geq 4 S_{min} \quad (5.4)$$

l'égalité étant obtenue quand le triangle est équilatéral.

A un instant t donné, lors de la création du maillage servant de support aux éléments, une entité peut être générée avec une surface inférieure à S_{min} et la longueur du plus grand de ses cotés inférieure à l_{min} . Dans ce cas, cette entité sera à l'itération suivante considérée comme homogène et indivisible. Une entité i avec les caractéristiques suivantes:

- $l_{max}^i < l_{min}$,
- $S < S_{min}$,

sera toujours considérée comme indivisible.

Gestion des contraintes de longueur trop petite

Certains cas peuvent se produire où les contraintes qui s'appliquent sur le maillage ont une longueur inférieure à la précision souhaitée. Ceci intervient notamment lors de la projection des segments définissant une facette géométrique sur une autre (prise en compte des ombres solaires). Lorsque l'angle séparant un de ces segments de la génératrice (direction d'éclairage) est de l'ordre de quelques degrés, certains nœuds P_c de l'ensemble des contraintes définissant la ligne de contraintes sont relativement proches (figure 5.7).

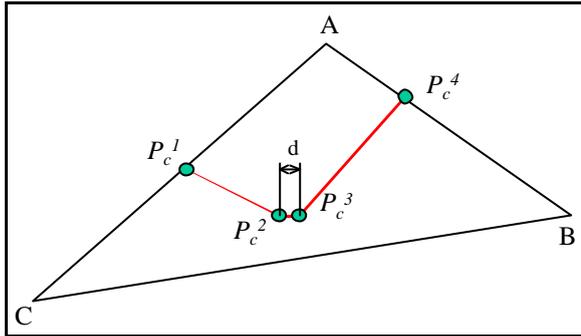


Figure 5.7a : nœuds de la contrainte L_c séparés d'une distance d petite devant la précision souhaitée pour la triangulation résultante

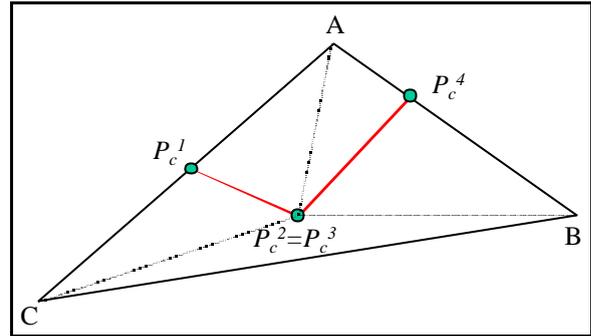


Figure 5.7b : résultat de la déformation de la contrainte ; remplacement des nœuds P_c^2 et P_c^3 par leur barycentre

Figure 5.7 : illustration de la relaxation d'une contrainte de longueur trop petite

Lorsque la distance séparant les nœuds P_c^i et P_c^{i+1} est inférieure à une distance minimale d_{min} fixée par l'utilisateur, les points impliqués sont remplacés par leur barycentre.

Gestion des triangles d'angle(s) trop aigu(s)

La figure 5.8 illustre deux cas où les entités issues de la triangulation posséderaient des angles trop aigus.

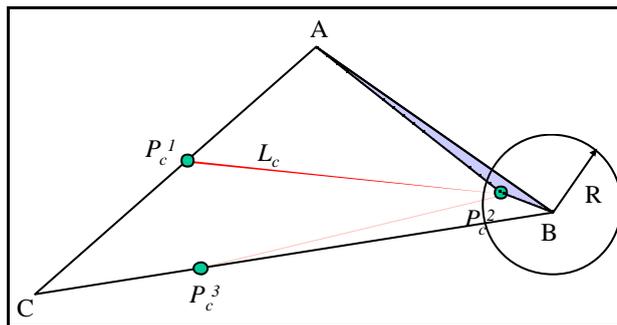


Figure 5.8a : un des nœuds de la contrainte est proche d'un des sommets du triangle initial.

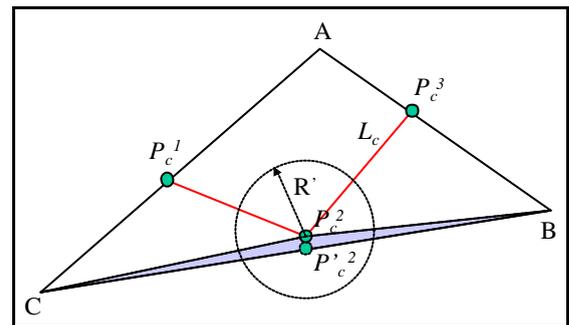


Figure 5.8b : un des nœuds de la contrainte est proche d'un des cotés du triangle initial.

Figure 5.8 : illustration de la gestion des triangles d'angle(s) trop aigu(s)

Ce cas se produit lorsque au moins un des points P_c est proche du triangle initial :

- un nœud P_c^i de la contrainte L_c est à une distance d'un sommet du triangle initial inférieure à une norme R fixée par l'utilisateur ; ce nœud P_c^i de la contrainte est déplacé pour être confondu avec le sommet impliqué du triangle (figure 5.8a),
- un nœud P_c^i de la contrainte L_c est proche d'un des segments du triangle initial (figure 5.8b). Quand la distance R' séparant le nœud P_c^i de sa projection orthogonale $P_c'^i$ sur le segment impliqué est inférieure à une norme fixée par l'utilisateur, le nœud de la contrainte est confondu avec $P_c'^i$.

En pratique, on a choisi de travailler avec $R=R'$.

5.2.5.2. Algorithme utilisé pour la gestion des contraintes de relaxation spatiale

La figure 5.9 présente l'algorithmique utilisée pour la gestion des contraintes. Les paramètres relatifs à l'entité géométrique sont traités en priorité ; les paramètres liés aux contraintes sont examinés dans un second temps, s'il y a lieu.

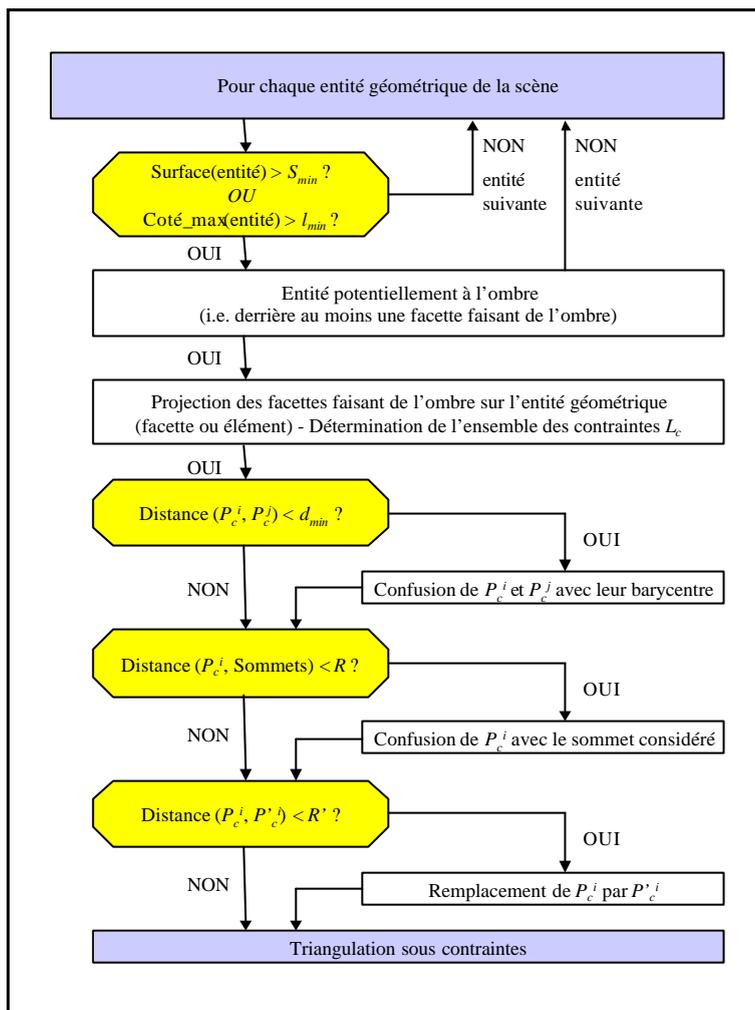


Figure 5.9 : algorithme utilisé pour la gestion des contraintes

Lors d’une telle procédure de relaxation des contraintes, il est nécessaire de régler dans un premier temps le cas des contraintes de longueurs trop petites. En effet, certains cas existent où ces contraintes ne peuvent être supprimées. Ces cas correspondent à des contraintes dont la longueur est inférieure à d_{min} , mais où les nœuds P_c^i et P_c^j qui définissent cette contrainte sont sur des segments du triangle.

Ensuite, la distance séparant chacun des nœuds P_c^i de la contrainte des sommets A, B , et C du triangle est testée ; le dernier critère examiné est celui concernant la distance entre la projection P_c^i de P_c^i sur les trois côtés du triangle.

5.2.5.3. Critères de relaxation de la précision spatio-temporelle

Les critères de relaxation de précision spatiale lors de la création de l’élément ne sauraient être appliqués sans considérer l’aspect temporel. A amplitude identique, un phénomène physique est d’autant plus influent qu’il se produit peu de temps avant l’instant souhaité pour la simulation. L’approximation obtenue en relâchant la précision spatiale sur les contraintes, conduit à un maillage qui n’a en tant que tel aucun sens. Cette approximation doit toujours être mise en rapport avec :

- l’instant de la simulation h_s ,
- la période Dt durant laquelle l’approximation est faite,
- le laps de temps Dh séparant la fin de cette période de h_s ,
- l’amplitude de la perturbation p .

Effectuer une approximation du maillage support des éléments revient à effectuer une approximation du bilan des flux. Au niveau d’une maille, cela revient à associer à une surface S_e , définie comme la

différence entre l'approximation et la vérité, un flux qui lui est incorrect. Cette approximation ne doit pas conduire à commettre une erreur significative sur la prédiction de la température. Il est nécessaire de respecter la condition :

$$f(S_e, h_s, \Delta h, \Delta t, p) \geq V_{seuil} \quad (5.5)$$

où f est une fonction et V_{seuil} un paramètre énergétique traduisant la validité des approximations.

Il serait utile de pouvoir déterminer cette fonction f et cette valeur seuil sans avoir à connaître l'amplitude de la perturbation. Néanmoins en pratique, du fait des fortes dépendances de f aux conditions de la simulation et au matériau constituant l'objet, nous sommes dans l'impossibilité de définir une fonction générique. Nous nous contentons d'employer une approche directe qui consiste à relâcher les contraintes tant que l'impact sur la simulation reste minime.

5.2.5.4. Exemple d'obtention de maillage - Application au sous-ensemble "ombre" des conditions aux limites

Un exemple de scène 3D est illustré par la figure 5.10. Cette scène fictive est composée de 3 bâtiments, et d'un sol plan. La simulation est sous les conditions suivantes :

- lieu : Amiens, France, latitude de 49.54 N, longitude de 2.18 E et altitude de 100 m,
- date : le 12 mars 2002,
- calcul des ombres portées à 12, 14 et 16 heures.

Ces heures de calcul des ombres portées utiles à la modélisation de la scène en éléments ont été choisies pour leur adaptation à une illustration visuelle ; le maillage résultant n'a pas été utilisé pour effectuer de simulation de température et de luminance.

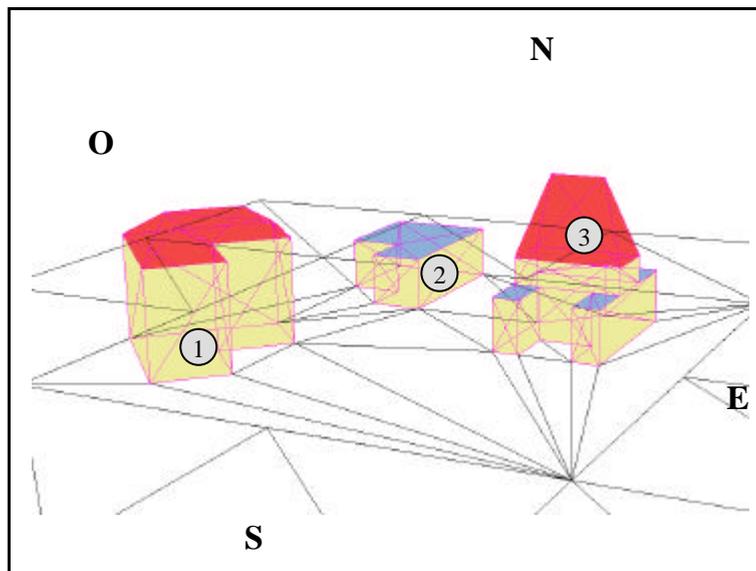


Figure 5.10 : illustration du modèle 3D ayant servi à tester la génération du maillage ; modélisation en objets et facettes

La figure 5.11 montre le maillage obtenu par projection des ombres à 16 h. Sur les figures 5.11 à 5.13, les bâtiments en 3-D ont été supprimés afin de simplifier la visualisation ; seules les empreintes de ces bâtiments sur le sol (en grisé) ont été conservées.

Sur chacune de ces figures, le nord est à gauche, le sud à droite.

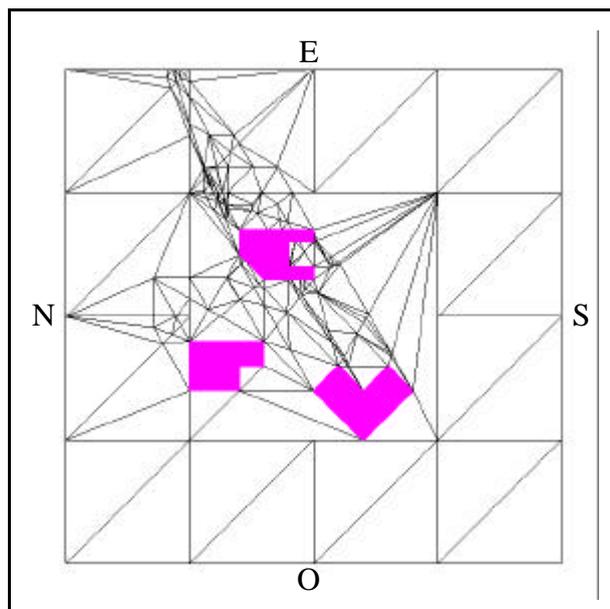


Figure 5.11 : maillage selon les ombres portées à 16 h ; précision infinie

La figure 5.12 montre les maillages obtenus à 14 h et à 12 h, sur-imprimés sur celui de 16 h. Pour obtenir ces maillages, aucune contrainte de relaxation de la précision spatiale n'a été appliquée ; le nombre de mailles obtenu est maximal. Le mode de représentation vectoriel choisi pour modéliser le paysage, associé au maillage selon les discontinuités, conduit à gérer un nombre important de mailles de petite taille, en ce qui concerne la surface ou la longueur du plus petit des cotés d'une maille. On peut notamment l'observer sur la figure 5.12 dans l'angle nord-est du bâtiment 3, et au pied de la façade nord-ouest de ce même bâtiment 3 sur la figure 5.12b.

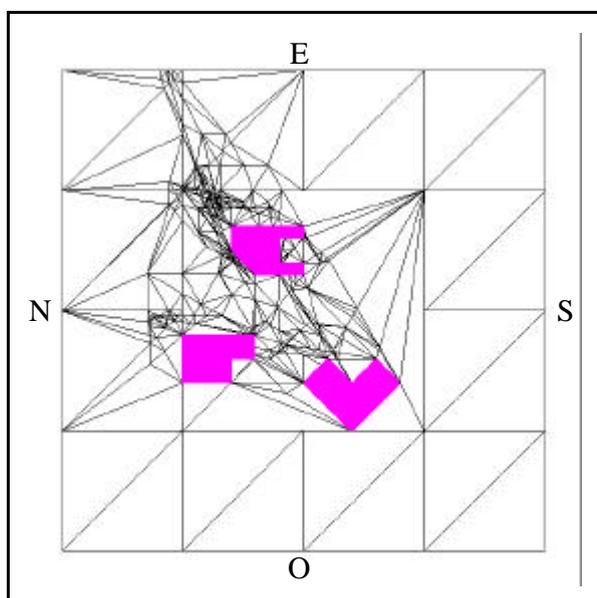


Figure 5.12a : maillage selon les ombres portées à 16 h et 14 h

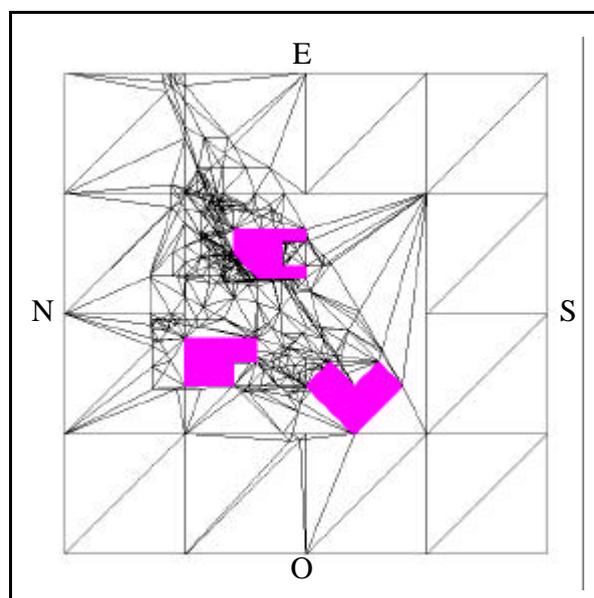


Figure 5.12b : maillage selon les ombres portées à 16 h, 14 h et 12 h

Figure 5.12 : maillages selon les ombres portées dans le cas d'une précision infinie

Nous avons calculé l'évolution du nombre de mailles dû à la projection des ombres en fonction de l'heure et de la précision spatiale souhaitée. A l'origine, la scène 3-D est composée de 126 mailles géométriques. Dans le cas où la précision souhaitée sur la géométrie est infinie, à savoir en l'absence

de relaxation de n'importe quelle contrainte, le nombre de mailles croît de façon assez importante, pour atteindre plus de 15 fois le nombre de mailles d'origine, et ce après trois itérations. Les résultats concernant l'évolution du nombre de mailles dans la scène sont regroupés dans le tableau 5.1.

	16 heures	14 heures	12 heures
Contraintes ($R, d_{min}, l_{min}, S_{min}$)	(0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0)
Nombre de mailles	484	1018	2049
Accroissement (<i>précédent / origine</i>)	(3.8 / 3.8)	(2.1 / 8.1)	(2.0 / 16.3)

Tableau 5.1 : variation et accroissement du nombre de mailles utiles à la gestion du paysage en fonction des contraintes d'ombre solaire et des critères de relaxation appliqués à 16 h, 14 h et 12 h. L'accroissement (*précédent / origine*) traduit les rapports entre, d'une part, le nombre de mailles à l'itération considérée et le nombre de mailles à l'itération précédente, et d'autre part, le nombre de mailles à l'itération considérée et le nombre de mailles (facettes) initiales

La figure 5.13 est l'analogue de la figure 5.12, le maillage généré résultant de l'application des contraintes. Le tableau 5.2 précise ces contraintes, ainsi que la variation du nombre de mailles qui décrivent la scène. Dans ce cas, le nombre de mailles croît de façon nettement moins importante que dans le premier cas. Au bout des 3 itérations, un facteur 1.5 a ainsi pu être gagné sur le nombre de mailles générées.

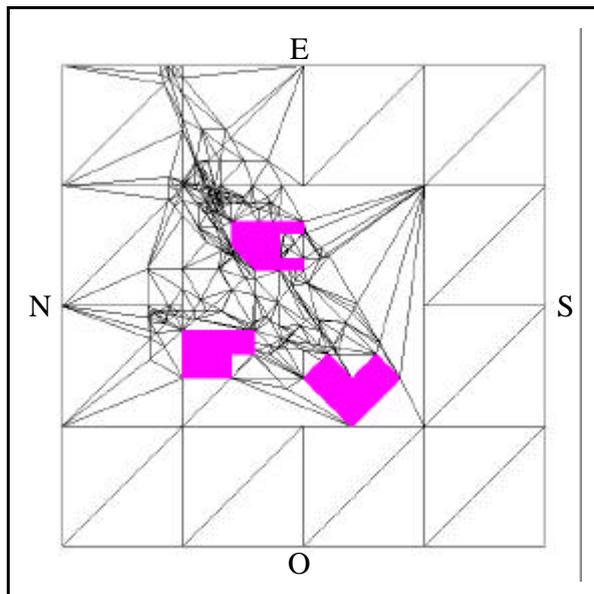


Figure 5.13a : maillage selon les ombres portées à 16 h et 14 h.

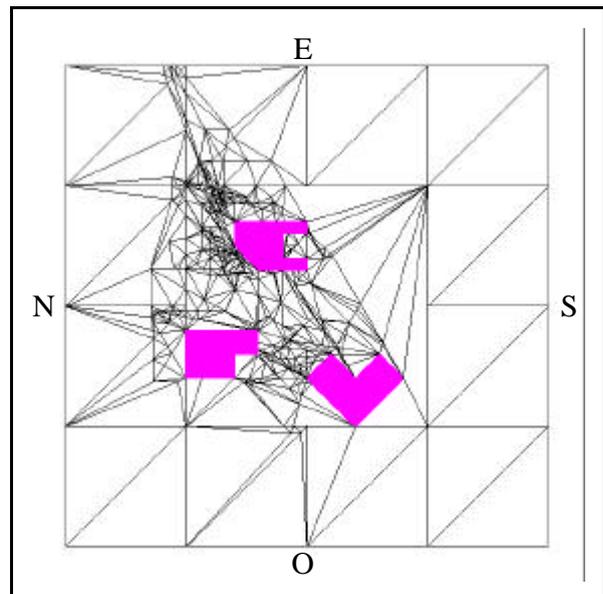


Figure 5.13b : maillage selon les ombres portées à 16 h, 14 h et 12 h.

Figure 5.13 : maillages selon les ombres portées dans le cas d'une précision fixée

En pratique, compte tenu des intervalles de temps séparant deux projections d'ombre successives, la distance entre les segments projetés est généralement petite. Ceci a pour effet de rendre davantage pertinente la gestion de l'ensemble des contraintes, un nombre important de nœuds et de segments pouvant être confondus et remplacés par des nœuds et des segments déjà existants, sans toutefois porter préjudice à la qualité de la simulation.

	16 heures	14 heures	12 heures
Contraintes ($R, d_{min}, l_{min}, S_{min}$)	(0, 0, 0, 0)	(1.0, 0, 2.0, 2.0)	(5.0, 0, 10.0, 40.0)
Nombre de mailles	484	926	1195
Accroissement (précédent / origine)	(3.8 / 3.8)	(1.9 / 7.3)	(1.3 / 9.5)

Tableau 5.2 : variation du nombre de mailles utiles à la gestion du paysage en fonction des contraintes d'ombre solaire et des critères de relaxation appliqués à 16 h, 14 h et 12 h. L'accroissement est défini au tableau 5.1

5.3. Conclusion

Nous avons défini le concept d'*élément* pour prendre en compte l'évolution temporelle des interactions onde-matière. Les éléments sont les entités sur lesquelles vont être effectués les calculs utiles à la génération d'une image par synthèse dans l'infrarouge thermique : calcul de température de surface et de luminance spectrale. La modélisation du paysage en éléments a également été présentée. L'élément est défini par :

- sa position dans le paysage, sa géométrie et le volume qu'il occupe,
- la connaissance des matériaux qui constituent les différentes couches qui le composent,
- des caractéristiques énergétiques identiques en tout point de sa surface (bilan des flux) et de la couche profonde (température interne).

Dans un second temps, nous avons présenté l'obtention pratique des éléments. L'extension tridimensionnelle de la facette à l'élément est déterminée à partir de la connaissance des informations relatives aux matériaux constituant l'objet. Ensuite, le maillage support des éléments est obtenu en respectant les différences de bilan de flux engendrées par les variations spatiales et temporelles de l'ensemble des phénomènes physiques prépondérants (ombre et influence de la vitesse du vent). L'homogénéité de la couche profonde est également prise en compte pour former ce maillage.

L'approche originale de la radiosité, développée pour le domaine visible et présentée au chapitre 3, ne prend pas en compte le fait que le bilan des flux, ou plus exactement le rayonnement net incident, soit identique sur toute la surface de la facette. Dans le domaine des courtes longueurs d'onde, les considérations énergétiques liées au rayonnement solaire sont similaires à celles existant dans le domaine infrarouge. L'hypothèse consistant à supposer constante la radiosité sur la surface du patch ou de l'élément (*cf.* chapitre 3) n'est généralement pas satisfaite (Tampieri et Lischinski, 1991). La nécessité de gérer des facettes homogènes vis à vis des flux incidents est également apparue pour obtenir des résultats davantage réalistes. Le paysage étudié est représenté par un ensemble de facettes satisfaisant cette contrainte de rayonnement net identique à la surface d'une facette. Cette représentation est obtenue par la méthode du "*Discontinuity Meshing*" (DM), ou maillage selon les discontinuités. Elle a été introduite notamment par Lischinski *et al.* (1992) ainsi que par Heckbert (1992).

Lischinski *et al.* (1992) proposent de décomposer les discontinuités pouvant se produire sur une facette de la scène en 3 catégories :

- les discontinuités d'ordre 0 sont celles introduites lorsque les côtés ou les sommets du masque touchent la facette. Dans ce cas, la transition entre les deux zones définies par le masque est discontinue,
- les discontinuités d'ordre 1 et 2 sont respectivement dues aux côtés et aux sommets du masque lorsque celui-ci ne touche pas physiquement la facette ; cela se produit notamment lorsque le masque est situé entre la source et le récepteur. Il résulte de ces discontinuités d'éclairement, au niveau de la facette qui compose la scène, des variations continues mais présentant un fort gradient entre les zones en visibilité directe de la source et celles qui ne le sont pas.

Heckbert (1992) propose une approche davantage complexe mais similaire dans ses principes.

Etant donné que la problématique de la synthèse d'image dans l'infrarouge inclut celle du domaine visible, une approche de type DM aurait pu être utilisée pour générer les éléments. En effet, dans le cadre de cette approche, des méthodes ont été développées pour calculer rapidement les ombres portées pour des paysages modélisés par un ensemble de polygones. Par exemple, Stewart et Ghali (1994) ont développé un algorithme permettant de représenter le paysage comme un ensemble de régions où l'éclairement est constant.

Pour l'application au domaine infrarouge, il aurait été possible d'effectuer des itérations temporelles de cette méthode. On aurait ainsi obtenu un maillage support des éléments qui satisfasse le critère de respect des éléments homogènes vis-à-vis du rayonnement solaire incident. On aurait, par exemple, pu s'inspirer de Bossen et Heckbert (1996). Ce premier jeu d'éléments aurait pu être utilisé ensuite pour effectuer le maillage respectueux des conditions de vent et autres, identiques en tout point de la surface des éléments. Les algorithmes précédents auraient dû être adaptés pour offrir cette possibilité. Nous devons pouvoir contrôler la précision du maillage résultant à chaque itération, une précision importante étant nécessaire près de l'instant de simulation, une précision moindre étant suffisante longtemps avant l'instant de simulation.

L'objectif de cette thèse n'étant pas de développer un logiciel de triangulation sous contraintes, nous avons préféré utiliser la méthodologie présentée dans ce chapitre, spécifiquement adaptée aux contraintes de la synthèse dans l'infrarouge thermique.

L'élément que nous avons défini, et que nous utiliserons par la suite, constitue une extension *volumique* et *temporelle* de la facette obtenue par DM en synthèse d'images dans les courtes longueurs d'onde.

Chapitre 6

Le simulateur *OSIRIS* :
architecture et fonctionnement

6.1. Généralités

6.1.1. Architecture globale

La modélisation de la scène en éléments, décrite au chapitre précédent, nous a conduit à concevoir et développer un simulateur spécifique, utilisant ces éléments pour effectuer la simulation de la scène en luminance et générer ainsi une image de cette scène. Nous avons choisi de développer un simulateur modulaire, chaque module ayant une fonction spécifique. Pour des raisons liées à la physique de l'infrarouge, la température de surface des éléments doit être prédite avant la luminance, et avant la génération de l'image. Ceci nous a naturellement amené à opter pour une architecture en cascade lors de la conception du simulateur *OSIRIS*.

Finalement, le simulateur *OSIRIS* comprend quatre modules distincts :

- le premier, (S0), fournit une modélisation du paysage en éléments en fonction des conditions de la simulation (heure, lieu, météorologie, ...) et de la description 3-D du paysage ;
- le second (S1) prédit de façon itérative, et pour chacun de ces éléments, le bilan des flux à la surface et résout les équations de la chaleur et du bilan hydrique. Cela donne une estimation de la température à chaque instant ;
- le troisième module (S2) calcule la luminance globale du paysage. Il évalue l'émission propre de chacun des éléments et prédit les différentes réflexions dans la bande spectrale d'intérêt ;
- le quatrième, (S3), est un outil de visualisation ; il permet la visualisation de la scène 3D synthétisée quel que soit l'angle de prise de vue, indépendamment de la simulation globale du système d'acquisition d'images.

Le fonctionnement de ces quatre modules séquentiels est illustré par la figure 6.1.

Un des avantages d'une telle architecture est de pouvoir disposer du résultat en sortie de chacun des modules. Cela permet un contrôle plus précis et une meilleure compréhension de chaque étape de la simulation durant la synthèse. Par ailleurs, la correction de potentielles approximations non pertinentes s'avère plus aisée du fait qu'il n'est pas nécessaire de reprendre l'intégralité de la simulation.

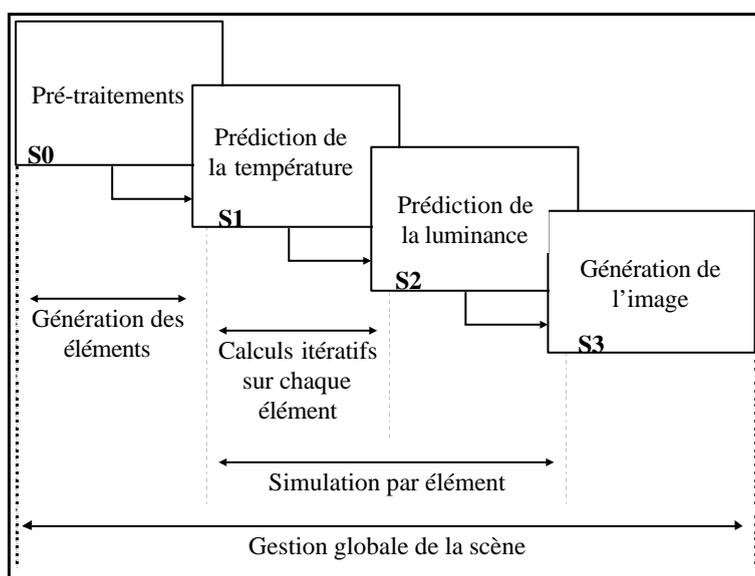


Figure 6.1 : illustration de l'architecture séquentielle à quatre modules adoptée pour le simulateur *OSIRIS*

Parmi ces quatre modules, seuls les trois premiers constituent véritablement le cœur du simulateur. Le module (S3), utile à la visualisation d'une image de la scène, n'est utilisé que pour vérifier ou illustrer

les résultats obtenus. Dans sa configuration opérationnelle, la sortie du simulateur *OSIRIS* sera la scène 3-D en luminance, sortie de (S2) et donnée d'entrée d'un simulateur de système d'observation.

6.1.2. Gestion des textures

Deux définitions génériques des textures consistent à dire qu'il s'agit de l'arrangement, ou de la disposition des éléments d'une matière (Petit Robert, 1984), ou de l'ensemble des caractères définissant des relations volumiques et spatiales (Petit Larousse, 1991). En synthèse d'images, les textures permettent de simuler un état de surface, en habillant celle-ci avec des valeurs explicites (Neyret, 1996). Elles représentent les variations de radiométrie existant dans les zones de l'image supposées homogènes. Ces zones se réduisent aux éléments dans notre cas. Les variations radiométriques peuvent être dues à :

- de faibles variations de géométrie du paysage, imperceptibles à l'échelle du pixel, et non modélisées par le modèle numérique M.N.T. et/ou M.N.E. décrivant le paysage,
- de petites variations locales des paramètres thermo-optiques à l'intérieur de l'élément.

Ces variations, géométriques et/ou des propriétés thermo-optiques des matériaux, engendrent à leur tour des variations au niveau de la radiométrie de la scène. Ceci contribue grandement au photo-réalisme de l'image, et à un aspect coutumier à l'œil humain. La méthode de la radiosité classique ne prévoit pas la possibilité d'inclure des textures sur chacun des éléments finaux. A chaque élément est associé une réflectance, à laquelle correspond une radiométrie, uniforme sur la surface de l'élément.

Une approche consistant à habiller des images synthétiques à l'aide de textures issues d'images infrarouge réelles a été envisagée. Néanmoins, et de manière analogue aux résultats présentés au paragraphe 4.2.1 concernant l'utilisation d'images infrarouge réelles, cette approche conduit à reproduire, involontairement, des textures résultant de conditions particulières relatives à l'acquisition mais incohérentes avec les conditions de la simulation.

Afin de rendre les images de synthèse davantage photo-réalistes, nous avons essayé de synthétiser une texture pour chacun des éléments du paysage. Si la texture présente, à une échelle donnée, le même aspect quelle que soit la zone observée, on considère l'image comme la réalisation d'un processus stochastique stationnaire, c'est-à-dire que les propriétés statistiques de l'image sont invariantes par translation (Minghelli, 1999). En s'appuyant sur cette définition, nous avons généré une texture en utilisant des paramètres statistiques relatifs à chaque élément. Néanmoins, le modèle de paysage dont nous disposons ne nous donne aucune information quant à la variabilité spatiale des paramètres thermo-optiques.

Faute d'information spatiale pertinente, nous avons généré des images texturées en utilisant la méthode suivante :

- la radiométrie de l'élément obtenue par le calcul exact est utilisée comme valeur moyenne sur la surface de l'élément,
- une perturbation des paramètres thermo-optiques est effectuée pour estimer par simulation une seconde valeur de la radiométrie de l'élément. Les perturbations introduites sont uniformes. Disposant de plusieurs bases de données, nous avons pu estimer un écart-type pour chaque paramètre. Cet écart-type correspond à la valeur de la perturbation,
- la différence entre la radiométrie « perturbée » et la radiométrie exacte est utilisée pour estimer un écart-type de la radiométrie autour de sa vraie valeur. Ici, l'écart-type est pris égal à la valeur absolue de la différence,
- à l'aide de ces deux paramètres, radiométrie exacte et perturbée, une distribution gaussienne est utilisée lors de la génération de l'image pour prédire la luminance associée à chacun des pixels contenus dans l'élément.

Des images obtenues en utilisant cette méthode sont présentées dans le chapitre 7.

6.2. Module de pré-traitements (S0)

6.2.1. Les entrées-sorties

Le module (S0) sert à la modélisation de la scène en éléments, telle qu'elle a été définie au chapitre 5.

Les entrées du module (S0) sont :

- l'ensemble des conditions de la simulation. Ces conditions servent à déterminer l'évolution de la position du soleil au cours du temps, générer les maillages géométriques successifs... Elles sont également utilisées pour la gestion des flux convectifs à travers la scène,
- la description géométrique de la scène en objets ; chaque objet est composé de facettes planes, d'orientation donnée. Cette description peut être soit purement synthétique, soit issue d'un MNT et/ou MNE représentatif d'un paysage réel. Le format d'entrée requis par le simulateur pour cette description géométrique est le format VRML (VRML⁹⁷, 1997),
- la description des matériaux qui constituent les objets ; lorsqu'une facette géométrique est composée de différents matériaux, un découpage préliminaire est effectué afin de n'avoir à traiter que des facettes homogènes,
- les règles de définition des environnements. L'environnement radiatif est fonction d'une distance maximale d'influence qui doit être fournie par l'utilisateur. L'environnement conductif est déterminé automatiquement par le simulateur. L'environnement convectif d'un élément est étendu à l'ensemble de la scène.

En sortie du module de pré-traitements, l'utilisateur a accès à l'ensemble de ces informations, ainsi qu'au maillage géométrique de la scène, support des éléments. Le fonctionnement global du module de pré-traitements, ainsi que l'enchaînement des différentes fonctions qui le constituent, sont illustrés par la figure 6.2.

6.2.2. Fonctionnement

Ce module se compose de huit fonctions ayant chacune un rôle spécifique. Les fonctions n° 1, 3, 6, 7 et 8 sont entièrement autonomes, alors que les fonctions n° 2, 4 et 5 requièrent l'intervention de l'utilisateur.

1 – Calcul de l'évolution du rayonnement solaire.

Cette fonction permet de déterminer les heures de lever et de coucher du soleil ainsi que sa position en fonction de l'heure. Elle est utile à la génération du maillage support des éléments telle que définie au chapitre 5. En sortie, les valeurs sont tabulées et seront utilisées par la suite dans tous les autres modules du simulateur.

2 – Modélisation de la scène en facettes.

Un modèle numérique de terrain doit être fourni en entrée du simulateur. Celui-ci ne reflète *a priori* que la géométrie du terrain. La modélisation de la scène en facettes permet de générer, par maillage, des facettes ayant des caractéristiques de matériaux constituants différentes. Ainsi, et de manière analogue à la synthèse dans les courtes longueurs d'onde, dès cette étape ne sont plus gérées que des entités ayant des caractéristiques homogènes vis-à-vis de la géométrie et des matériaux.

3 – Détermination de l'environnement conductif inter-facettes.

Le modèle géométrique de départ ne contient aucune information sur l'environnement des objets, ni sur l'environnement conductif des facettes qui les composent. Cette fonction est alors utile pour définir une liste préliminaire des environnements conductifs de chaque facette. Le résultat permettra de restreindre la recherche de l'environnement conductif des éléments, en ne recherchant pour chaque élément que des voisins dans la facette géométrique dont il est issu, et dans les facettes adjacentes. Le

critère de voisinage que nous avons retenu est le suivant : deux facettes sont voisines par conduction si elles ont au moins une frontière commune.

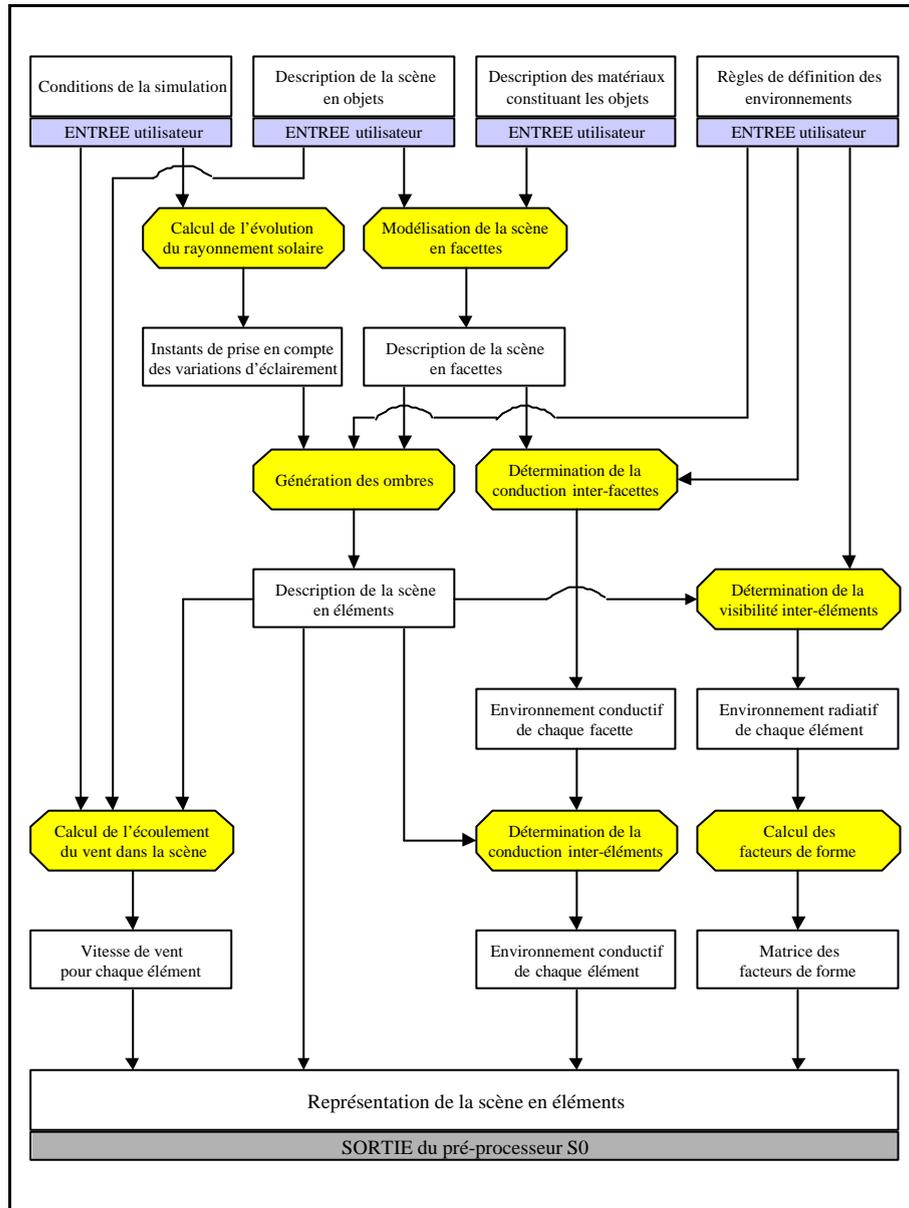


Figure 6.2 : architecture du module de pré-traitements (S0) du simulateur OSIRIS

4 – Génération des ombres.

Cette fonction est la plus importante du module (S0). En fonction des conditions de la simulation, l'utilisateur fournit au simulateur les différents instants auxquels le maillage selon les discontinuités liées aux ombres portées doit être effectué. Le maillage en éléments est obtenu par itérations successives. A chaque itération, l'utilisateur doit également fournir l'ensemble des critères de relaxation (*cf.* chapitre 5) de la précision géométrique, s'il le souhaite. Par défaut, aucun critère de relaxation n'est appliqué. En sortie de cette fonction, l'utilisateur dispose d'une modélisation de la scène en éléments géométriques.

Cette modélisation est ensuite raffinée pour satisfaire au critère de la radiosité hiérarchique. Lorsque deux éléments voisins sont en visibilité et sont séparés d'une distance inférieure à une valeur fournie par l'utilisateur, ceux-ci sont re-découpés. Ce dernier découpage correspond à un maillage sous

contrainte de surface maximale, et est également effectué de façon pratique à l'aide du logiciel Triangle.

5 – Calcul de l'écoulement du vent.

Le calcul de l'écoulement du vent sur chacun des éléments créés est effectué à l'aide d'un logiciel extérieur, comme par exemple le logiciel FLUENT (<http://www.fluent.com> ; Baléo et Lecoite, 1995).

6 – Détermination de la conduction inter-éléments.

Ce calcul est mené de façon similaire à celui donnant accès à l'environnement conductif des facettes géométriques. L'intérêt du calcul précédent est de réduire le nombre potentiel d'éléments voisins, rendant cette fonction plus rapide.

7 – Détermination de la visibilité inter-éléments.

Les résultats du chapitre 5 ont montré une relative faible dépendance de la température et de la luminance aux phénomènes de réflexion multiple, comparée à la dépendance aux ombres ou aux perturbations d'écoulement de vent. Les éléments précédemment obtenus sont à ce stade de la simulation indivisibles. Ils sont ainsi soit en visibilité totale, soit cachés l'un de l'autre. Ils seront supposés être en visibilité totale si :

- le segment reliant les centres de gravité des deux éléments n'intersecte aucun autre élément de la scène,
- la distance séparant les deux centres de gravité est inférieure à une distance maximale fournie par l'utilisateur.

La distance maximale doit être cohérente avec la surface maximale des éléments, de façon à obtenir un facteur de forme inférieur à un seuil en deçà duquel les interactions radiatives peuvent être négligées.

8 – Calcul de la matrice des facteurs de forme.

La visibilité entre les éléments étant déterminée, le calcul de la matrice des facteurs de forme est effectué. Dans cette version du simulateur, nous utilisons la méthode et le logiciel de Schröder et Hanrahan (1993) pour calculer cette matrice.

6.3. Prédiction de la température de surface – Module thermique (S1)

6.3.1. Les entrées-sorties

Le module (S1) est le module thermique du simulateur OSIRIS ; il calcule la température de surface de chacun des éléments qui composent la scène à partir de la connaissance de l'ensemble des paramètres météorologiques, de modèles physiques, et de bases de données.

Les entrées de ce module sont :

- la représentation de la scène en éléments, sortie du module de pré-traitements (S0),
- une base de données des paramètres thermo-optiques des matériaux primaires présents dans la scène ; cette base de données comprend des paramètres thermiques (capacité calorifique, conductivité thermique ...), optiques (albédo, émissivité ...), convectifs (rugosité moyenne ...), ainsi que des paramètres hydriques pour le sol et la végétation,
- la description de la composition des matériaux selon la profondeur ; l'utilisateur construit, à partir de matériaux primaires recensés dans la base de données thermo-optiques, des matériaux composites (mur avec isolation thermique par exemple). Le module thermique (S1) effectue ensuite un maillage approprié à la résolution des équations différentielles de la chaleur et du bilan hydrique,
- les conditions de la simulation, identiques à celles utilisées par le module de pré-traitements.

En sortie du module thermique, le simulateur délivre la température de surface de chacun des éléments composant la scène (figure 6.3). Les profils de température et d'humidité selon la profondeur de l'élément sont également disponibles. En particulier, et bien que ce ne soit pas l'objectif du simulateur *OSIRIS*, ces données pourraient être utilisées pour d'autres applications, telles la connaissance de la température à l'intérieur des bâtiments ou le bilan hydrique des sols, par exemple.

6.3.2. *Fonctionnement*

Le module thermique s'articule autour de six fonctions principales. Les quatre premières sont des fonctions préliminaires ; elles permettent d'initialiser l'ensemble des données pour les calculs de température et de bilan hydrique. Les deux fonctions suivantes constituent le cœur du module thermique. Elles interviennent à chaque itération, lors de la prédiction du bilan des flux, de la température et de l'état hydrique des éléments.

1 – *Maillage des éléments selon la profondeur.*

L'utilisateur fournit au logiciel le pas de temps de calcul avec lequel il souhaite effectuer la simulation. Un maillage de l'ensemble des matériaux constituant les objets est effectué pour permettre la résolution des équations de diffusion de la chaleur et de bilan hydrique. Le pas de calcul doit, dans le cas général, satisfaire à la condition de convergence (cf. équation 3.51). Suivant les matériaux utilisés, et l'épaisseur des matériaux, ce pas de temps peut être petit. Par exemple, lorsque l'on considère une plaque d'acier de 1 cm d'épaisseur, le pas de temps ne devrait pas excéder 6 secondes. A cause des temps de calcul mis en jeu, cette valeur devient irréaliste. Dans un tel cas, une méthode implicite est employée (cf. chapitre 3) pour la résolution des équations différentielles. Les éléments sont découpés en cellules selon la profondeur ; les paramètres thermiques associés à ces cellules satisfont aux équations 5.2 et 5.3.

2 – *Détermination de l'instant initial.*

Cette fonction fixe le nombre d'itérations nécessaires à la prédiction de la température. Le pas de temps de calcul étant donné, l'instant initial est déterminé comme étant l'heure de lever du soleil le jour précédant la simulation. Dans le cas où le soleil ne se lèverait pas durant la simulation, soit qu'il soit tout le temps au-dessus de l'horizon (cas des régions de fortes latitudes durant l'été polaire), ou bien qu'il soit tout le temps sous l'horizon (cas de la nuit polaire), l'instant initial serait arbitrairement choisi à minuit le jour précédant la simulation.

3 – *Modélisation des phénomènes physiques indépendants du comportement de la scène.*

A partir des conditions de la simulation, la température de l'air, et les rayonnements solaire et atmosphérique incidents, indépendants du comportement de la scène, peuvent être estimés. Afin de simplifier et d'accélérer les calculs ultérieurs, ces valeurs sont tabulées.

4 – *Initialisation.*

La température de l'air constitue un bon estimateur de la valeur moyenne de la température des différents objets au cours de la journée. Pour accélérer la convergence, la température des objets sur toute la profondeur est initialisée à la température moyenne de l'air sur la journée. L'état hydrique est également initialisé ; celui-ci est fourni par l'utilisateur.

5 – *Modélisation de l'ensemble des phénomènes physiques et bilan des flux.*

A chaque itération, cette fonction calcule, selon l'équation 3.35, le bilan des flux à la surface de chaque élément. Les modèles utilisés sont ceux décrits dans le chapitre 4.

Les variations d'humidité relatives à la profondeur affectent les caractéristiques thermo-optiques des matériaux. Les caractéristiques thermiques, capacité calorifique et conductivité thermique, dépendant

de l’humidité, sont calculées à chaque itération. La capacité calorifique est prédite en utilisant le modèle de Taconet (1988) :

$$c_c(w_s) = 4.1810^6 (0.3 + w_s) \tag{6.1}$$

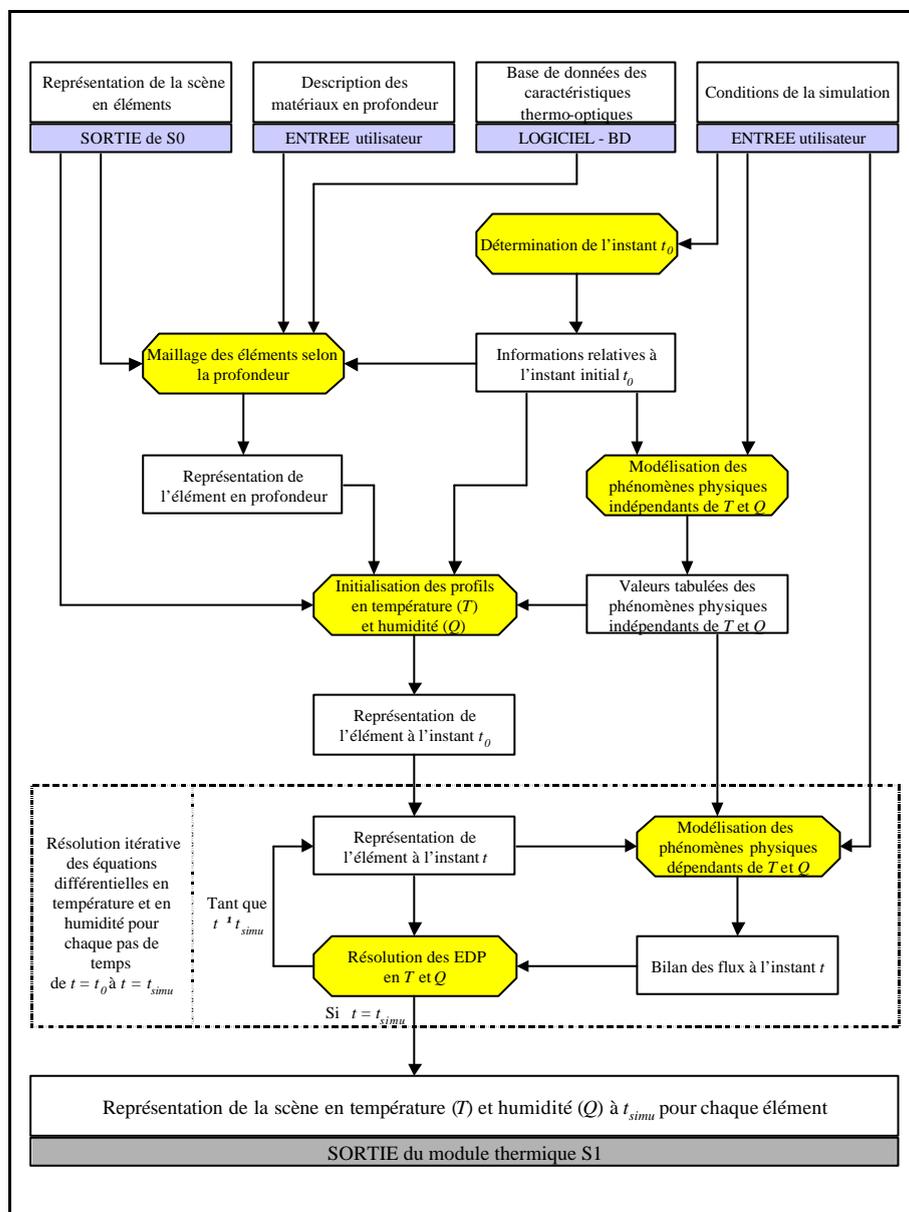


Figure 6.3 : architecture utilisée pour le module thermique (S1)

D’autres modèles existent, tels ceux de Braude (1996) ou Chanzy (1991) notamment. Faute de données pertinentes pour évaluer le modèle le plus adapté aux spécifications du simulateur OSIRIS, nous avons opté pour le modèle précédemment utilisé par Jaloustre-Audouin (1998) dans SPIROU. Il en a été de même pour la modélisation des variations de conductivité thermique en fonction de l’humidité. Le modèle choisi est le suivant :

$$c_t(w_s) = \frac{1}{c_c(w_s)} \left(\frac{l_s + 2300 w_s - 1890}{0.654} \right)^2 \tag{6.2}$$

où l_s représente l’inertie thermique du matériau. Il donne accès à la conductivité thermique en fonction de l’humidité.

Les caractéristiques optiques, réflectance et émissivité, ne concernant que la couche superficielle, sont affectées proportionnellement à l'humidité w_s du matériau :

$$\mathbf{r}(w_s) = (1 - w_s) \mathbf{r}_{\text{matériau}} + w_s \mathbf{r}_{\text{eau}} \quad (6.3)$$

La relation donnant l'émissivité en fonction de l'humidité relative est, par application des lois de Kirchoff, similaire à l'équation 6.3.

6 – Résolution des équations de diffusion de la chaleur et de bilan hydrique.

La méthode des différences finies est utilisée pour résoudre les équations de diffusion de la chaleur et du bilan hydrique (cf. chapitre 3). Cette fonction est la plus importante du simulateur OSIRIS en terme de temps de calcul.

6.3.3. Base de données

La résolution de l'ensemble de ces équations nécessite également d'avoir accès à l'ensemble des paramètres thermo-optiques caractérisant l'élément. Chaque élément possède sa propre structure, telle que définie au chapitre 5. De façon pratique, il existe beaucoup plus d'éléments que de matériaux différents dans la scène. Les paramètres thermiques sont regroupés pour chaque type de matériau, et utilisés ensuite pour les différents calculs au niveau des éléments. Cette approche, permettant d'éviter la duplication des paramètres thermiques contenus dans le vecteur $\mathbf{Comp}(i)$, n'autorise cependant pas de conserver les valeurs des paramètres thermiques capacité calorifique et conductivité thermique ; ces derniers sont évalués à chaque itération en fonction de l'évolution de l'humidité dans le matériau. Une base de données regroupant l'ensemble des paramètres thermo-optiques est fournie au simulateur. Si l'utilisateur possède plusieurs bases de données provenant de sources différentes, il peut ainsi les utiliser suivant la pertinence de chacune.

6.4. Prédiction de la luminance – Module radiatif spectral (S2)

6.4.1. Les entrées-sorties

Le module (S2) du simulateur est le module de calcul des luminances dans la bande spectrale choisie par l'utilisateur ; il prédit d'une part la luminance émise par chacun des éléments du fait de leur température de surface, et d'autre part la luminance réfléchiée par les éléments, en fonction des rayonnements spectraux incidents.

Les entrées de ce module sont :

- les conditions de la simulation, identiques à celles entrées dans les modules précédents. Il faut y ajouter la bande spectrale d'intérêt ainsi que la réponse spectrale du capteur,
- la représentation de la scène en éléments, issue de (S0), et une valeur de température associée à chacun de ces éléments, issue du module thermique (S1),
- une base de données des caractéristiques optiques spectrales de chacun des matériaux de surface qui composent la scène.

En fonction de la précision souhaitée par l'utilisateur, le simulateur prend en compte les réflexions multiples qui peuvent se produire dans la scène : les réflexions d'ordres successifs sont calculées jusqu'à ce que la précision souhaitée soit atteinte. La figure 6.4 illustre le fonctionnement global du module (S2).

6.4.2. Fonctionnement

Le module radiatif spectral est constitué de cinq fonctions principales. La base de données spectrales utilisée est ASTER. La précision spectrale de cette base de données, dans les longueurs d'onde qui nous intéressent, est généralement de 0.05 μm entre 3 et 5 μm , et de 0.1 μm entre 5 et 14 μm .

1 – Calcul de l'émission propre des éléments.

Celle-ci est estimée en utilisant l'équation 3.31. La température de surface de l'élément provient du résultat délivré par le module thermique. Quant à l'émissivité spectrale, elle est déduite des lois de Kirchoff et de la base de données ASTER. Le gabarit spectral de l'instrument fait partie des conditions de la simulation et est fourni par l'utilisateur. L'émission d'un objet i dans la scène s'obtient de la manière suivante :

$$E_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} g(\lambda) \mathbf{e}(\lambda) L^{bb}(\lambda, T_i) d\lambda \quad (6.4)$$

2 – Calcul des flux spectraux incidents.

Cette fonction prédit les flux solaire atmosphérique spectraux incidents au niveau du paysage. La prédiction du flux solaire spectral incident nécessite la connaissance de la transmission atmosphérique, telle que présentée dans l'équation 4.21. Le coefficient de transmission $c(\lambda)$ de cette équation doit être compatible avec l'échantillonnage spectral des réflectances de la base de données ASTER. En pratique, nous avons choisi de travailler avec un pas de 5 cm^{-1} dans le domaine fréquentiel, ce qui correspond à un échantillonnage spectral de 0.045 μm aux alentours de 3 μm , et d'environ 0.1 μm aux alentours de 14 μm . Ce pas est parfaitement compatible avec la base de données ASTER et la précision est suffisante pour les simulations. La prédiction du flux atmosphérique spectral est effectuée à l'aide du modèle de Berger (cf. chapitre 4) ; celui-ci est analytique, et peut être intégré aisément selon le gabarit fourni.

3 – Calcul du flux réfléchi pour chaque élément.

Cette fonction prend en compte l'orientation des éléments, et permet de déterminer pour chacun les flux atmosphérique et solaire réfléchis. Nous ne disposons pas de modèles donnant le pourcentage des rayonnements solaires spectraux direct et diffus. Lorsque l'élément est à l'ombre, nous avons alors supposé qu'il ne recevait aucune contribution de la part du soleil. Dans ce cas, le rayonnement réfléchi par un élément s'écrit en première approximation :

$$R_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \mathbf{r}(\lambda) \left\{ M_i G_s(\lambda) + \sum_{j=1}^n F_{ij} \mathbf{e}(\lambda) L^{bb}(\lambda, T_j) + \sum_{j=1}^n (1 - F_{ij}) L_{as}(\lambda) \right\} d\lambda \quad (6.5)$$

où M_i est un coefficient valant 1 si l'élément i est au soleil, et 0 sinon. G_s et L_{as} désignent respectivement les rayonnements solaire et atmosphérique spectraux incidents, et T_j la température de surface de l'élément j voisin de i .

Nous aurions également pu supposer que les proportions entre les rayonnements direct et diffus spectraux étaient identiques à celles des rayonnements globaux. Un nouvel instrument donnant ces proportions est désormais disponible en ligne depuis juillet 2002 et pourrait être utilisé (<http://www.soda-is.org>).

4 – Flux provenant des éléments.

En première approximation, le flux provenant de l'élément i s'écrit comme la somme des contributions des flux émis et réfléchi par cet élément :

$$B_i = E_i + R_i \quad (6.6)$$

Cette formulation est inexacte, et sous-estime le rayonnement réfléchi car elle ne prend pas en compte les réflexions multiples. La valeur de la luminance ainsi calculée pour chacun des éléments est une valeur approchée par défaut, à l'ordre 1, vis à vis de la réflexion.

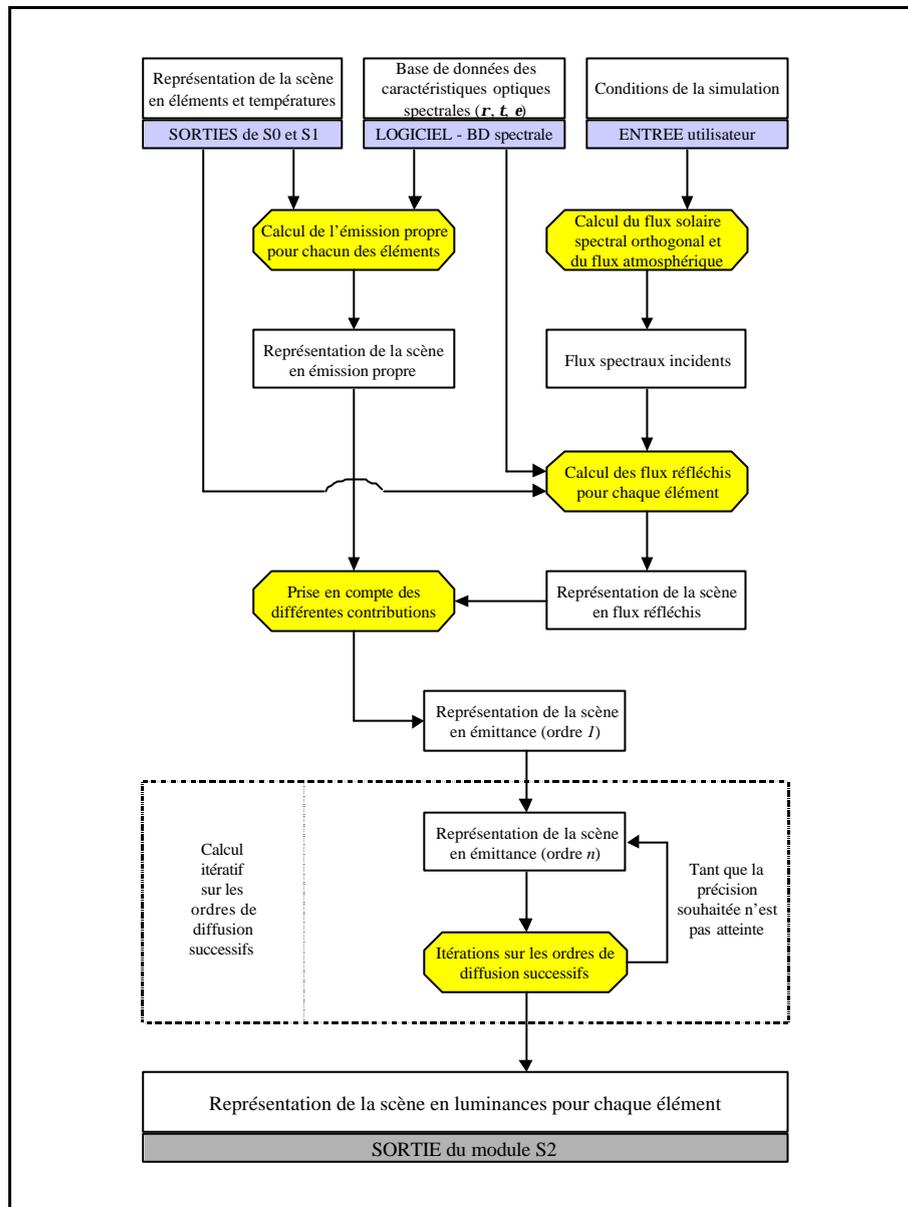


Figure 6.4 : architecture du module radiatif spectral (S2)

5 – Itérations en fonction de la précision souhaitée.

L'évaluation exacte de la luminance provenant d'un objet donné pourrait être obtenue en utilisant la méthode des radiosités. Néanmoins, l'équation intégrale inhérente à l'intervalle spectral rend difficile l'emploi de cette méthode.

Deux approches peuvent être utilisées pour estimer précisément la luminance provenant de chacun des éléments :

- une première approche consiste à discrétiser la bande spectrale d'intérêt en un nombre fini d'intervalles dans lesquels les paramètres spectraux intervenant dans la simulation sont considérés comme constants. Sur chaque intervalle élémentaire ainsi défini, la méthode des radiosités peut être employée. L'inconvénient d'une telle approche réside dans la gestion d'un nombre

d'intervalles important. Échantillonnés conformément à la base de données ASTER, 40 intervalles spectraux élémentaires sont nécessaires pour décrire les bandes II et III. Pour chacun de ces intervalles spectraux, les fonctions n° 1 à 4 doivent être effectuées. Nous n'avons pas utilisé cette approche, jugée trop pénalisante en temps de calcul.

- une seconde approche consiste à estimer la luminance provenant d'un objet à l'ordre 1, en calculant celle-ci comme précédemment expliqué, puis en incluant l'influence des voisins d'ordre supérieur. Cette approche est expliquée au paragraphe 4.3.3.3. La luminance d'un élément est ainsi estimée par approximations successives ; tant que l'influence d'un ordre de diffusion sur la luminance est supérieure à une tolérance fournie par l'utilisateur, l'ordre de diffusion considéré est pris en compte. Le calcul s'arrête dès que la précision requise est atteinte.

En pratique, nous avons opté pour cette seconde approche, les ordres de diffusion pertinents par rapport à la précision souhaitée étant généralement peu élevés. Pour des éléments dont la portion de ciel vu est grande (dernier terme de l'équation 6.5), un calcul mené à l'ordre 1 constitue un bon estimateur de la luminance. Pour les éléments davantage exposés à l'influence des voisins, l'ordre 2 peut s'avérer nécessaire, notamment en bande II lorsque les voisins sont constitués de matériaux à forte réflectivité.

6.5. Sorties du simulateur

6.5.1. Les différentes sorties possibles

En plus de la sortie image en luminance dans une bande spectrale donnée, plusieurs sorties annexes sont prévues. Notamment, il peut être intéressant de d'avoir accès en sortie du simulateur :

- à la représentation de la scène en éléments,
- aux différents environnements d'un élément ou d'un objet donné,
- à l'évolution temporelle journalière de la température de surface pour un objet donné,
- à une image de la scène en température de surface.

6.5.2. Génération des images

Le simulateur *OSIRIS* comporte un quatrième module qui est un outil de génération d'image au format raster. En effet, *OSIRIS* est prévu pour être couplé avec un simulateur d'images satellitaires, disposant déjà d'un module de génération d'images à partir d'une représentation 3D de scène. Le quatrième module n'a été développé que pour des besoins de visualisation de la scène sous forme d'image raster.

Le module de visualisation génère une image raster de la scène, avec un angle de visée et un pas d'échantillonnage spécifiés par l'utilisateur.

6.5.2.1. Gestion de l'aliasing

La conversion d'une représentation vectorielle, telle que nous l'avons utilisée, en une représentation raster, nécessite un échantillonnage des données imposé par le passage d'une représentation continue à une représentation discrète. Des effets d'aliasing¹ se produisent du fait que les lignes et les côtés des polygones sont continus et ne peuvent être correctement représentés à l'aide d'une représentation discrète.

Il existe deux approches pour éviter les effets d'aliasing (Rogers, 1998) :

- augmenter la fréquence spatiale d'échantillonnage et effectuer un post-filtrage,
- traiter le pixel comme une surface finie et non comme un point.

¹ Aspect de cannelures dans une image. Les lignes et courbes doivent, dans une image raster, être représentées à l'aide de pixels carrés juxtaposés. Les lignes et courbes non horizontales ou verticales apparaissent alors comme des séries de marches d'escalier.

Augmentation de la fréquence spatiale d'échantillonnage et post-filtrage

Cette approche est probablement la plus simple à mettre en œuvre. Il s'agit de sur-échantillonner l'image obtenue par rasterisation de la représentation vectorielle, d'un facteur tel que l'ensemble des détails présents dans cette représentation soient visibles dans l'image. Un filtre sous-échantillonneur passe-bas est ensuite utilisé pour obtenir une image avec le pas souhaité (Crow, 1981).

Si la taille caractéristique des objets présents dans la scène est de l'ordre du pas d'échantillonnage spatial souhaité pour l'image, un facteur de sur-échantillonnage de deux ou trois est appliqué. Un post-filtrage est ensuite effectué avec un filtre bilinéaire ou bicubique, afin d'obtenir une image correcte de la représentation vectorielle. Lorsque la taille caractéristique des objets est nettement inférieure au pas d'échantillonnage spatial souhaité, un sur-échantillonnage plus important doit être envisagé. Dans ce cas, le post-filtrage peut par exemple être effectué à l'aide d'un filtre de Shannon tronqué et une apodisation de Hanning.

Gestion du pixel comme une surface finie

Une autre approche consiste à considérer le pixel comme une surface finie et non comme un point ; cette approche est équivalente à pré-filtrer l'image (Crow, 1981).

Une approche heuristique simple consiste à adapter l'intensité d'un pixel le long des frontières d'un polygone, pour qu'elle soit proportionnelle à la surface du pixel à l'intérieur du polygone. Une modification de l'algorithme de Bresenham (Bresenham *et al.*, 1965) par Pitteway et Watkinson (1980) permet d'obtenir une bonne approximation de la surface du pixel à l'intérieur d'un polygone. Cette méthode donne une apparence plus lisse aux frontières, évitant les effets de marches d'escalier.

Lorsque plusieurs polygones sont contenus, entièrement ou partiellement, dans un pixel, une solution rapide consiste à affecter au pixel la valeur du polygone ayant la plus grande surface incluse dans ce pixel.

Une approche plus complète consiste à affecter au pixel une valeur V_{pixel} proportionnelle aux valeurs des différents polygones ou différentes portions de polygones $v_{polygone}$ présents dans le pixel, pondérées par la surface efficace relative $s_{polygone}$ qu'elles occupent :

$$V_{pixel} = \frac{1}{S} \sum_{\{polygone\}} s_{polygone} v_{polygone} \quad (6.7)$$

où S est la surface du pixel et :

$$S = \sum_{\{polygone\}} s_{polygone}$$

Cette approche est notamment utilisée par la fonction *Polygrid* du logiciel ArcInfo (ArcInfo, 1992).

6.5.2.2. Gestion de l'angle de visée

En pratique, un observateur (ou un capteur) est à une certaine distance de la scène. La scène ayant une extension spatiale donnée, les objets ne sont pas tous vus avec le même angle. Dans le cas d'un satellite à haute résolution spatiale imageant une scène, l'angle maximal correspondant au champ de l'instrument est généralement de quelques degrés. Nous n'avons pas reproduit la possibilité d'imager différents points de la scène avec des angles de visée différents. L'image que nous générons est une image « fictive », au niveau du sol (c'est-à-dire n'incluant pas les perturbations liées à la traversée de l'atmosphère par le signal), l'observateur étant situé à l'infini.

Des logiciels spécifiques, tels par exemple MODTRAN ou AS³-I, permettent de simuler la traversée atmosphérique ou tout type de capteur et de visée, et pourraient être couplés au simulateur OSIRIS.

6.5.2.3. Conclusion sur la génération des images

Le format des données en sortie du simulateur *OSIRIS* est composé de deux fichiers :

- un fichier VRML contenant le modèle 3-D représenté en éléments,
- un fichier contenant la luminance associée à chacun des éléments.

Nous avons développé le module (S3) afin de visualiser les résultats à moindre frais. Ce module génère une image selon un angle de visée défini, pour un capteur situé à l'infini. Le pas d'échantillonnage spatial est fourni par l'utilisateur ; une grille, fonction de ce pas, de l'angle de visée, et des dimensions de la scène est ainsi créée. Un algorithme de type Z-buffer (Catmull, 1975) est ensuite utilisé pour remplir cette grille et générer ainsi une image représentative de la scène en luminance. Dans ce cas, le passage d'une représentation vectorielle de la scène à une image raster a été effectué en augmentant la fréquence spatiale d'échantillonnage de l'image d'un facteur deux, et en filtrant ultérieurement l'image générée. La surface minimale des éléments, adaptée dans le cas de la synthèse à l'échantillonnage final souhaité pour l'image, nous permet de nous affranchir des problèmes liés aux éléments de taille trop petite comparée à l'échantillonnage spatial.

Un changement de format des données de sortie de (S2) permettrait l'utilisation de logiciels commerciaux, tel 3-D Studio Max, lesquels offrent davantage de fonctionnalités.

Chapitre 7

Validation et illustrations

7.1. Validation du simulateur

L'absence de campagne de mesures et de données réelles, en particulier à l'échelle qui nous intéresse et pour des paysages 3-D, rend impossible, à l'heure actuelle la validation complète du prototype *OSIRIS*. Néanmoins, nous avons pu valider partiellement le simulateur, tout comme la méthodologie de simulation employée.

La validation partielle du simulateur a été effectuée en s'appuyant sur les résultats issus de *SPIrou*. Le simulateur *SPIrou* admet en entrée une représentation 2-D du paysage, et délivre une image représentative du paysage à 2 m de résolution (Jaloustre-Audouin, 1998). Une des caractéristiques principales de ce simulateur est de considérer chaque pixel comme indépendant de ses voisins. Une sortie annexe du simulateur est l'évolution temporelle de la température de surface d'un pixel. La luminance provenant de ce pixel peut ensuite être calculée indépendamment de la génération d'une image. Nous avons utilisé cette propriété de *SPIrou*, simulateur opérationnel et validé, pour effectuer la validation d'*OSIRIS*. Celle-ci n'a cependant pu être possible que sur des régions particulières, dont la luminance a pu être simulée par *SPIrou*. Ces régions :

- sont horizontales,
- ne présentent aucune interaction, radiative, convective ou conductive avec les régions voisines.

Sur ces régions, les simulateurs *SPIrou* et *OSIRIS* donnent des résultats similaires, notamment au niveau des températures de surface. Cela s'explique par la similitude des modèles utilisés, tous identiques à l'exception du modèle de rayonnement solaire : Perrin de Brichambaut et Vauge (1982) dans le cas de *SPIrou*, ESRA (Rigollier *et al.*, 2000) dans le cas d'*OSIRIS*. La validation des luminances prédites par *OSIRIS* n'a pas été possible de cette façon. *OSIRIS* intègre, dans le module radiatif spectral, la base de données de réflectances ASTER, échantillonnées à 0.05 μm pour des longueurs d'onde inférieures à 5 μm , et 0.1 μm pour des longueurs d'onde supérieures. Or, Jaloustre-Audouin ne disposait pas de ces données lors de la réalisation de *SPIrou*. Celui-ci prédit les luminances en utilisant des valeurs moyennes intégrées sur les bandes II et III. La précision en sortie du simulateur est ainsi moins importante. Ainsi, il n'a pas été possible de valider précisément les images en luminance en sortie d'*OSIRIS*. Néanmoins, une comparaison visuelle entre les images simulées par *SPIrou* et *OSIRIS* n'a pas mis en évidence d'aberration notable.

7.2. Validation de la méthodologie de simulation

7.2.1. Description de l'exemple

La scène que nous avons choisi de simuler pour illustrer les possibilités du simulateur *OSIRIS* est celle présentée dans le chapitre 5. Les conditions de la simulation ont été choisies pour permettre une bonne illustration de l'ensemble des phénomènes :

- lieu : Amiens, 49.54 N, 2.18 E, altitude : 100 m,
- date et heure : le 12 février 2002 à 14 h,
- température de l'air oscillant entre 5 °C et 12 °C,
- vent uniforme soufflant à 2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,
- humidité de l'air de 70 %.

Les calculs de température ont été effectués en utilisant la méthode des différences finies et un coefficient $k = 1/2$ (cf. chapitre 3), avec un pas de temps de calcul de 10 minutes. Les matériaux qui composent la scène sont les suivants (de l'extérieur vers l'intérieur des objets) :

- sol en terre battue, de profondeur « infinie »,
- parking goudronné, constitué de 16 cm d'asphalte puis de terre,
- les murs des bâtiments sont composites, constitués de 20 cm de béton, 5 cm d'isolation en polystyrène, et d'une mince couche de béton,
- toiture de tuiles en terre cuite en ce qui concerne le bâtiment sud-est,
- toiture en ardoise pour les quatre pentes du bâtiment ouest,

- toiture recouverte de calendrite dans le cas des toits plans (bâtiments ouest et nord-est).
- La scène et la répartition des matériaux qui la composent sont illustrées par la figure 7.1. La température interne de tous les bâtiments a été supposée constante tout au long de la journée, et prise égale à 15 °C ; aucune limitation n'a été imposée à la température sous les toits.

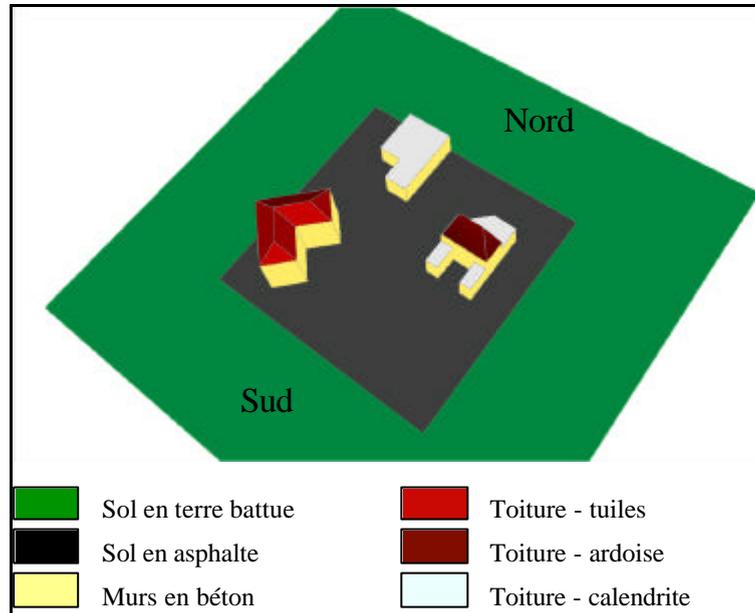


Figure 7.1 : illustration de la répartition des bâtiments dans le paysage ainsi que des matériaux qui le composent

La texture, ou variabilité spatiale de radiométrie, a été obtenue en appliquant des perturbations d'amplitude de 5 % sur l'ensemble des caractéristiques thermiques (capacité calorifique et conductivité thermique) des matériaux.

Le paysage est inscrit dans un carré de 400 m de côté, et le parking central en asphalte dans un carré de 200 m. Le bâtiment le plus au nord (toit plat) mesure 20 m de haut ; le bâtiment sud-ouest 50 m, et le sommet du toit du bâtiment est, culmine à 60 m. Ces dimensions peuvent paraître importantes, mais elles permettent ainsi une bonne illustration de l'impact des ombres portées. Ceci est renforcé par le choix de la date de simulation.

La génération des éléments pour une simulation à 14 h a été faite conformément aux critères présentés dans le chapitre 5. Le tableau 7.1 liste les différents critères de relaxation spatio-temporelle utilisés, ainsi que le nombre d'éléments résultants après chaque itération.

Heure de simulation	Contraintes (en m) (R ; d_{min} ; l_{min} ; S_{min})	Nombre de mailles
14 h 00	(0 ; 0 ; 0 ; 0)	423
13 h 50	(0.05 ; 0 ; 0.1 ; 0.01)	1258
13 h 30	(0.1 ; 0 ; 0.2 ; 0.04)	2626
12 h 50	(0.2 ; 0 ; 0.5 ; 0.14)	4119
12 h 00	(0.5 ; 0 ; 1.0 ; 0.5)	6083
10 h 00	(1.0 ; 0 ; 2.0 ; 2.0)	8565

Tableau 7.1 : évaluation du nombre d'éléments utilisés pour modéliser le paysage

Les calculs de température ont ensuite été menés en utilisant la méthode de radiativité hiérarchique présentée dans le chapitre 3 ; cela a conduit pour cet exemple à gérer 50 545 éléments.

7.2.2. Analyse des ombres solaires

7.2.2.1. Analyse des ombres simulées

La figure 7.2 présente les résultats de simulation obtenus dans les bandes spectrales II et III. Les deux images ont été simulées avec un angle de visée de 45° en élévation, et de 80° E en azimut ; cela signifie que l'observateur est pratiquement plein ouest par rapport à la scène. La direction d'observation a été choisie de manière à permettre la visualisation de l'ensemble des régions qui ont été à l'ombre depuis le lever du soleil jusqu'à 14 h, heure de la simulation. Les différences de radiométrie des objets qui composent la scène, dues aux matériaux qui les composent, seront analysées dans le paragraphe 7.4.

En s'intéressant exclusivement à la simulation des ombres portées, nous constatons :

- en bande II (de 3 à $5\ \mu\text{m}$) : des frontières relativement nettes entre les régions à l'ombre et les régions au soleil,
- une très faible rémanence des ombres des bâtiments situés au nord (à gauche de l'image),
- en bande III (de 8 à $12\ \mu\text{m}$) : les ombres portées sont moins nettes qu'en bande II,
- la rémanence des ombres est davantage prononcée ; celle-ci est visible sur le sol en terre comme sur le parking en asphalté, aux pieds de chaque bâtiment,
- tout point à l'ombre d'un bâtiment n'a pas la même radiométrie ; en regardant les ombres des différents bâtiments, on remarque une décroissance continue de l'ombre, en regardant de l'ouest vers l'est.

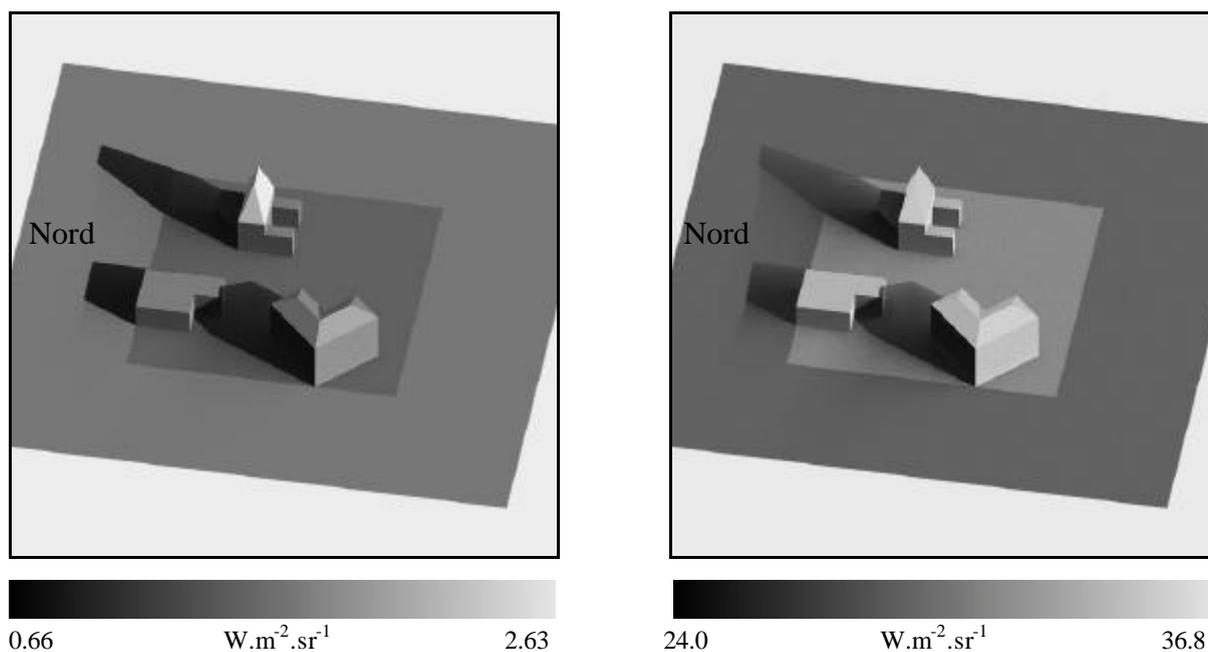


Figure 7.2 : images simulées à 14 h dans les bandes II (à gauche) et III (à droite). L'angle de visée est de 45° en élévation, et de 80° E en azimut

Ces faits s'expliquent de la manière suivante.

En bande II, la contribution de la réflexion des flux spectraux incidents au flux provenant de la scène est très importante. Ici, elle représente environ 40 % du flux total. Cela impacte directement sur le contraste entre les régions à l'ombre et les régions au soleil à l'instant de la simulation, et explique à la fois la netteté de la frontière des ombres portées, et le faible effet visuel dû à la rémanence.

En bande III, la contribution des rayonnements réfléchis au flux provenant de la scène est :

- d'une part plus faible, seul le rayonnement atmosphérique ayant un impact significatif dans ces longueurs d'onde,

- d'autre part davantage uniforme. En effet, le rayonnement atmosphérique spectral incident n'est pas directionnel, et impacte chacun des éléments, proportionnellement à l'angle solide sous lequel celui-ci voit le ciel. En toute rigueur, l'impact des réflexions du rayonnement atmosphérique au pied d'un bâtiment est deux fois moindre que sur son toit. Néanmoins, ce phénomène reste faible par rapport à l'émission propre qui prime sur le flux reçu de la scène.

La combinaison de ces deux effets explique la meilleure visibilité de la rémanence des ombres en bande III. Le gradient de radiométrie, visible à l'intérieur d'une région à l'ombre, s'explique de la façon suivante : les points à l'ombre à l'instant de la simulation ne sont pas à l'ombre depuis le même moment. Au cours de la journée, l'ombre d'un bâtiment balaye continûment le sol. Dans cet exemple, les pixels les plus à l'ouest des zones à l'ombre, et les plus proches des bâtiments, sont les pixels qui sont à l'ombre depuis longtemps (2 heures au moins). *A contrario*, les pixels situés dans l'ombre, mais à l'est, ne sont à l'ombre que depuis 10 minutes. Ceci explique qu'à 14 h nous soyons en présence d'un dégradé dans les zones d'ombre. Les ombres thermiques les plus profondes sont à l'ouest dans l'ombre portée par le bâtiment, les ombres thermiques naissantes sont à l'est et apparaissent plus claires.

Néanmoins, nous pouvons constater sur ces images un léger défaut visuel lié à l'échantillonnage temporel utilisé. La hauteur importante des bâtiments (60 m pour le plus haut à l'ouest), combinée à une élévation du soleil faible en cette saison (22.7 ° à 14 h), conduit à des déplacements rapides des régions à l'ombre loin des bâtiments. Ainsi, des régions polygonales de radiométrie quasi-uniforme apparaissent sur l'image. Cet effet est particulièrement visible lorsque l'image est zoomée (figure 7.3). Cet artefact de simulation, gênant pour un photo-interprète, n'affecte néanmoins pas la qualité de l'image, la radiométrie de ces régions étant en moyenne correctement estimée.

La figure 7.3 présente un agrandissement de la zone centrale de l'image précédente en bande III. Cette image a été zoomée d'un facteur trois pour permettre une visualisation aisée. A droite de la figure, le profil vertical représente la radiométrie (l'échelle est arbitraire) d'une ligne de l'image. La ligne de mesure est représentée en blanc. Quatre zones sont à distinguer dans cette image.

Les zones 1, 3, et 4 illustrent le même phénomène : la rémanence des ombres. Un axe de référence a été dessiné pour permettre au lecteur de juger de l'influence de cet effet. Dans les trois cas, la radiométrie de ces zones est plus importante à l'ouest qu'à l'est. Comme déjà expliqué, cela est dû au fait qu'un pixel situé à l'est de ces zones est sorti de l'ombre depuis moins longtemps qu'un pixel situé à l'ouest. La pente de ces variations n'est pas la même dans chaque cas. Dans le premier, la zone à l'ombre se situe près du pied d'un bâtiment : l'évolution est lente. Dans le second, la zone concernée est davantage éloignée du bâtiment ; l'évolution est plus rapide. Le troisième cas, zone 4, ne concerne pas le même matériau ; les vitesses d'évolution et les effets de rémanence ne peuvent être comparés.

La zone 2 illustre le dégradé présent à l'intérieur d'une zone à l'ombre à l'instant de la simulation. On constate une évolution quasi linéaire (sur un laps de temps de 2 heures) de la radiométrie dans cette région, le maximum étant de $28.8 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$, le minimum de $25.6 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$, ce qui correspond à une amplitude de plus de $3 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$.

Le simulateur *OSIRIS* est capable de simuler ces effets de rémanence et de dégradé dans les ombres, observés sur les images infrarouges réelles. Ceci prouve que la méthodologie de simulation développée est pertinente pour reproduire ces phénomènes. Cependant, ces simulations n'ont pu être validées, faute d'observations quantitatives disponibles.

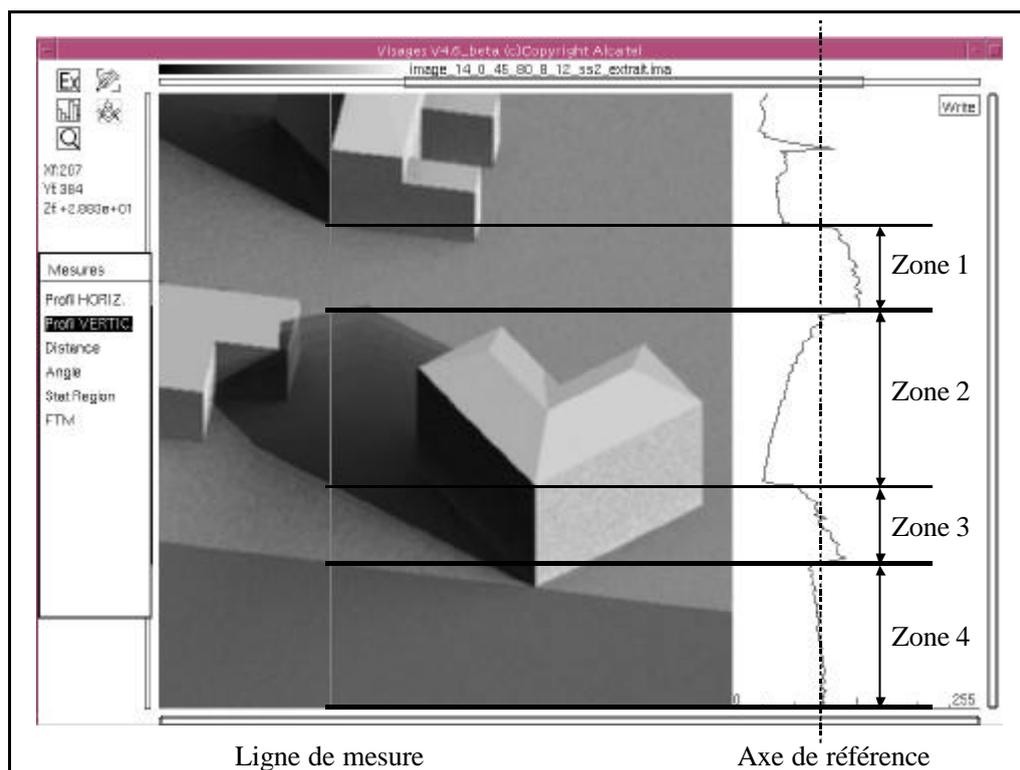


Figure 7.3 : illustration de l'ombre thermique d'un bâtiment. Simulation le 12 février à 14 h, à Amiens (voir texte)

7.2.2.2. Impact de l'heure d'acquisition

La figure 7.4 représente trois images pour différentes heures de simulation dans les deux bandes spectrales II et III. Ces images ont été simulées pour une localisation géographique identique à précédemment ; la date de la simulation choisie cette fois est le 21 juin. Dans ce cas, le soleil se lève à 4 h 07 et se couche à 19 h 56. Les simulations sont vues avec un angle d'élévation de 70 °, et un angle azimutal de 60 E (vues depuis le sud-est).

Les 3 heures choisies pour illustrer l'effet de l'heure d'acquisition, sont :

- 4 h 30 : peu de temps après le lever du soleil,
- 12 h 30 : l'influence du rayonnement solaire est quasiment maximale,
- 20 h 30 : peu de temps après le coucher du soleil.

A cette époque de l'année, les ombres sont plus profondes que dans le cas précédent. Cela est notable dans les deux bandes spectrales. Peu après le lever du soleil, nous constatons que les ombres portées sont déjà visibles en bande II, alors qu'elles ne le sont pas encore en bande III. Ceci s'explique par le temps de réaction de la température, dû à l'inertie des matériaux, avant de répondre à un changement brutal de conditions aux limites (alternance jour / nuit).

Aux alentours de midi, les ombres sont extrêmement marquées en cette saison ; les effets de rémanence ne sont, comparativement à la date de simulation précédente, que peu importants. Cela est dû en grande partie au temps de réaction des matériaux, relativement bref, du fait de la forte contribution du rayonnement solaire au bilan des flux : les ombres marquent peu sur le sol.

Après le coucher du soleil, hormis les effets de rémanence des ombres qui perdurent, les images simulées sont similaires à celles simulées au lever du soleil. Les valeurs minimales et maximales des luminances diffèrent de moins de 15 % en bande II, et de moins de 8 % en bande III. Néanmoins, d'importantes différences existent localement. Par exemple, dans les deux bandes spectrales, la

radiométrie des toits en pentes orientés vers l'ouest apparaît plus élevée. Cette information, qui concerne des entités constituées de matériaux identiques mais orientées différemment, permet de s'assurer que la simulation a été effectuée peu après le coucher du soleil.

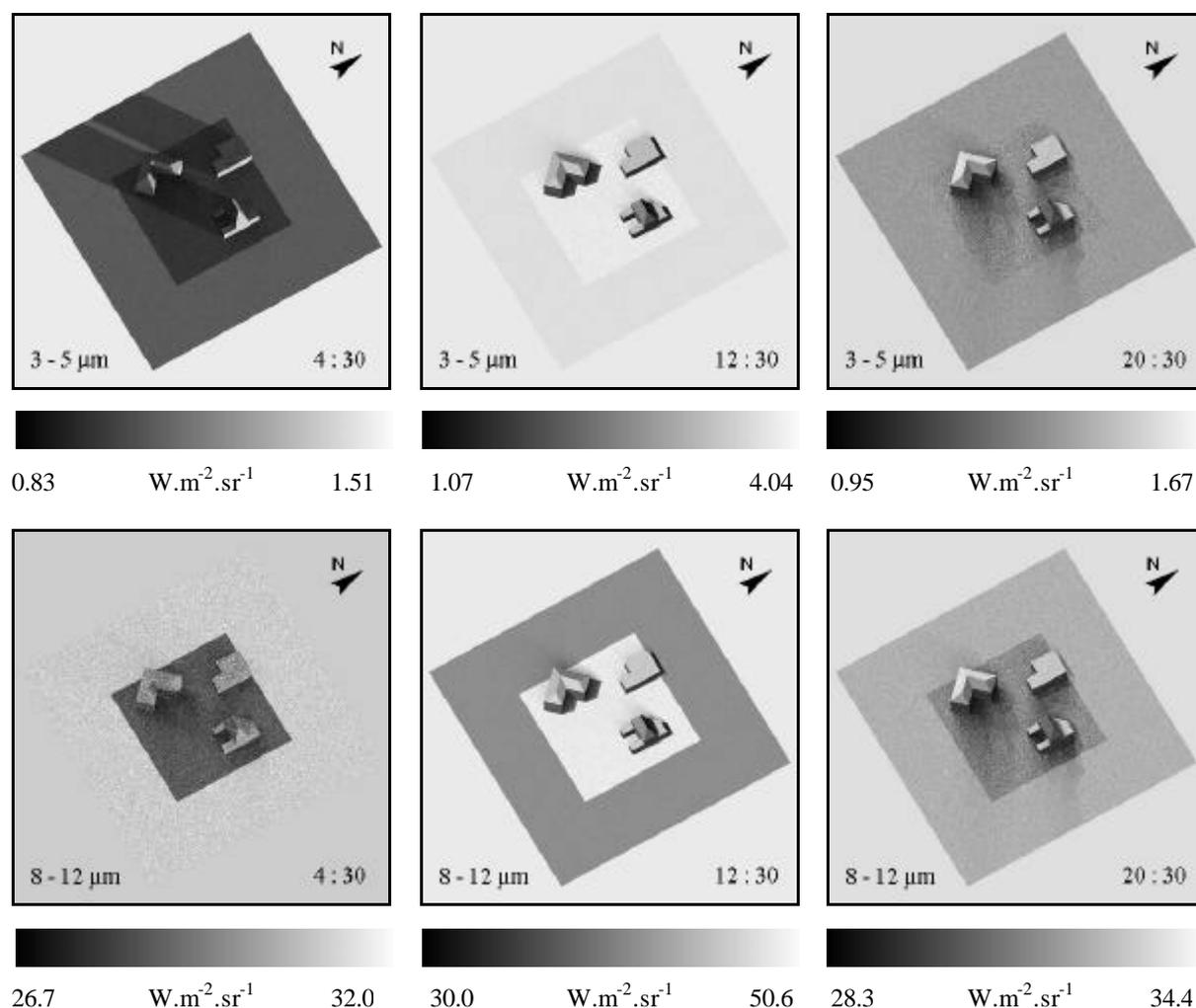


Figure 7.4 : illustration de l'influence de l'heure d'acquisition sur la simulation

7.2.3. Influence de la portion de ciel vu

L'influence des ombres solaires sur le flux provenant d'un paysage a été quantifiée (cf. chapitre 4) comme étant le phénomène prépondérant, nécessitant par conséquent d'être parfaitement modélisé et reproduit. Il a été utilisé pour définir les éléments. Le phénomène d'occultation d'une portion de ciel par un masque (bâtiment ou autre) n'a pas été pris en compte dans la définition des éléments. Nous avons supposé, compte tenu de l'impact relativement faible de ce phénomène sur le flux provenant d'un paysage, que sa prise en compte sur les éléments définis par ailleurs était suffisante. On se propose, dans cette section, de regarder l'influence du masquage du ciel par un bâtiment, afin d'évaluer la pertinence de l'hypothèse faite au chapitre 4.

Pour cela, deux simulations ont été effectuées :

- l'environnement radiatif de l'élément a été calculé conformément à la méthode présentée au chapitre précédent ; cela conduit à la simulation de la luminance réelle provenant du paysage,
- l'environnement radiatif Env_R de l'élément i a été supposé nul ; cela signifie, que l'équation 3.36 du chapitre 3 donnant le rayonnement net à la surface d'un objet s'écrit, en l'absence de voisins :

$$R'_{net} = (1 - a_i)G + (1 - r_i)L_a - e_i \mathbf{s} T_i^4 \quad (7.1)$$

La différence entre cette expression approchée R'_{net} et l'expression exacte R_{net} , est le terme :

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} \left[-(1 - a_i)G_{diffus} + (1 - r_i) \left\{ e_j \mathbf{s} T_j^4 + r_j R_j \right\} - L_a \right] \quad (7.2)$$

Celui-ci traduit le fait que, à la surface d'un élément i , l'énergie qui ne provient pas de l'atmosphère (rayonnements atmosphérique et solaire diffus) provient des éléments en visibilité directe de i et inversement. Il arrive, sous certaines conditions particulières, que les contributions de l'atmosphère et de l'environnement de l'élément i soient identiques. Dans ce cas, le bilan des flux à la surface de l'élément i dans les deux cas de simulation est inchangé, et température et luminance également. Le raisonnement effectué ici sur le bilan radiatif net est analogue à celui qu'il faudrait mener pour exprimer le flux radiatif spectral provenant d'un élément.

La figure 7.5 représente les différences algébriques de radiométrie existant entre la simulation effectuée sans approximation, et la simulation effectuée avec approximation d'un environnement radiatif nul pour la bande II.

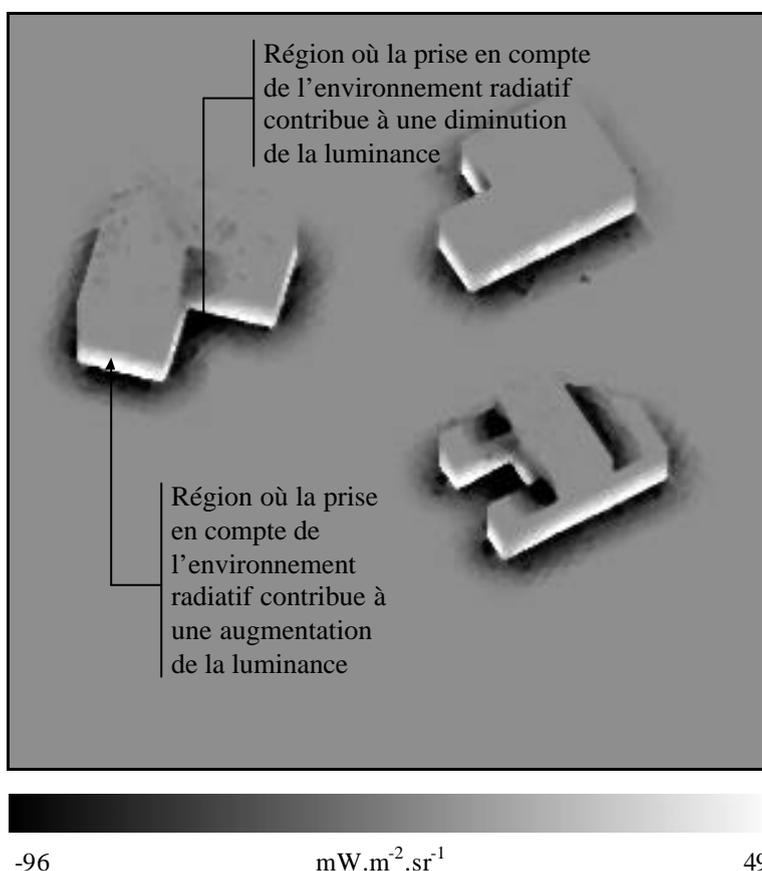


Figure 7.5 : différences entre une image simulée dans les conditions réelles et une image simulée en ignorant les réflexions multiples (bande II)

Les régions de radiométrie uniforme et de couleur grise dénotent la non variation de luminance due à l'absence de voisins. Ces régions sont majoritaires dans l'exemple, l'influence de l'environnement radiatif ayant une portée relativement faible. Cette portée peut être mise en relation avec la figure 4.8 donnant la décroissance du facteur de forme avec l'éloignement à l'obstacle. Les régions qui apparaissent blanches sur l'image correspondent à des régions où la luminance a été sous-estimée du fait de l'absence de prise en compte de l'environnement. C'est principalement le cas sur les murs verticaux en bas des bâtiments. A 14 h, le sol en asphalté est relativement chaud ; sa contribution est

supérieure à celle du rayonnement solaire diffus et de l'atmosphère. Au pied des bâtiments, l'effet contraire se produit.

On remarque, sur la toiture en calendrite du bâtiment ouest, entre les deux pentes en tuile du bâtiment sud-est, et au pied des bâtiments, l'existence de régions où la luminance a été surestimée dans l'image simulée avec approximations. Ceci s'explique par une perte énergétique sur le bilan net, liée à la faible propension des voisins à compenser le manque dû aux plus faibles contributions des flux atmosphériques et solaires diffus.

Le tableau 7.2 présente les statistiques relatives aux images simulées dans les deux configurations, ainsi que celles liées à l'image des différences. En bande II, la différence maximale constatée entre les deux simulations est de $96 \text{ mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ sur un pixel dont la valeur vraie est de $1.643 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$. Cela représente une variation inférieure à 6 %. En bande III, cette différence est de $1.07 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$, quand la radiométrie réelle du pixel est de $31.96 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$, ce qui correspond à une variation d'environ 3.4 %.

Ces variations de luminance obtenues dans cet exemple montrent que l'impact de l'occultation d'une partie du ciel que nous avons chiffré au chapitre 4 (estimé alors entre 0 et 10 %) est assez réaliste.

	Bande II	Bande III
Luminance maximale	2.82	36.8
Luminance minimale	0.63	24.1
Luminance moyenne	1.75	30.6
Ecart-type	0.52	3.0
Nombre de pixels différents	29 122	92 523
Maximum absolu des différences	0.096	1.070
Moyenne absolue des différences	0.005	0.263
Moyenne algébrique des différences	-0.003	0.228
Ecart-type des différences	0.009	0.224

Tableau 7.2 : statistiques des images simulées en tenant compte des réflexions multiples et sans en tenir compte

Il est néanmoins difficile de conclure quant à l'utilité de simuler ou non précisément le masquage du ciel indépendamment des applications désirées et de la précision souhaitée pour l'image. Le simulateur *OSIRIS* permet d'effectuer ces simulations ; le logiciel utilisé pour le calcul des facteurs de forme (Schröder et Hanrahan, 1993), donne quelques fois des résultats aberrants et doit être validé dans tous les cas possibles.

7.3. Efficacité de la simulation de la texture

La méthode de génération de la texture a été présentée à la section 6.1.2. Les perturbations introduites pour la synthèse de la texture sont de 5 % sur les caractéristiques thermiques. Les amplitudes maximales des variations radiométriques ainsi simulées sont présentées dans le tableau 7.3.

	DT	DL_{II}	DL_{III}
Amplitude maximale	1.58 K	$78 \text{ mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$	$0.94 \text{ W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$

Tableau 7.3 : amplitude des perturbations simulées en température et luminance (bandes II et III) pour la synthèse de texture

Ces variations maximales sont relativement faibles, puis que de l'ordre de 2 à 3 % du signal provenant de la scène. La figure 7.6 représente une image de la scène, en bande III, obtenue sans ajout de texture du type de celles définies dans le chapitre précédent. De prime abord, cette image diffère très peu de celle présentée en 7.2. Néanmoins, il est possible de constater quelques différences, notamment sur la façade verticale du bâtiment ouest. Celle-ci apparaît totalement uniforme sur cette image contrairement à l'image de droite de la figure 7.2.

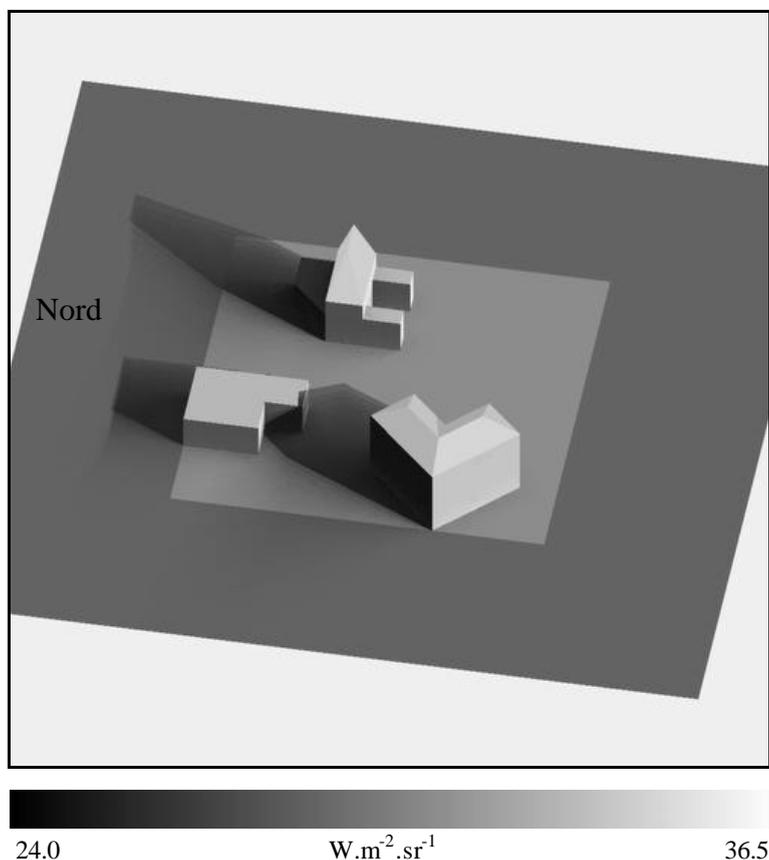


Figure 7.6 : image de la scène simulée sans la prise en compte de textures

Dans le cas particulier que nous avons choisi d'illustrer, l'emploi de la méthode de la radiativité a conduit à utiliser 50 545 éléments. La surface moyenne occupée par un élément est de $3.2 m^2$, ce qui conduit en moyenne, dans l'image finale, à 20 pixels par élément. Ce nombre est relativement faible, car nous avons probablement surestimé le nombre d'éléments nécessaires pour obtenir une image de qualité et reproduisant parfaitement l'évolution des conditions aux limites. De plus, de par la définition même des éléments, la densité d'éléments est plus importante aux endroits où l'évolution des conditions aux limites est importante ; par exemple à l'ombre des bâtiments. Cette densité élevée, ainsi que le faible nombre de pixels de l'image finale par élément, font que l'ajout d'une texture, telle que nous l'avons définie, n'apporte pas pour cette simulation le photo-réalisme souhaité.

Au-delà de l'exemple, il apparaît que la méthode d'ajout de texture choisie n'est pas très pertinente. Les résultats délivrés sont scientifiquement corrects puisque les perturbations introduites sur les paramètres thermiques permettent d'obtenir des amplitudes de luminance réalistes, différentes selon les matériaux. Cependant, l'absence totale d'information spatiale sur les textures ne permet pas de reproduire l'effet photo-réaliste. Une méthode de synthèse de texture, compatible avec la méthode de la radiativité, devrait être étudiée afin de palier à cette lacune.

7.4. Illustration de l'influence de la bande spectrale

Le choix de la bande spectrale de simulation montre un impact important sur l'image résultante. Nous avons présenté jusqu'ici des résultats de simulation dans les bandes II et III. Ces résultats avaient pour but d'illustrer le bon fonctionnement du simulateur dans ces deux bandes spectrales, pour lesquelles l'importance des phénomènes physiques mis en jeu est différente.

Cependant, le simulateur offre la possibilité de simuler n'importe quel intervalle spectral entre 3 et 14 μm , et tout type de réponse spectrale. La figure 7.7 présente les réflectances spectrales des six matériaux de surface utilisés dans les simulations. Il existe des différences importantes dans les comportements spectraux de ces matériaux entre 3 et 14 μm .

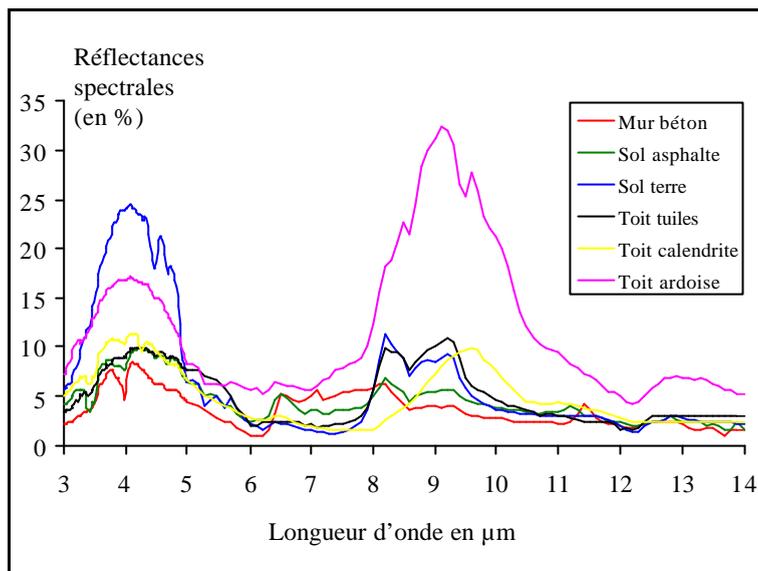


Figure 7.7 : évolution des réflectances spectrales en fonction de la longueur d'onde pour les 6 matériaux de surface utilisés dans les simulations

Nous avons choisi de simuler quatre images, dans les intervalles spectraux suivants : de 3 à 5 μm (bande II), de 8 à 10 μm , de 10 à 12 μm , et de 8 à 12 μm (bande III). Afin de bien comprendre l'influence des paramètres spectraux sur les images, l'image en température de surface est présentée par la figure 7.8. Le tableau 7.4, quant à lui, donne les moyennes arithmétiques des valeurs des réflectances spectrales pour les quatre intervalles spectraux précédemment définis.

	Bande spectrale			
	3 à 5 μm (II)	8 à 10 μm	10 à 12 μm	8 à 12 μm (III)
Mur en béton	5.6	4.1	2.6	3.4
Sol en asphalte	7.6	5.2	3.3	4.2
Sol en terre	17.0	7.5	3.1	5.3
Toit en tuiles	7.8	8.2	3.1	5.7
Toit en calendrite	8.8	6.4	4.5	5.4
Toit en ardoise	13.6	24.3	10.4	17.3

Tableau 7.4 : valeurs moyennes des réflectances spectrales (x 100) associées aux intervalles spectraux sélectionnés pour les simulations

La figure 7.8 présente la température de surface du paysage ; celle-ci varie de 0.4 °C à l'ombre et au nord du petit bâtiment nord-ouest, jusqu'à 24.3 °C sur le mur vertical sud ensoleillé du bâtiment est. Le système de codage utilisé pour convertir l'image en un format compatible avec l'édition de

documents ne permet pas de reproduire précisément les contrastes réellement présents dans l'image. Les deux pentes visibles du toit en ardoise du bâtiment à l'est ont pratiquement la même température ; 20.3 °C pour la pente orientée vers l'est, et 21.3 °C pour celle orientée vers le sud. Or, à 14 h, la pente orientée vers l'est est à l'ombre depuis exactement une heure. La faible différence de température entre les deux pentes de la toiture s'explique aisément. En effet, la pente à l'est a pu emmagasiner de la chaleur toute la matinée, et la faible épaisseur de la toiture autorise des échanges de chaleur importants entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment artificiellement maintenu à 21 °C.

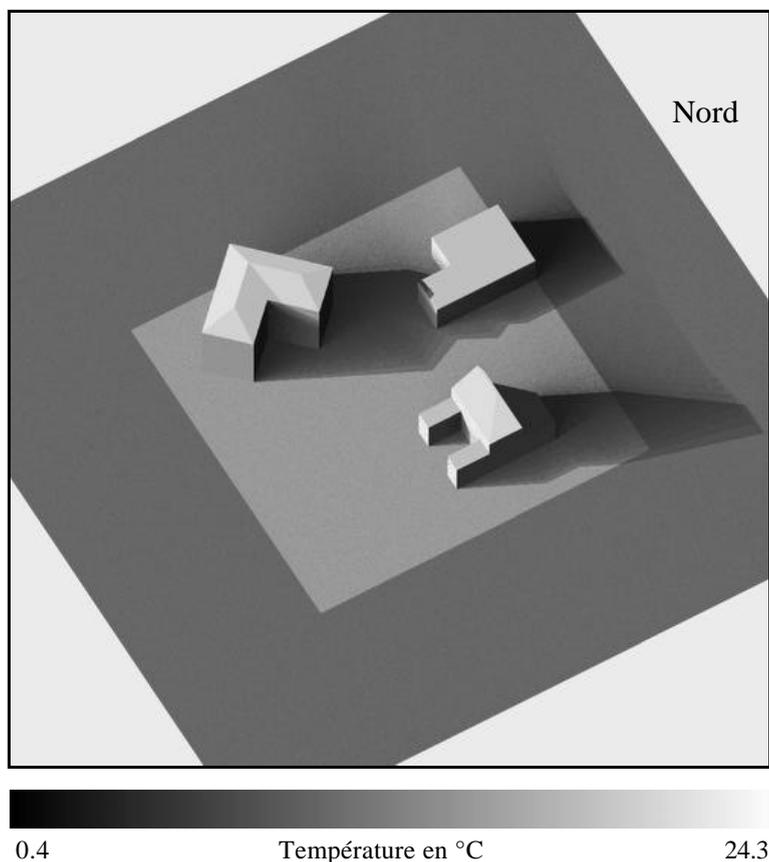


Figure 7.8 : image de la scène en température de surface. L'effet de rémanence des ombres est nettement visible sur cette illustration, de même que le dégradé à l'intérieur des ombres

La figure 7.9 présente les images simulées dans les quatre bandes spectrales sélectionnées. En bande II, l'influence du rayonnement solaire est importante, et représente en moyenne 30 % de la luminance provenant de la scène. Les ombres des bâtiments apparaissent relativement contrastées par rapport aux régions éclairées par le soleil. Ainsi, la rémanence, mise en évidence dans la section 7.2.2.1 n'est que faiblement visible. Dans les ombres, les effets thermiques de dégradé liés à leur mouvement dans le temps représentent moins de $250 \text{ mW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, soit une variation de moins de 9 % de la luminance maximale.

Un autre effet mis en évidence sur cette image est l'importance du rayonnement réfléchi. D'après la figure 7.8, la pente sud de la toiture du bâtiment est, est à la température de 21.3 °C, et celle du bâtiment sud légèrement plus élevée, à 21.8 °C. Cela conduit, en fonction du matériau - de la tuile pour la toiture sud et de l'ardoise pour la toiture est - à une émission propre de respectivement $1.43 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ et $1.32 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ pour les deux toitures. La luminance provenant des deux toitures est respectivement de $2.05 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ et de $2.63 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$. Dans ce cas, la réflectance spectrale d'une part, respectivement de 0.078 et 0.136, et l'orientation des pentes des deux toitures d'autre part, avec un coefficient de 0.80 et 0.95 entre les normales aux toitures et la direction d'éclairage, conduisent à des rayonnements réfléchis de $0.62 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ sur la toiture sud et de $1.31 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ sur la toiture est.

Dans un cas, le rayonnement réfléchi représente 30 % du rayonnement provenant de la toiture, dans l'autre cas 50 %. Cela confirme l'importance des rayonnements réfléchis dans la bande II.

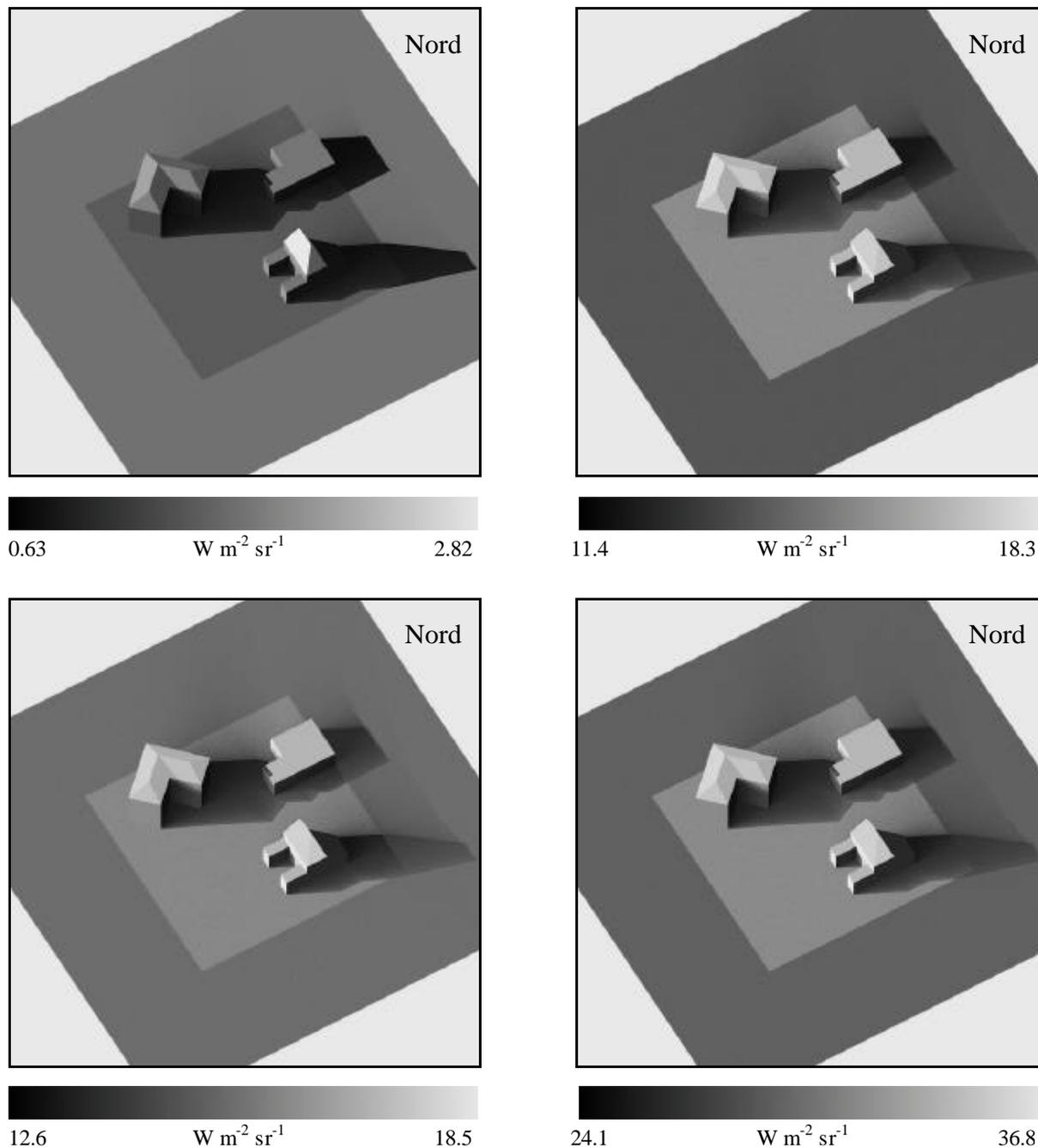


Figure 7.9 : illustration de l'influence de la bande spectrale. Images simulées : en haut à gauche (a), entre 3 et 5 μm ; en haut à droite (b), entre 8 et 10 μm ; en bas à gauche (c), entre 10 et 12 μm , et en bas à droite (d) entre 8 et 12 μm

Les trois autres images de la figure 7.9 ont été simulées dans des bandes thermiques. Etant donné que les réponses spectrales des capteurs simulés sont des fonctions porte, la dernière image, simulée en bande III est la somme des deux précédentes, simulées entre 8 et 10 μm , et entre 10 et 12 μm . Sur l'ensemble de ces images, les effets de rémanence des ombres sont nettement visibles. Le dégradé à l'intérieur des régions à l'ombre est plus délicat à percevoir ; sur le sol en asphalté, il est possible de le distinguer au nord du bâtiment est. Néanmoins, les faibles variations de luminance engendrées par

l'influence de la portion de ciel vu et les réflexions mises en évidence au paragraphe 7.2.3 ne sont pas apparentes sur des images imprimées.

Les différences de comportement de chacune des images ne sont pas majeures pour l'œil humain. Seul le sol en terre apparaît avec un contraste différent par rapport au parking en asphalte entre les images (b) et (c). Compte tenu du codage des images, nous avons calculé le facteur de contraste c , comme le rapport entre les différences des luminances L_1 et L_2 des pixels à analyser, et l'amplitude $L_{max}-L_{min}$ de la luminance dans l'image (équation 7.3) :

$$c = \frac{|L_1 - L_2|}{L_{max} - L_{min}} \quad (7.3)$$

Entre deux régions au soleil situées sur l'asphalte ou sur la terre, ce facteur de contraste est de 21.7 % pour l'image (b), alors qu'il n'est que de 10.2 % pour l'image (c). Cela s'explique par la différence de comportement spectral des deux matériaux considérés. La réflectance des deux corps est à peu près identique entre 10 et 12 μm (tableau 7.4), alors que la réflectance du sol en terre est plus élevée que celle du sol en asphalte entre 8 et 10 μm .

Une analyse similaire, menée dans l'ombre portée du bâtiment ouest sur la terre, montre que le contraste entre une zone à l'ombre et une zone au soleil dans l'image (b) est de 20.3 %, contre 25.4 % dans l'image (c). L'explication provient de la différence d'émissivité de la terre entre les deux bandes spectrales. La réflectance, 2.5 fois plus élevée entre 8 et 10 μm conduit à une émission propre du corps moindre entre 8 et 10 μm qu'entre 10 et 12 μm . Cet effet affecte le matériau terre dans son ensemble, mais est pondéré par la température. Dans le même temps, le rayonnement atmosphérique spectral incident est sensiblement identique dans ces deux bandes spectrales. La réflectance est 2.5 fois plus élevée entre 8 et 10 μm qu'entre 10 et 12 μm ; la fraction de rayonnement atmosphérique réfléchi l'est aussi. Or, celui-ci n'est pas pondéré par la température du sol, car ne dépendant exclusivement que des caractéristiques optiques intrinsèques au matériau. Il est constant sur toute la terre dans les régions d'intérêt. La différence de contraste observée sur la terre entre ces deux bandes spectrales s'explique ainsi : le terme constant lié à la réflexion du rayonnement atmosphérique incident est plus important entre 8 et 10 μm , diminuant l'importance des effets thermiques dans l'image.

Chapitre 8

Conclusion

Cette étude a consisté à spécifier, concevoir et développer un simulateur de paysages dans l'infrarouge thermique. La méthode par synthèse de scènes, déjà employée par Jaloustre-Audouin (1996) ou Barrillot (2001) a été utilisée. Le chapitre 4 a montré que cette méthode est parfaitement adaptée au domaine spectral et aux spécifications de l'utilisateur.

Le simulateur se devait de reproduire les échanges radiatifs, convectifs et conductifs entre les différents objets qui constituent le paysage, d'effectuer des bilans thermiques et hydriques, et de prédire émission et réflexion spectrales des objets. En ce sens, il remplit pleinement sa mission. Pourtant, les interactions des différents phénomènes physiques entre eux, la forte variabilité spatiale de ces phénomènes, ainsi que la dépendance de la luminance à l'évolution temporelle de tous les paramètres, rendent complexe la physique dans l'infrarouge à la surface de la Terre.

Néanmoins, l'analyse des applications futures des produits délivrés par le simulateur, nous a permis d'effectuer un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. En particulier, les phénomènes d'advection locale, les variations spatiales de la température de l'air, ou les réflexions directionnelles ont été négligés. Le simulateur ne traite pas non plus les changements de phase, comme par exemple la formation du givre. Ces hypothèses ont été effectuées, soit par méconnaissance des phénomènes physiques eux-mêmes, soit à cause de l'absence de modèle permettant la prise en compte de ces phénomènes avec les paramètres d'entrée dont nous disposions. De nouveaux modèles pourraient être intégrés au simulateur au fur et à mesure de l'avancement des connaissances.

Au cours de ce travail de thèse, l'ensemble des étapes qui ont conduit au développement du simulateur, depuis les spécifications jusqu'à la réalisation du prototype *OSIRIS*, ont été motivées par la volonté d'être le plus cohérent possible avec la physique régissant le comportement du paysage. Nous avons étudié l'influence des différents phénomènes physiques à trois dimensions. Ces résultats, présentés dans le chapitre 4, ont conduit à une classification extrêmement générale de l'influence relative de ces phénomènes sur le comportement de la scène.

La conception d'*OSIRIS* nous a amené à inventer et définir le concept d'*élément*, extension volumique et temporelle de la facette obtenue par "*Discontinuity Meshing*" et déjà utilisée en synthèse d'images dans les courtes longueurs d'onde. Ces éléments sont définis afin :

- d'être spatialement localisés,
- d'avoir une composition identique en tout point de même profondeur,
- de présenter des conditions aux limites identiques en tout point, en surface et en profondeur.

L'architecture du simulateur, adaptée à la modélisation du paysage en éléments, permet de contrôler chaque étape de la simulation. Nous avons organisé le simulateur en quatre modules opérant successivement :

- création et modélisation du paysage en éléments,
- prédiction de la température,
- estimation des luminances,
- génération de l'image,

Cette organisation autorise des sorties annexes, telles la génération de cartes d'ombres ou d'images en température par exemple. La conception du simulateur, sous forme de modules, séparant l'algorithmie et la modélisation, offre beaucoup de souplesse vis à vis des méthodes numériques de résolution d'équations et des modèles utilisés. Elle permet notamment de remplacer certaines d'entre elles par d'autres plus précises ou appropriées.

Actuellement, les résultats de cette étude ont fait l'objet de cinq communications dans des colloques nationaux et internationaux (Poglio *et al.*, 2001a ; Poglio *et al.*, 2001b ; Poglio *et al.*, 2001c ; Poglio *et al.*, 2002a ; Poglio *et al.*, 2002b). Les résultats obtenus, comme illustrés dans le chapitre 7, montrent la capacité du simulateur *OSIRIS* à reproduire les phénomènes physiques primordiaux. Les simulations réalisées à l'aide d'*OSIRIS* en se restreignant au cas 2-D, comparées à celles délivrées par *SPIROU*, conduisent à des résultats similaires. Cela constitue une validation partielle du simulateur *OSIRIS* et assure la pertinence des résultats sur les régions planes.

L'outil a essentiellement été développé pour permettre le dimensionnement et la spécification de missions des futurs systèmes spatiaux d'observation de la Terre utilisant une voie infrarouge. Il s'agit des systèmes d'observation à haute résolution spatiale, utilisés notamment pour l'étude de la météorologie locale, le suivi précis de l'évolution des zones végétales, ou le renseignement militaire. Pour cela, le simulateur *OSIRIS* peut être couplé avec des outils de simulation de système d'acquisition d'images par satellite, tel AS³-I par exemple. L'association de ces simulateurs utilisés conjointement a pour objectif de tester la sensibilité des futurs systèmes d'observation aux variations des différents paramètres géophysiques inhérents au paysage. Les simulations délivrées peuvent également être utilisées pour d'autres applications, telle par exemple la formation des futurs utilisateurs et interprètes d'images infrarouges à haute résolution.

En conclusion, le prototype *OSIRIS* génère des images dans l'infrarouge thermique à très haute résolution spatiale, avec un pas d'échantillonnage de l'ordre de 50 cm. Il permet, suivant les *desiderata* de l'utilisateur, de simuler :

- tout lieu géographique,
- tout type de paysage,
- toutes date et heure d'acquisition,
- toutes bandes spectrales incluses entre 3 et 14 μm .

Au terme de ces trois années durant lesquelles nous avons étudié les différentes techniques et méthodes pouvant être adoptées pour la simulation de paysages à haute résolution spatiale dans l'infrarouge thermique, plusieurs aspects restent néanmoins à approfondir.

Des logiciels et méthodes performants existent déjà en synthèse d'images dans les courtes longueurs d'onde, tels ceux développés par le projet SIAMES (SIAMES, 1999). Il serait intéressant de détailler davantage leur fonctionnement, afin d'évaluer les possibilités d'interfaçage de ces logiciels avec la méthode de simulation que nous proposons, puis de les réaliser.

Une réflexion sur les ressources informatiques nécessaires, temps de calcul et ressources mémoire, devrait être menée en ce qui concerne la production de données opérationnelles dans des délais raisonnables sur des paysages de grande taille. La modélisation du paysage en éléments, et la structure associée à ces éléments, permettent une gestion efficace des ressources mémoire. Néanmoins, la modélisation du paysage en éléments triangulaires constitue le principal handicap. Le nombre d'entités est maximisé en utilisant une telle modélisation, et devient très grand par rapport au nombre de facettes géométriques initiales. Une modélisation du paysage sous forme de polygones à la place des triangles, permettrait de réduire le nombre d'éléments à gérer. Les conséquences de cette réduction seraient, d'une part un gain en ressources mémoire, d'autre part un gain sur le temps de calcul de la température, ainsi que, dans une moindre mesure, sur les luminances.

Durant tout ce travail, un pas d'échantillonnage temporel uniforme a été utilisé pour l'ensemble des simulations effectuées. L'impact important des conditions météorologiques peu avant la simulation, et l'impact généralement plus faible de ces dernières bien avant la simulation auraient pu conduire à l'utilisation d'un pas d'échantillonnage temporel variable. Celui-ci pourrait être grand devant la vitesse d'évolution des phénomènes physiques plusieurs heures avant la simulation, la précision souhaitée sur les prédictions étant alors relativement faible. Par contre, peu de temps avant l'heure de simulation, la précision doit être importante. Le pas d'échantillonnage temporel devrait alors être adapté à la précision souhaitée pour l'image. L'intérêt d'une telle méthode serait de réduire le nombre d'itérations utiles à l'estimation de la température de surface, ou, à défaut, d'obtenir des résultats plus précis avec un nombre d'itérations temporelles identique.

La totalité des modèles implantés dans le simulateur a été validée et testée par les concepteurs des modèles eux-mêmes. Néanmoins, le simulateur constitué par l'assemblage complexe de ces modèles n'a pu être validé que partiellement. Le nombre élevé de paramètres nécessaires au fonctionnement du simulateur est un frein à la validation globale de ce dernier. Des validations locales, sur certains types de sol et sur des géométries particulières ont néanmoins pu être menées.

Dans la perspective de l'industrialisation d'un tel outil de simulation, et compte tenu de sa complexité, sa validation est primordiale. Cet aspect nécessite la connaissance du paysage et des objets qui le composent : constitution et état hydrique. Les paramètres météorologiques doivent être correctement relevés sous forme de champ, pour être utilisés ensuite comme entrée du simulateur afin de prédire une image représentative du paysage. Cette image serait ensuite comparée à une image acquise par un capteur. Néanmoins, le faible nombre d'imageurs aéroportés à haute résolution spatiale existant dans l'infrarouge thermique, les problèmes de rapport signal sur bruit dus à la variabilité thermique sur l'ensemble de l'imageur ainsi que les perturbations du signal d'origine terrestre par l'atmosphère, rendent complexe la perspective de la validation d'un tel outil à court terme.

Chapitre 9

Bibliographie

1. Asrar G., 1989. Theory and Application of Optical Remote Sensing. Chap 15 : quantitative aspects of remote sensing in the thermal infrared. Wiley series in Remote Sensing, pp. 578-603.
2. ArcInfo, 1992. User's Guide, 6.0, Data Conversion.
3. ASTER, 2000. ASTER spectral library Ver 1.2, CD-ROM, Jet Propulsion Laboratory, NASA, October 2000, <http://spectib.jpl.nasa.gov/archive/jhu.html>
4. Baléo J.-N. et Lecointe Y., 1995. Séminaire d'initiation à la méthode des volumes finis et au logiciel FLUENT, Cours de L'Ecole des Mines de Nantes, ISITEM, 38 p.
5. Barillot P., 2001. MISTRAL, Juin 2001, <http://www.onera.fr/dota/mistral/index.html>
6. Belorizki E., et Gorecki W., 1992. *Introduction à la mécanique statistique*, EDP Sciences, ISBN 2-86883-440-X, 300 p.
7. Berger X., 1988. A simple model for computing the spectral radiance of clear skies. *Solar Energy*, 40, (4), pp. 321-333.
8. Bhumralkar C.M., 1975. Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model, *Journal of Applied Meteorology*, **14**, pp. 1246-1258.
9. Billat V., et Wald L., 1997. Use of a simulator to study the sensitivity of the signal sensed by the MERIS spectrometer, *Proceedings of IGARSS'97*, IEEE catalog number 95CH35770, **1**, pp 60-62.
10. Boissonnat J.-D., Devilliers O., Pion S., Teillaud M., Yvinec M., 2002. Triangulations in CGAL, *Proceedings of the 16th ACM Symposium on Computational Geometry*, pp. 5-19.
11. Bossen F.J., et Heckbert P.S., 1996. A Pliant Method for Anisotropic Mesh Generation, 5th International Meshing Roundtable, Sandia National Laboratories, pp. 63-76.
12. Braude I., 1996. *SiSPAT user's manual*, Version 2.0, Document interne au Laboratoire d'étude des transferts en Hydrologie et Environnement, Grenoble, France, 83 p.
13. Bresenham J.E., 1965. Algorithm for computer control of a digital plotter, *IBM System Journal*, **4**, pp. 25-30.
14. Brunt D., 1932. Notes on radiation in the atmosphere, *Q. J. R. Meteorological Research*, **58**, pp. 389-418.
15. Brutsaert W., 1975. On a derivable formula for longwave radiation from clear skies, *Water Resources Research*, **11**, pp. 742-744.
16. Calvet, 1990. Adaptation d'un modèle agrométéorologique au cas de couverts hétérogènes, Rapport de D.E.A., INRA Bordeaux, France, 30 p.
17. Catmull E., 1975. Computer display of curved surface, *Proceedings of IEEE Conference Computer Graphics and Pattern Recognition Data Structure*, p. 11.
18. Chanzy A., 1991. Modélisation simplifiée de l'évapotranspiration d'un sol nu utilisant l'humidité et la température de surface accessibles par télédétection. Thèse de Doctorat, Institut National de Recherche Agronomique, France, 197 p.
19. Ciarlet P.G., et Lions J.L., 1990. *Handbook of Numerical Analysis, Finite Difference Method (Part 1), Solution of Equations in R^l (Part 1)*, Elsevier Science Publisher B.V., ISBN 0-444-70366-7, 652 p.

20. Cohen M.F., et Greenberg D.P., 1985. The hemi-cube, a radiosity solution for complex environments, *Computer Graphics, SIGGRAPH'85*, **19**, pp. 31-40.
21. Cohen M.F., Greenberg D.P., Immel D.S., 1986. An efficient radiosity approach for realistic image synthesis, *IEEE Computer Graphics and Applications*, **6**, (3), pp 26-35.
22. Cohen M.F., et Wallace J.R., 1993. *Radiosity and realistic image synthesis*, Academic Press, ISBN 0-12-178270-0, 381 p.
23. Collatz G.J., Ball J.T., Grivet C. J.A., Berry J.A., 1991. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration : a model that includes laminar boundary. *Agricultural and Forest Meteorology*, **54**, pp. 107-136.
24. Columbia-Utrecht, 2001. <http://www.cs.columbia.edu/CAVE/curet/>
25. Crank J., et Nicholson P., 1947. A practical method for numerical integration of solution of partial differential equations of heat-conduction type, *Proceedings of Cambridge Philos. Society*, **43**, pp. 50-67.
26. Crow F.C., 1981. A comparison of antialiasing techniques, *IEEE Computer Graphics and Applications*, **1**, pp. 282-289.
27. Dana K.J., van Ginneken B., Nayar S.K., Koenderink J.J., 1999. Reflectance and texture of real world surfaces, *ACM Transactions on Graphics*, **18** (1), pp. 1-34.
28. Deardorff J.W., 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, **83** (C4), pp. 1889-1902.
29. Foley J.D., van Dam A., Feiner S. K., Hughes J. F., 1996. *Computer Graphics, Principles and Practice. Second Edition in C*. Addison-Wesley Publishing Company, ISBN 0-201-84840-b, USA.
30. Gastellu-Etchegorry J.-P., Demarez V., Pinel V., Zagolski F., 1996. Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies, *Remote Sensing of Environment*, **58**, pp. 131-156.
31. Gastellu-Etchegorry J.-P., Gascon F., Demarez V., Lefevre M.-J., Guillevic P., Benech N., and Mathiaud V., 2000. DART: a 3-D model of satellite images and surface radiation budget,...???
32. Gaussorgues G., 1972. *La thermographie infrarouge : principes, technologies, applications*. Lavoisier TEC&DOC Editeurs, 3^{ème} éditions, Paris, France, 540 p.
33. Glassner A.S., Arvo J., Cook R.L., Haines E., Hanrahan P., Heckbert P., Kirk D.B., 1989. *An Introduction to Ray Tracing*, Academibn Press, London UK, ISBN 0-12-286160-4, 329 p.
34. Guillevic P., 1999. *Modélisation des bilans radiatif et énergétique des couverts végétaux*. Thèse de Doctorat, Université P. Sabatier, Toulouse, France, 181 p.
35. Guyon E., Hulin J.-P., Petit L., 1991. Hydrodynamique physique. *InterEditions / Editions du CNRS*, ISBN 2-7296-0255-0 et 2-222-04025-6, France.
36. Guyot G., 1992. Signatures spectrales des surfaces naturelles. Collection Télédétection Satellitaire. Editeur Paradigme, Caen, France, 178 p.
37. Hanrahan, P., Salzman, D., and Aupperle, L., 1991. A rapid hierarchical radiosity algorithm, *Computer Graphics, SIGGRAPH'91 Proceedings*, **25**, (4), pp. 197-206.
38. Hapke B., 1984. Bidirectional reflectance spectroscopy, Correction for macroscopic roughness, *Icarus* **59**, pp. 41-59.

39. Heckbert P.S., 1992. Discontinuity Meshing for Radiosity, *Proceedings of the third Eurographics Workshop on Rendering*, pp. 203-216.
40. Idso S.B., Jackson R.D., 1969. Thermal radiation from the atmosphere, *Journal of Geophysical Research*, **74**, pp. 5397-5403.
41. Jakob M., 1949. *Heat transfer*. Wiley, **1&2**, USA, 1410 p.
42. Jaloustre-Audoïn K., 1998. *SPIRou : Synthèse de Paysage en InfraRouge par modélisation physique des échanges à la surface*, Thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, Nice, France, 169 p.
43. Jaloustre K., Savaria E., Wald L., 1997. Synthesized outdoor scenes in infrared spectral band. *Proceedings of the EARSeL Symposium*, Malte.
44. Jaloustre K., Savaria E., Wald L., 1996. Un outil de synthèse de paysages en infrarouge par modélisation physique des échanges à la surface. Colloque international Optronique et Défense, classifié OTAN, Association Aéronautique et Astronautique Française, Paris, 35 décembre 1996.
45. Johnson K., Curran A., Less D., Levanen D., Marttila E., Gonda T., Jones J., 1998. MuSES: A New Heat and Signature Management Design Tool for Virtual Prototyping, *Proceedings of the 9th Annual Ground Target Modelling & Validation Conference*, Houghton, MI.
46. Kneizys F.X., Shettle E.P., Gallery W.O., Chetwind J.H., Abreu L.W., Selby J.E., Clough S.A., Fenn R.W., 1988. *Atmospheric transmittance/radiance: computer code LOWTRAN 7* (AFGL-TR-88-0177), Hanscom AFB Massachusetts, Air Force Geophysics Laboratories, USA.
47. Koenderink J.J., van Doorn A.J., Stavridi M., 1996. Bidirectional reflection distribution fonction expressed in terms of surfaces scattering modes, *European Conference on Computer Vision*, pp. 28-39.
48. Korb A. R., Salisbury J.W., D'Aria D.M., 1999. Thermal-infrared remote sensing and Kirchoff's law. 2. Fields measurements. *Journal of Geophysical Research*, **104**, pp. 15,339-15,350.
49. Laurini R., Thompson D., 1992. *Fundamentals of Spatial Information Systems*, Academic Press, Londre.
50. Li H., Shen P, Wu C., 1999. A new system of the real time infrared scene simulator-system architecture and software design, *SPIE Proceedings Series*, **3697**, pp. 316-321.
51. Lischinski D., Tampieri F., Greenberg D.P., 1992. Discontinuity Meshing for Accurate Radiosity, *IEEE Computer Graphics & Applications*, **12** (6), pp. 25-39.
52. Louis J.-F., 1979. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary Layer Meteorology*, **17**, pp. 187-202.
53. Marion A., 1997. *Acquisition & visualisation des images*, Editions Eyrolles, Paris, ISBN 2-212-08871-X, 616 p.
54. Maguire D.J., Goodhild M.F., Rhind D.W., 1991. *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, Longman, Harlow, U.K..
55. Minghelli A., 1999. *Apport et perspectives de l'imagerie hyperspectrale pour la télédétection des paysages naturels agricoles*, Thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, Nice, France, 185 p.

56. Mitchell A.R., et Griffiths D.F., 1980. *The finite difference method in partial differential equations*, Wiley Intersciences Publications, ISBN 0-471-27641-3, 272 p.
57. Neyret F., 1996. *Textures volumiques pour la synthèse d'images*, Thèse de Doctorat, Université de Paris IX, Paris, France, 176 p.
58. Nicodemus F.E., Richmond J.C., Hsia J.J., 1977. *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*, NBS Monograph 160, U.S. National Bureau of Standards, Washington, D.C.
59. Noilhan J., et Planton S., 1989. A simple parametrization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Reviews*, **117**, pp. 536-549.
60. Noilhan J., et Mahfouf J.F., 1996. The ISBA land surface parametrization scheme. *Global and planetary Change*, **13**, pp. 145-159.
61. Norman J.M., Welles J.M., Walter E.A., 1985. Contrasts among bidirectional reflectance of leaves canopies, and soils, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **23** (5), pp. 659-677.
62. Norman J.M., et Becker F., 1995. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, **77**, pp. 153-166.
63. Olseth A.J., Skartveit A., Czeplak G., Rommel M., 1994. *Review and test of parametrizations of atmospheric radiation*. A technical report of task 17. Measuring and modelling spectral radiation affecting solar systems and buildings. December 1994, International Energy Agency. Report n° IEA SHCP 17F 2, 124 p.
64. Oren M., et Nayar S.K., 1996. Generalization of the lambertian model and implications for machine vision, *International Journal of Computer Vision*, **14** (3), pp. 227-251.
65. Ortega-Farias S., Antonioletti R., Oliosio A., 2000. Net radiation model evaluation at an hourly time step for mediterranean conditions, *Agriculture and Environment*, **20**, pp. 157-164.
66. Palmer J.M., 1995. The measurement of transmission, absorption, emission and reflection, In *Handbook of Optics, Devices, Measurements, & Properties*, Second Edition, M. Bass Editor, ISBN 0-07-047974-7, chapitre 25, **2**, 25 p.
67. Perrin de Brichambaut C., Vauge C., 1982. *Le gisement solaire, évaluation de la ressource énergétique*. Technique et Documentation (Lavoisier), ISBN 2-85206-168-6, Paris, France, 224 p.
68. Petit Robert, 1984. ISBN 2-85036-066-X.
69. Petit Larousse illustré, 1991, ISBN 2-03-301191-7.
70. Pitteway M.L.V., Watkinson D.J, 1980. Bresenham's algorithm with gray scale, *CACM*, **23**, pp. 625-626.
71. Poglio T., Savaria E., Wald L., 2001a. Influence of the three-dimensional effects on the simulation of landscapes in thermal infrared, *Proceedings of the 21st EARSeL Symposium « Observing our environment from Space: new solutions for a new millenium »*, Marne-la-Vallée, France, Bégni (Ed.), © 2002 Swets & Zeitlinger, Lisse, the Netherlands, ISBN 90-5809-254-2, pp.133-139.
72. Poglio T., Ranchin T., Savaria E., Wald L., 2001b. Simulation d'images dans l'infrarouge thermique par approche synthétique : spécifications et architecture fonctionnelle, *Actes de la Journée thématique « Coopération Analyse d'Image et Modélisation »*, LIGIM, Université Claude Bernard Lyon 1, pp. 58-61.

73. Poglio T., Savaria E., Wald L., 2001c. Specifications and conceptual architecture of a thermal infrared simulator of landscapes, *Proceedings SPIE (EUROPTO) « Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites V »*, Toulouse, France, Hiroyuki Fujisada, Joan B. Lurie, Konradin Weber, Editors, © 2001 SPIE, **4540**, pp. 488-497.
74. Poglio T., Savaria E., Wald L., 2002a. Outdoor scene synthesis in the infrared range for remote sensing applications, *Proceedings of the International Conference on Imaging Science, Systems, and Technology*, Hamid R. Arabnia et Youngsong Mun Editors, © CSREA Press, ISBN 1-892512-93-9, Las Vegas, U.S.A., **1**, pp. 206-212.
75. Poglio T., Savaria E., Wald L., 2002b. OSIRIS: a simulator of outdoor scenes in thermal infrared range, à paraître dans les proceedings de la conférence ISPRS, commission III, Graz, Autriche.
76. Press W.H., Flannery B.P., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., 1989. *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press.
77. Rigollier C., Bauer O., Wald L., 2000. On the clear sky model of the ESRA - European Solar Radiation Atlas - with respect to the Heliosat method. *Solar Energy*, **68**, (1), pp. 33-48.
78. Rogers, D.F., 1998. *Procedural Elements for Computer Graphics*, Second Edition, McGraw-Hill, ISBN 0-07-053548-5, 712 p.
79. Roujean J.L., 1991. Modélisation des effets bidirectionnels de la réflectance pour la normalisation des données satellitaires de télédétection, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, France.
80. Roujean J., Leroy M., Deschamps P., 1992. A bidirectional reflectance model of the earth's surface for correction of remote sensing data, *Journal of Geophysical Research*, **97**, pp. 20,455-20,468.
81. Rusinkiewicz S., 1997. A survey of BRDF representation for computer graphics, CS348c, <http://www.cs.princeton.edu/~smr/cs348c-97/>, 9 p.
82. Salisbury J.W., Wald A., D'Aria D.M., 1994. Thermal-infrared remote sensing and Kirchoff's law. 1. Laboratory measurements. *Journal of Geophysical Research*, **99**, pp. 11,897-11,911.
83. Schröder P., et Hanrahan P., 1993. On the form factor between two polygons. *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series: SIGGRAPH'93* (Anaheim, CA), 163-164.
84. Shewchuk J.R., 1996. Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator, First ACM Whorshop on Applied Computational Geometry, Philadelphia, pp. 124-133.
85. Shewchuk J.R., 2001. Triangle. A two-dimensional quality mesh generator and Delaunay triangulator. Version 1.3, Octobre 2001, <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.research.html>.
86. Shewchuk J.R., 2002. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation, ACM Symposium on Computational Geometry, ISSN 0925-7721, pp. 21-74.
87. SIAMES, 1999. Projet SIAMES, Synthèse d'Images, Animation, Modélisation et Simulation, Rapport d'activités de l'INRIA Rennes, 47 p.
88. Sillion F.X., et Puech C., 1994. *Radiosity & global illumination*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., ISBN 1-558-60277-1, San Francisco, CA, U.S.A., 251 p.
89. Simoneau P., Berton R., Caillault K., Durand G., Huet T., Labarre L., Malherbe C., Miesch C., Roblin A., Rosier B., 2001. MATISSE : Advanced Earth Modeling for Imaging and Scene

- Simulation, *Proceedings SPIE (EUROPTO) « Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems IV »*, Toulouse, France, © 2001 SPIE, **4538**, pp. 39-48.
90. Snyder W.C., et Wan Z., 1998. BRDF models to predict spectral reflectance and emissivity in the thermal infrared, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **36** (1), pp. 214-225.
 91. Stewart A.J., et Ghali S., 1994. Fast Computation of Shadow Boundaries Using Spatial Coherence and Backprojections, *Computer Graphics, SIGGRAPH'94*, pp. 231-238.
 92. Swinbank W.C., 1963. Longwave radiation from clear skies, *Q. J. R. Meteorological Research*, **89**, pp. 339-348.
 93. Taconet O., 1988. Complémentarité de l'infrarouge thermique et de l'hyperfréquence pour l'étude du bilan hydrique. Télédétection spatiale : aspects physiques et modélisation, Cepadues-Editions, Toulouse, France, 1031 p.
 94. Tampieri F., et Lischinski D., 1991. The Constant Radiosity Assumption Syndrome, *Proceedings of the Second Eurographics Workshop on Rendering*, Barcelone, Espagne.
 95. Teller S., et Hanrahan P., 1994. Global visibility algorithms for illumination computations, *Computer Graphics, SIGGRAPH'94*, pp. 443-450.
 96. Verhoef W., 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: the sail model, *Remote Sensing of Environment*, **16**, pp. 125-141.
 97. VRML⁹⁷, 1997. The Virtual Reality Modeling Language, International Standard ISO/IEC 14772-1:1997.
 98. Wallace J.R., Kells A., Elmquist K.A., et Haines E.A., 1989. A ray tracing algorithm for progressive radiosity, *Computer Graphics, SIGGRAPH'89*, **23**, pp. 315-324.
 99. Walthall C.L., Norman J.M., Welles J.M., Campbell G., Blad B.L., 1985. Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces, *Applied Optics*, **24** (3), pp 383-387.
 100. Wanner W., Li X., Strahler A., 1995. On the derivation of kernels for kernel-driven models of bidirectional reflectance, *Journal of Geophysical Research*, **100**, pp. 21,077-21,089.
 101. Watt A. H., 2000. *3-D Computer Graphics*, Third Edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc, ISBN 0-201-39855-9.

SYNTHESE DE PAYSAGES DANS L'INFRAROUGE THERMIQUE POUR LA SIMULATION D'IMAGES DE TELEDETECTION

Résumé

Dans l'infrarouge thermique, des simulateurs de systèmes d'acquisition d'images existent déjà chez les industriels. Leur fonctionnement nécessite la connaissance de nombreux paramètres, dont celle du paysage à observer. Or, ce paysage doit lui-même être simulé. Du fait de la complexité de son comportement, peu de simulateurs de paysages ont été développés.

Cette thèse tente de pallier à ce manque, en proposant une méthode de simulation adaptée à l'imagerie à haute résolution spatiale dans l'infrarouge thermique. Un simulateur a été conçu et développé. A l'aide d'une modélisation physique du comportement thermique et spectral du paysage, une classification des contributions des différents phénomènes physiques a pu être établie. Une simulation autorisant un haut degré de détails passe notamment par l'analyse et la prise en compte des phénomènes physiques à petite échelle (conduction, perturbations de l'écoulement du vent, ...) et à trois dimensions (ombrage, réflexions, ...) et implique la modélisation fine de ces phénomènes.

L'originalité de la thèse réside dans la création d'une méthode de simulation, basée sur la radiativité, et adaptée à la synthèse d'images dans l'infrarouge thermique. Le paysage est modélisé à l'aide d'entités, les *éléments*, permettant de prédire précisément le signal provenant du paysage. Ces éléments sont compatibles avec les exigences matérielles informatiques qui imposent des limitations de temps de calcul et de ressources mémoires. Ils résultent de la concaténation des contraintes imposées par la géométrie des objets, par leur constitution (matériaux), et par la prise en compte de l'évolution temporelle des différents phénomènes physiques qui régissent le comportement du paysage. Ces éléments constituent une extension volumique et temporelle des facettes, entités communément utilisées pour la synthèse d'images dans les courtes longueurs d'onde. Des images obtenues en utilisant les éléments et le simulateur développé sont présentées dans la thèse.

Mots clés : Infrarouge, modélisation, synthèse d'images, température, haute résolution spatiale, télédétection

SYNTHESIS OF LANDSCAPE IN THE THERMAL INFRARED RANGE FOR THE SIMULATION OF REMOTE SENSING IMAGES

Abstract :

Companies have already developed simulators of the image acquisition system in the thermal infrared range. Operating these simulators requires the knowledge of numerous parameters, including the landscape to observe. This landscape has to be simulated, a great difficulty because of the complexity of its behaviour. It follows that few simulators of landscapes were developed.

This thesis palliates this shortcoming. A method is proposed that simulates images having high spatial resolution in the infrared range. A simulator has been designed and developed. Using a thermal and spectral modelling of the behaviour of the landscape, a classification of the different physical phenomena intervening in the signal was made. A very high accuracy in simulation is obtained by the means of the analysis and the computation of physical phenomena occurring at small scale (heat conduction, wind flow disturbance,...) and in three dimensions (shadows, reflections,...). A fine modelling of such processes is required.

The originality of the thesis is the design of a method adapted to the synthesis of image in the infrared range. The method is based on radiosity. The landscape is modelled by the means of *elements*, that are entities permitting the prediction of the signal coming from the landscape. These elements are consistent with computational resource requirements: computation time and memory performance. They come from the concatenation of all constraints due to the geometry of the objects, their constitution (material), and the impact of the evolution of all physical phenomena in the landscape behaviour. These elements are a volume and temporal extension of facets, entity usually used in image synthesis for shorter wavelengths. Images obtained using such elements and the simulator are presented in the thesis.

Key words : Infrared, modelling, image synthesis, temperature, high spatial resolution, remote sensing application

Laboratoire d'accueil : Centre d'Energétique - Ecole des Mines de Paris
Rue Claude Daunesse - B.P. 207 - F-06904 Sophia Antipolis Cedex

Thèse présentée par : POGGIO Thierry **le :** 7 novembre 2002

Discipline : " Sciences de l'Univers " – Université de Nice - Sophia Antipolis
