



HAL
open science

Modélisation de la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface pour un sol homogène avec relief

Valentina Tadé

► **To cite this version:**

Valentina Tadé. Modélisation de la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface pour un sol homogène avec relief. Autre. Université de Provence - Aix-Marseille I, 2004. Français. NNT: . tel-00084669

HAL Id: tel-00084669

<https://theses.hal.science/tel-00084669>

Submitted on 10 Jul 2006

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

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

UNIVERSITÉ DE PROVENCE

(Aix-Marseille I)

École Polytechnique Universitaire de Marseille

Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels

CNRS UMR 6595

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE PROVENCE

Discipline : **MÉCANIQUE ÉNERGÉTIQUE**

**ÉCOLE DOCTORALE : PHYSIQUE, MODÉLISATION ET SCIENCES
POUR L'INGÉNIEUR**

Présentée et soutenue publiquement par

Valentina TADÉ

le 13/12/2004

**Modélisation de la variabilité spatiale et
temporelle de la température de surface
pour un sol homogène avec relief**

Directeur de thèse :

J. C. LORAUD

JURY :

P. BARILLOT	Ingénieur de Recherche à l'ONERA Salon-de-Provence
J. H. BALBI	Professeur à l'Université Pascal Paoli (Rapporteur)
M. IMBERT	Professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (Rapporteur)
J. C. LORAUD	Professeur à l'Université de Provence
R. MARTIN	Professeur à l'Université de Provence
J. PANTALONI	Professeur à l'Université de Provence
Invité :	
LCL RÉ	Commandant en chef de la Division d'Instruction Scientifique et Technique de l'École de l'Air

*À essayer de vivre comme si de rien n'était
on se fait un beau jour rattraper par la marée*

Christophe Miossec

Avant-propos

Ce travail de thèse a été financé par l'École de l'Air de Salon-de-Provence, et a été réalisé en collaboration entre l'École de l'Air, le centre ONERA (Office National d'Études et Recherches Aérospatiales) de Salon-de-Provence et le laboratoire IUSTI (Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels) de Marseille.

Je me suis intégrée, au sein de l'École de l'Air, dans le Département Automatique et Systèmes, dirigé par le Capitaine Benoit puis par le Capitaine Fabienne Folin, de la Division d'Instruction Scientifique et Technique, commandée par le Lieutenant-Colonel Grosset puis par le Lieutenant-Colonel Ré. J'y ai dispensé des enseignements, essentiellement en informatique, pour les élèves de l'École de l'Air, de l'École Militaire de l'Air et du Cours Spécial de l'École de l'Air.

À l'ONERA, j'ai fait partie de l'unité Modélisation de dispositifs optroniques et Validations Associées, dirigée par Philippe Sagnier, du Département d'Optique Théorique et Appliquée. Mon travail a été encadré par Philippe Barillot, ingénieur de l'unité MVA, et par Christophe Miesch, ingénieur de l'unité Qualification d'instruments opérationnels et données thermo-optiques du centre ONERA de Toulouse.

À l'IUSTI j'ai fait partie du département Mécanique Énergétique de Polytech'Marseille, dirigé par le Professeur Roger Martin. Ma thèse a été dirigée par le Professeur Jean-Claude Loraud, responsable de l'équipe Écoulements Diphasiques et Réactifs.

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier Guillaume, pour son aide technique et surtout pour m'avoir soutenue, réconfortée, encouragée et pour avoir cru en moi dès le début de cette thèse.

Je remercie Michel Imbert et Jacques-Henri Balbi pour avoir bien voulu relire mon manuscrit. Merci également à Roger Martin, à Jacques Pantaloni, et au Lieutenant-Colonel Ré pour avoir bien voulu participer à mon jury de thèse.

Je voudrais ensuite remercier Jean-Claude Loraud, qui a dirigé ma thèse et m'a apporté jusqu'au bout aussi bien une aide technique qu'un soutien moral indéfectible.

Je remercie Philippe Barillot d'avoir encadré une grande partie de mon travail au centre de l'Office National d'Études et Recherches Aérospatiales de Salon-de-Provence. Merci également à Christophe Miesch, du centre ONERA de Toulouse, pour sa contribution à l'encadrement de mon travail, pour ses bonnes idées et pour ses critiques toujours constructives.

Je remercie le Lieutenant-Colonel Grosset et le Lieutenant-Colonel Ré pour leur accueil au sein de la Division d'Instruction Scientifique et Technique de l'École de l'Air. Merci également au Capitaine Benoit et au Capitaine Folin, chefs successifs du Département Automatique et Systèmes dans le cadre duquel j'ai dispensé mes enseignements, pour notre collaboration fructueuse.

Merci à Cécile, Stéphane, Sabine et Florent pour les bons moments passés à encadrer les travaux dirigés de programmation et pour nos discussions, en dehors ou pendant les cours.

Un grand merci à Patrick Fromage, pour son efficacité et son aide lors de ma campagne expérimentale, et pour son décryptage éclairé du fonctionnement de l'Office. Merci à Jacques Dulost d'avoir été mon guide dans l'univers hostile de MATLAB, et d'avoir contribué à m'ouvrir les yeux sur le monde de l'entreprise. Merci à Jean-Claude Krapez pour son aide lors de la phase de modélisation de ma thèse. Merci également à Stéphane Barbé pour sa participation plus qu'active au bilan d'erreur de mes mesures expérimentales. Merci aussi à Alain Lesain pour sa promptitude et son efficacité à résoudre mes problèmes informatiques.

Merci à Olivier et Laurent pour leurs précieuses connaissances sur Tecplot. Merci pareillement à Florian, Jérémy, Sophie et Thomas pour leur maîtrise et nos recherches sur des manœuvres \LaTeX extrêmement complexes et périlleuses. Merci à Gary pour ses excellentes corrections sur mon résumé de thèse en langue Britannique. Un grand merci à Sophie et Stéphanie pour le soutien mutuel que nous nous sommes toutes les trois porté durant nos thèses.

Merci à Olivier, Jérémy, Laurent, Stéphanie, Sophie, Gary et Thomas pour les interminables pauses thé passées à refaire le monde ou à parler de la qualité de la neige au Collet d'Allevard le week-end dernier. Merci également à Florian pour nos échanges d'idées, rares mais intenses, et pour son soutien moral d'ancien thésard qui a déjà vécu ça.

Merci à Laurent pour son soutien, ses encouragements et son réconfort aux moments où il était là.

Merci à mes parents d'avoir supporté mon humeur parfois exécrable et mes moments de faiblesse, et d'avoir toujours cru, bien plus que moi, en mon succès. Et enfin, merci à tous les gens que je n'ai pas cités et qui, de près ou de loin, ont contribué à la fin heureuse de ce travail.

Résumé :

Cette étude traite de la simulation de la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface pour des sols avec relief. L'approche 1D développée pour les modèles simplifiés consiste à exprimer la température en un point de la surface du sol avec relief comme une combinaison d'une température "ombre" et d'une température "soleil" du sol équivalent plat horizontal. Les phénomènes prépondérants de la variabilité de la température sont isolés par la réalisation de mesures en extérieur sur une maquette (en plâtre) à profil sinusoïdal. Les mesures obtenues permettent de valider le code thermique 3D de référence. Différents modèles analytiques 1D sont développés et validés par rapport à ce code. L'application de la méthode "ombre/soleil" par passage dans l'espace de Fourier conduit à une bonne concordance entre le modèle et la solution de référence 3D.

Mots-clés :

température de surface, variabilité spatiale, variabilité temporelle, sol périodique, relief, modèle analytique, mesures, espace de Fourier, infrarouge, thermique.

Abstract :

This study deals with the simulation of the spatial and temporal variability of surface temperature for grounds with relief. The developed 1D approach of the simplified model expresses the temperature of a point by a combination of the "shadow" and "sun" temperatures of a corresponding horizontal flat soil. The phenomena dominating the temperature variability was demonstrated by measurements made over a model (made of plaster) with a sinusoidal profile. The results allow us to validate the 3D thermal code. Several analytical 1D models are developed and validated with this 3D code. Applying the "sun/shadow" method through the Fourier domain leads to a good agreement between the model and the 3D reference solution.

Key words :

surface temperature, spatial variability, temporal variability, periodic profile, relief, analytical modeling, measures, Fourier domain, infrared, thermal.

Modélisation de la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface pour un sol homogène avec relief

Table des matières

1	Introduction	1
2	État de l'art	5
2.1	Obtention de la luminance issue d'une scène	6
2.2	Modèles d'éclairément et codes de transmission	8
2.2.1	Modèles de flux atmosphérique	8
2.2.2	Les modèles de flux solaire	9
2.2.3	Les codes de transmission atmosphérique	12
2.3	Variabilité spatiale et temporelle de la température de surface	12
2.3.1	Température d'un sol plat	13
2.3.2	Température d'un sol avec relief	17
2.3.3	Principales conclusions sur la variabilité de la température de surface	25
2.4	Modèles physiques	26
2.4.1	Température de l'air	27
2.4.2	Coefficient d'échange convectif	28
2.5	Codes de simulation de scènes	29
2.5.1	Le code SHIPIR [VF99]	30
2.5.2	Le code USAF-TDA	30
2.5.3	GMGO Background model "CANOPY"/"ROAD"	30
2.5.4	Le code IGADS	31
2.5.5	Le code PRISM [SR88]	31
2.5.6	Le code GENESSIS	32
2.5.7	Le code SensorVision [DW01]	32
2.5.8	Le code GTVISIT	33
2.5.9	Le code DIRSIG [SBVS95]	34
2.5.10	Le code "Paint the Night" [VS97]	34
2.6	Vue d'ensemble	35
3	Le code MISTRAL	37
3.1	Architecture du code	38
3.2	Maillage géométrique	38
3.3	Module d'éclairément	40
3.3.1	Calcul de la sphère d'éclairément	40
3.3.2	Entrées / sorties	41
3.4	Module thermique	42
3.4.1	Résolution thermique	43
3.4.2	Résolution numérique	46
3.4.3	Architecture et résultats	47
3.5	Le module de luminance	48

3.6	Améliorations fonctionnelles et validation	49
3.6.1	Maillage géométrique	49
3.6.2	Température de l'air	50
3.6.3	Vitesse du vent	50
3.6.4	Apports	51
3.7	Conclusion	53
4	Conception et réalisation de la campagne expérimentale	55
4.1	Dimensionnement de la maquette	55
4.1.1	Choix du profil géométrique de surface	56
4.1.2	Sélection du matériau	57
4.1.3	Détermination des dimensions	59
4.1.4	Isolation de la face inférieure	62
4.1.5	Choix de l'émissivité de surface	63
4.1.6	Orientation des crêtes	64
4.1.7	Dispositif final choisi	65
4.2	Réalisation de la maquette	65
4.2.1	Choix du plâtre	66
4.2.2	Densité et séchage du plâtre	67
4.2.3	Conception	68
4.3	Dispositif expérimental	70
4.4	Analyse de l'erreur en température	72
4.4.1	Bilan d'erreur	72
4.4.2	Incertitude relative	77
4.4.3	Effet thermique de bord	79
4.4.4	Répétitivité du motif	79
4.4.5	Principales remarques	80
4.5	Mesures et analyses	80
4.5.1	Mesures retenues pour la validation : campagne du 1er octobre 2002 . . .	80
4.5.2	Résultats complémentaires : campagnes de septembre et d'octobre 2002 .	85
4.5.3	Principales conclusions	92
5	Validation du code MISTRAL	93
5.1	Définition des outils mathématiques d'analyse	93
5.1.1	Rééchantillonnage des données météorologiques	94
5.1.2	Moyennes et écarts	94
5.2	Étude des paramètres numériques	96
5.2.1	Cas de référence	97
5.2.2	Convergence numérique temporelle	97
5.2.3	Influence du pas de temps de calcul	98
5.2.4	Influence du maillage	100
5.2.5	Choix des paramètres numériques	104
5.3	Comparaisons aux mesures	105
5.3.1	Initialisation des données numériques de simulation	105
5.3.2	Comparaisons mesures/simulations	106
5.4	Synthèse de la validation de MISTRAL	110

6	Elaboration de modèles simplifiés de température de surface	111
6.1	Identification des phénomènes prépondérants	112
6.1.1	Cas de référence	112
6.1.2	Émissivité de surface	113
6.1.3	Constantes thermiques	115
6.1.4	Température de l'air	118
6.1.5	Vitesse du vent	122
6.1.6	Coefficient de convection	124
6.1.7	Paramètres dominant la variabilité spatiale des températures de surface	126
6.1.8	Influence du rayonnement solaire	128
6.1.9	Rôle de l'incidence solaire	129
6.2	Principe et mise en œuvre directe de la méthode ombre/soleil	131
6.2.1	Cas de référence	132
6.2.2	Principe de la méthode	133
6.2.3	Calcul de $T_{soleil}(t)$ et $T_{ombre}(t)$ par le code MISTRAL	134
6.2.4	Décomposition de la température de surface sous forme binaire	135
6.2.5	Modélisation de la fonction $a(x, t)$	136
6.2.6	Introduction du terme angulaire	138
6.3	Approche quadripolaire adaptée à la méthode ombre/soleil	141
6.3.1	Principe de l'approche quadripolaire	141
6.3.2	Adaptation à la méthode ombre/soleil	142
6.3.3	Première application	145
6.3.4	Amélioration de la méthode ombre/soleil	145
6.4	Bilan des modélisations proposées	152
7	Conclusion	155
	Références bibliographiques	158
	Annexes	163
A	Outils géostatistiques	165
A.1	Le variogramme	165
A.2	Le <i>krigeage</i>	166
B	Représentation numérique des textures de surface	169
B.1	Détermination des surfaces visibles d'une image	169
B.2	Placage de texture	171
B.3	Autres méthodes	171
C	Concept de texture thermique	173
C.1	Utilisation des textures thermiques	173
C.2	Une approche	174
D	Entrées du code MISTRAL	177
D.1	Fichier d'entrée du maillage géométrique	177
D.2	Initialisation des données physiques	178
D.2.1	Fichier d'entrée : <code>Data_Mistral</code>	178
D.2.2	Paramètres <i>MODTRAN</i> pour le calcul des éclaircissements	180

D.3 Exemple de fichier météorologique	181
E Résolution de l'équation de la chaleur par décomposition LU et méthode MSIP	183
F Fabrication et instrumentation de la maquette	185
F.1 Essais de démoulage	185
F.2 Essais d'implantation des sondes	185
F.3 Fabrication de la maquette	186
G Instruments de mesure	189
G.1 Sondes de température	189
G.1.1 Le thermocouple de type K	189
G.1.2 Étalonnage des thermocouples	190
G.2 Centrale d'acquisition	191
G.3 Station météorologique	191
G.4 Caméra infrarouge	192
G.5 Chaîne de mesure	193
H Résultats expérimentaux complémentaires : campagne de mesure d'août	195
I Coefficients des polynômes de la fonction $a_2(x, t)$	199
J Méthode des quadripôles	201

Chapitre 1

Introduction

Les images de synthèse sont de plus en plus répandues dans tous les domaines. Dans la publicité, le cinéma, les jeux vidéo, ou en architecture pour la reconstitution d'anciens monuments, les générateurs d'images synthétiques permettent de créer une réalité virtuelle, qui n'est pas forcément réaliste. Lorsqu'il existe une recherche de réalisme dans les images synthétiques, le terme de *simulation* est préféré. Dans des domaines aussi primordiaux que l'écologie, la météorologie, l'aéronautique, l'espace ou la défense, des simulateurs sont utilisés, pour produire des images non seulement dans le visible mais aussi dans d'autres gammes du spectre, comme l'infrarouge. Les images produites servent ensuite à la prédiction ou à l'étude de phénomènes, évitant ainsi des essais réels qui peuvent être aussi bien coûteux que dangereux (par exemple l'élaboration de caméras thermiques, l'étude des effets d'une explosion nucléaire, les mouvements d'une nappe de pétrole à la surface de l'océan, ou encore la simulation du guidage d'un missile vers sa cible). La génération d'images dans le visible est maintenant bien maîtrisée par les infographistes et les physiciens, et permet un niveau de détail très satisfaisant. Mais la simulation dans l'infrarouge est un problème plus délicat parce que d'autres facteurs entrent en jeu. Ces facteurs sont complexes à modéliser, et il est par conséquent difficile de générer des images infrarouges réalistes avec le même niveau de détail que dans le visible.

La simulation d'une scène dans le domaine visible requiert la connaissance des flux réfléchis par ses différents objets, tandis que la simulation de cette même scène dans l'infrarouge nécessite en plus la connaissance des flux rayonnés. Pour calculer ces flux rayonnés il faut connaître à la fois les températures de surface et les paramètres optiques. Leur maîtrise s'avère souvent complexe, par la grande variété tant des scènes que des matériaux qui les composent, et par la difficulté de caractérisation de ceux-ci.

Il existe beaucoup de modèles ayant conduit à des codes de simulation infrarouge. Ces simulateurs produisent des images à des résolutions très diverses, allant du kilomètre à une échelle inférieure au mètre. Les modèles thermiques présents dans ces simulateurs considèrent tous des transferts monodimensionnels (1D) : ils ne prennent pas en compte les transferts thermiques latéraux et se limitent à modéliser les flux conductifs dans le sens vertical. À de grandes échelles (de l'ordre du kilomètre), l'hypothèse 1D est tout à fait suffisante car les variations sont fortement dominées par le signal moyen. À l'échelle du mètre, les simulateurs IR arrivent également à produire des images en luminance d'une bonne précision qualitative, mais la plupart du temps ils reproduisent assez mal la non uniformité (bruit) en luminance et l'inhomogénéité des températures de surface. L'hypothèse de transferts thermiques 1D ne permet donc plus de restituer correctement les variations spatiales des températures de surface.

Des études de cette variabilité, provenant essentiellement du domaine agronomique, ont été menées pour des sols plats ainsi que pour des sols présentant des reliefs. Les premières

([UW92, PW91] parmi d'autres) montrent une forte variabilité spatiale des températures de surface : jusqu'à la dizaine de Kelvin, ces écarts étant principalement dus à l'inhomogénéité des constituants. Des études complémentaires ([SB57, Bur63, Mah82]) montrent que cette variabilité peut être plus grande encore lorsque les surfaces présentent un relief.

L'importance de la variabilité des températures de surface pour les sols plats ou avec relief est donc primordiale, car mal l'évaluer peut entraîner de grandes erreurs sur l'estimation de la température de surface. Ces erreurs peuvent à leur tour engendrer des erreurs encore plus importantes sur les luminances, selon la bande spectrale des images IR. Malgré cela, aucune technique de simulation IR ne dispose d'une modélisation physique de cette variabilité. Certains codes de simulation IR font appel à des artefacts numériques – tel le "placage de texture" – pour rendre les températures en surface non uniformes, et ainsi donner l'illusion de la variabilité spatiale. Mais la plupart du temps ces textures n'ont pas pour origine une modélisation physique : elles contribuent uniquement à l'aspect visuel des scènes. De plus, il n'existe à notre connaissance aucune modélisation simple reposant sur des principes physiques de cette variabilité.

Un moyen de rendre compte des variations de températures de surface tenant compte des variations de géométrie de surface est l'emploi de modèles de transfert tridimensionnels (3D). Le code MISTRAL (Modélisation Infrarouge de Scènes Terrestres RéAListes), développé à l'ONERA (Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales), comporte un modèle thermique capable de calculer les températures d'une scène en 3D puis de produire une image en luminance en entrée capteur. Mais les calculs 3D sont beaucoup plus complexes à développer, et sont également prohibitifs en temps de calcul.

Pour ces raisons, nous avons choisi dans ce travail d'améliorer la représentation en température d'une surface avec relief, d'abord en identifiant les origines de la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface pour des sols avec relief, puis en proposant des approches physiques simples afin de la modéliser.

La démarche que nous avons suivie dans ce travail pour remplir ces objectifs a comporté trois étapes. La première a été la réalisation de mesures expérimentales de températures de surface sur une géométrie complexe en environnement extérieur réel. La géométrie de surface est un profil périodique bidimensionnel. Il apparaît en effet essentiel d'améliorer la compréhension des phénomènes en 2D avant d'ajouter une dimension à la complexité du problème. La campagne expérimentale a été menée pour deux raisons. Tout d'abord, l'observation des résultats obtenus nous a permis de mieux appréhender les phénomènes physiques intervenant dans la variabilité spatiale et temporelle des températures de surface, et d'avoir une idée plus précise des paramètres physiques et météorologiques la dominant. Ensuite, cette campagne de mesures nous a permis de collecter une banque de données de températures, pour la validation ultérieure du code de référence et des modèles de température de surface.

La seconde étape de notre démarche a été la validation du code MISTRAL. Elle a été réalisée à l'aide des mesures obtenues lors de la campagne expérimentale, et nous a permis d'établir MISTRAL comme code de référence. À l'issue de cette validation, nous avons donc pu disposer d'un code de simulation permettant des configurations autres que celle utilisée lors des mesures.

La dernière étape a été le développement de modèles simplifiés de température de surface pour des sols avec relief. Dans un premier temps, les paramètres dominant la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface ont été isolés grâce à l'analyse bibliographique, aux observations expérimentales, et à l'étude paramétrique du code MISTRAL. Dans un second temps, des modélisations des températures de surface ont été mises en œuvre, directement fondées sur les conclusions précédentes. L'idée directrice pour décrire de manière simple l'évolution de la température en surface d'un sol homogène de relief quelconque est que cette température peut être déterminée à partir de la connaissance de deux températures de surface pour un sol

plat horizontal : une température pour un sol au soleil, et une pour le même sol à l'ombre. Cette approche est appelée *ombre/soleil*. Trois modélisations fondées sur ce principe ont pu être testées. Ensuite, afin d'améliorer les résultats obtenus et de pouvoir généraliser le calcul, cette approche a été appliquée à travers deux nouveaux modèles faisant appel au domaine de Fourier.

Afin d'accompagner notre démarche, ce document s'articule autour de quatre parties principales. Tout d'abord, les outils bibliographiques et numériques sont décrits. Un état de l'art de la modélisation de la température de surface et de sa variabilité est présenté ; ensuite une analyse des codes de simulation et de leurs modèles thermiques est réalisée afin d'identifier les points forts et les lacunes de la simulation d'images IR. Par la suite, la conception et la réalisation de la campagne expérimentale sont exposées, ainsi que l'analyse des mesures des températures de surface. À l'aide de ces mesures, le code MISTRAL est ensuite validé comme code de référence. Enfin, le dernier chapitre présente les différents modèles que nous avons développés visant à modéliser plus simplement que le code 3D MISTRAL les températures de surface d'un sol homogène avec relief.

Chapitre 2

État de l'art

L'optique et l'optronique sont devenus omniprésents dans des domaines aussi primordiaux que l'aéronautique, l'espace ou la défense, qu'il s'agisse d'observation satellitaire à des fins civiles ou militaires, de surveillance stratégique, de reconnaissance aérienne, de détection des menaces ou encore de guidage d'armes vers des cibles. La simulation de tous ces concepts permet d'éviter des essais réels qui peuvent être aussi coûteux que dangereux, c'est pourquoi c'est un domaine qui n'a de cesse de se développer.

Dans le domaine visible, la simulation atteint des résolutions très fines avec des résultats satisfaisants. Mais dans le domaine infrarouge il est encore difficile d'atteindre le même niveau de détail. Il existe beaucoup de codes de simulation de scènes infrarouges (par exemple PRISM, GENESSIS, SensorVision, DIRSIG, ...). La résolution spatiale communément utilisée par ces modèles est généralement supérieure à un mètre. La simulation d'images à résolution plus fine – entre un mètre et la dizaine de centimètres – pose problème, car à ces résolutions le signal réel issu d'une surface subit de fortes variations. Sur de grandes surfaces, le signal réel étant modélisé avec une moyenne, ces variations sont atténuées. Mais à plus petite échelle elles doivent être modélisées, et donc au préalable être comprises. Les variations du signal reçu par un capteur sont dues aux rugosités de surface, aux inhomogénéités d'émissivité et de température, aux variations météorologiques, d'éclairement solaire, etc. Dans la création d'images IR il faut donc chercher à déterminer quels phénomènes dominent les variations de signal, en vue de les prendre en compte, à travers des modèles physiques réalistes, dans les images simulées.

Pour créer une image infrarouge, il faut calculer les flux rayonnés par les surfaces, et donc connaître à la fois les paramètres optiques et les températures de ces surfaces. Nous nous attachons ici aux variations de températures existant en surface. Les variations temporelles des températures de surface sont en premier lieu dues aux éclairagements (la température croît pendant la journée et décroît durant la nuit), et à la température de l'air (celle-ci est plus élevée en été qu'en hiver). Ces variations journalières et annuelles sont la plupart du temps modélisées par une fonction sinusoïdale, avec pour entrées une température moyenne et une amplitude. Néanmoins, aucun des codes de simulation étudiés ne prend en compte les variations spatiales des températures : la plupart des modèles thermiques considère des transferts de chaleur monodimensionnels et une température uniforme sur chaque unité de surface modélisée. Dans ce travail, nous voulons identifier les phénomènes régissant les variations de température de surface, afin d'arriver à les modéliser.

Les variations spatiales de température de surface ont été étudiées à la fois pour des sols plats et pour des sols présentant des reliefs. Les études menées sur des sols plats montrent déjà une forte variabilité spatiale des températures de surface : les écarts en surface à une même heure de la période diurne peuvent atteindre la dizaine de degrés. Ces écarts semblent reliés entre autres

causes au contenu en eau des sols et à leur orientation.

Des études ont également été menées pour des sols avec reliefs. Ces études proviennent du domaine agronomique, qui relie la température des sols à la pousse des cultures. En conséquence, les profils de surface généralement considérés sont périodiques pseudo-sinusoïdaux (tels des champs labourés), et sont comparés à des sols plats. Ces études montrent que la variabilité spatiale des températures de surface est liée principalement à l'orientation des surfaces : un point situé sur une pente orientée Sud verra sa température croître beaucoup plus qu'un point orienté au Nord. De plus, la variabilité temporelle des températures est également liée à la situation des points : une face Est atteindra son maximum au cours de la matinée alors qu'une face Ouest l'atteindra au cours de l'après-midi, le maximum de température pour un sol horizontal étant situé autour du midi solaire.

Ce chapitre est articulé autour de quatre parties principales. La chaîne de simulation amenant à une image en luminance d'une scène est d'abord décrite. Ensuite, les différents calculs des éclairagements reçus sur une surface sont exposés. Des modèles empiriques peuvent prédire les flux solaires direct et diffus, tandis que d'autres s'attachent à déterminer le flux thermique de fond de ciel. Des codes de transmission atmosphérique, comme MODTRAN, sont également présentés.

La partie la plus importante de cet état de l'art concerne l'analyse de la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface. Celle-ci est d'abord réalisée dans le cas d'un sol plat, puis pour une surface comportant des reliefs. Cette partie de modélisation de la température est complétée par des modèles physiques de la température de l'air et du coefficient d'échange, modèles dont nous aurons à nous servir dans la suite de ce travail.

Enfin, une revue des codes de simulation IR est réalisée, s'attachant, lorsque cela est possible, à décrire plus précisément le modèle de température employé.

2.1 Obtention de la luminance issue d'une scène

Le calcul aboutissant à la carte de luminance issue d'une scène n'est pas simple. Il nécessite une chaîne de calculs comportant divers modèles et hypothèses. Nous rappelons ici succinctement la démarche à entreprendre, afin d'introduire chacune des sections suivantes de ce chapitre.

Pour aboutir à une carte de luminance, la connaissance de la température de surface est requise. Les transferts thermiques dans un matériau opaque sont régis par l'équation de la diffusion de la chaleur :

$$\operatorname{div}(\kappa \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}T}) + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.1)$$

où κ est la conductivité thermique du milieu, ρ sa masse volumique, C_p sa capacité calorifique, et T sa température. Le terme q indique une source de chaleur.

Pour aboutir à la température de surface, le bilan des flux Φ reçus à la surface et émis est écrit :

$$\Phi_{cond} + \Phi_{conv} + \Phi_{evap} + \Phi_{ray\ abs} + \Phi_{emis} = 0 \quad (2.2)$$

Le flux conductif Φ_{cond} est déterminé par la loi de Fourier, qui stipule qu'il existe une relation linéaire entre la densité de flux thermique et le gradient de température : en tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique κ du milieu et au gradient de température :

$$\overrightarrow{\phi} = -\kappa \overrightarrow{\operatorname{grad}T} \quad (2.3)$$

Le flux convectif s'écrit, selon l'hypothèse de Fourier :

$$\Phi_{conv} = h(T_{surf} - T_{air}) \quad (2.4)$$

Il a deux origines : la convection libre ou naturelle, issue du gradient de température existant entre la température de surface du milieu et la température de l'air T_{air} , et la convection forcée, provoquée par le vent. Il existe beaucoup de relations empiriques modélisant les coefficients de convection h , à la fois pour la convection forcée et la convection naturelle. Quelques-unes sont présentées en section 2.4.2. Par ailleurs, la température de l'air étant requise, il peut être aisé de disposer de modèles de celle-ci. Un modèle de température est exposé en section 2.4.1.

Le flux d'évaporation Φ_{evap} résulte de la différence de concentration de vapeur d'eau entre la surface et un niveau supérieur de la couche d'air. Il est généralement modélisé par :

$$\Phi_{evap} = ah(P_v(T_{surf}) - P_v(T_{air})) \quad (2.5)$$

où a est un paramètre semi-empirique et où P_v représente la pression de vapeur saturante.

Le flux de rayonnement incident absorbé $\Phi_{ray\ abs}$ est composé de quatre parties : les flux solaires direct et diffus, le flux thermique de fond de ciel, et le flux issu des réflexions et diffusions multiples dans l'atmosphère. Le flux de rayonnement net absorbé est calculé par intégrations spatiale et spectrale des luminances spectrales directionnelles.

Il existe des modèles analytiques approchant le flux solaire (direct + diffus) et le flux thermique de fond de ciel. Ces modèles fournissent un flux global, et ne donnent donc pas d'information directionnelle sur le flux. Les réflexions et diffusions multiples, quant à elles, ne sont pas prises en compte la plupart du temps. Des modèles de ces flux sont présentés en section 2.2. Outre ces modèles simplifiés, il existe des modèles de transmission atmosphériques beaucoup plus complexes, qui réalisent les intégrations sur la bande et dans la(les) direction(s) spécifiée(s) par l'utilisateur. Les codes qui en découlent (MODTRAN, FASCODE, ...) sont également présentés succinctement en section 2.2.

Le flux émis par la surface Φ_{emis} dépend de la température de surface, ainsi que de son émissivité spectrale directionnelle. Il est obtenu par intégration dans toutes les directions (θ, ϕ) sur l'hémisphère (angles solides Ω) et sur tout le spectre (longueurs d'onde notées λ).

$$\Phi_{emis} = \int_{\lambda} \int_{\Omega} \varepsilon_{\lambda\theta\phi} L_{\lambda}^0(\lambda, T) \cos \theta \, d\Omega \, d\lambda \quad (2.6)$$

où $\varepsilon_{\lambda\theta\phi}$ est l'émissivité spectrale directionnelle et $L_{\lambda}^0(\lambda, T)$ est la luminance du corps noir. Cette dernière est calculée par la loi de Planck :

$$L_{\lambda}^0(\lambda, T) = \frac{2 h c_0^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{h c_0}{k \lambda T}\right) - 1} \quad (2.7)$$

où h est la constante de Planck, c_0 la vitesse de propagation du rayonnement électromagnétique dans le vide, et k la constante de Boltzmann. Une hypothèse communément utilisée est que les surfaces sont *lambertiennes* : leur luminance est indépendante de la direction. Par ailleurs, il est parfois difficile d'obtenir les valeurs spectrales de l'émissivité. On utilise alors une émissivité moyenne ε , et alors la loi de Stefan-Boltzmann est généralement utilisée pour un calcul approché des pertes par émission radiative :

$$\Phi_{emis} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{surf}^4$$

La luminance perçue en entrée d'un capteur (qui peut être l'œil humain, mais plus souvent un capteur optique ou optronique) comporte plusieurs composantes : celle issue de l'atmosphère, et celle issue des surfaces. Pour évaluer la première, on utilise généralement des codes de transmission (voir section 2.2). Pour la seconde, il est nécessaire de connaître la température de surface. Or la connaissance de celle-ci s'avère la plupart du temps délicate. Beaucoup de modèles, pour simplifier le problème, considèrent que les transferts de chaleur sont monidimensionnels perpendiculaires à la surface. Mais cette hypothèse simplificatrice peut conduire à des erreurs importantes. C'est ce qui est montré dans les sections 2.3.1 et 2.3.2, qui étudient la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface, pour des sols plats puis pour des sols comportant des reliefs.

Il existe beaucoup de modèles ayant conduit à des codes arrivant à calculer la carte de luminance d'une scène. Ces codes de simulation sont généralement composés de quatre modules. Le premier est un modéleur géométrique, qui permet de représenter la scène à modéliser et les objets qui la composent sous forme de facettes. Cette représentation facilite la mise en place de codes de calcul pour les phases suivantes. Les flux d'éclairement solaires sont ensuite calculés ou modélisés. La connaissance de ces flux ainsi que des propriétés thermiques et optiques de tous les objets de la scène permet ensuite le calcul des températures. C'est ici que des simplifications sont communément faites : transferts de chaleur monidimensionnels, propriétés thermiques isotropes, surfaces Lambertiennes parmi les plus usitées. Enfin un modèle de luminance permet d'aboutir à la carte des luminances. Les principaux modèles de simulation de scènes dans l'infrarouge sont exposés dans la section 2.5, puis une vue d'ensemble de tous ces codes est proposée.

2.2 Modèles d'éclairement et codes de transmission

Pour appréhender le rayonnement reçu en surface, plusieurs méthodes sont utilisées dans les codes de simulation IR et les modèles thermiques. Certains utilisent des codes de transmission atmosphérique (LOWTRAN, MODTRAN, FASCODE). D'autres privilégient la vitesse d'exécution et se dirigent vers des modèles semi-empiriques pour le calcul des flux radiatifs, pour les composantes solaire et atmosphérique. Cette section présente succinctement quelques modèles de rayonnement atmosphérique communément utilisés. Les modèles de flux de fond de ciel, puis les modèles de flux solaire sont présentés. Cette section expose ensuite les caractéristiques essentielles des codes de transmission atmosphériques, incluant une comparaison entre ces trois codes.

2.2.1 Modèles de flux atmosphérique

Au cours de l'histoire, l'éclairement de fond de ciel, appelé également flux atmosphérique, a été beaucoup modélisé. Ångström a développé en 1918 le premier modèle semi-empirique reliant le flux de rayonnement atmosphérique par temps clair ϕ_{atm} et la pression de vapeur e . D'autres se sont attelés à la modélisation de ce flux, et trois de ces modèles sont exposés ci-dessous.

Brunt propose en 1932 une formulation empirique de ϕ_{atm} en fonction de la pression de vapeur et de la température de l'air. Ce modèle est utilisé notamment dans [Mah82]. La formulation est la suivante :

$$\phi_{atm} = \sigma T_a^4 (0.55 + 0.065e^{1/2}) \quad (2.8)$$

où σ est la constante de Stefan Boltzmann, e la pression de vapeur et T_a la température de l'air. Malgré son grand âge, ce modèle se place parmi les plus précis [IMM03].

Idso et Jackson [IJ69] proposent en 1969 un modèle empirique de calcul de l'éclairement de fond de ciel ϕ_{atm} , fonction uniquement de la température de l'air T_a .

$$\phi_{atm} = \sigma T_a^4 (1 - 0.261 \exp(-0.000777(273 - T_a)^2)) \quad (2.9)$$

Des comparaisons avec des mesures (voir dans [IMM03]) montrent que ce modèle estime assez bien le flux thermique entre 9h et 16h mais qu'il le sous-estime le reste du temps. Cette différence peut être due à la prise en compte implicite de la pression de vapeur, fortement liée à la température de l'air, contrairement au modèle de Brunt.

Iziomon et al. [IMM03] réalisent des mesures sur deux sites, l'un montagneux et l'autre en plaine, en Allemagne entre 1992 et 1995. D'après ces mesures, et après comparaison avec des modèles préexistants, les auteurs proposent un modèle empirique de ϕ_{atm} pour un ciel clair. Les données d'entrée sont la température de l'air T_a en K et la pression de vapeur e en hPa. Seuls les paramètres changent de valeur selon le site (montagne ou plaine). Pour un ciel clair, le rayonnement thermique de fond de ciel ϕ_{atm} s'exprime par :

$$\phi_{atm} = \sigma T_a^4 [1 - X_s \exp(-Y_s e/T_a)] \quad (2.10)$$

où $X_s = 0.35$ et $Y_s = 10.0 \text{ hPa}^{-1}$ pour un site en plaine, et $X_s = 0.43$ et $Y_s = 11.50 \text{ hPa}^{-1}$ pour un site montagneux.

Ce modèle utilise les mêmes données d'entrée que le modèle de Brunt, à savoir la pression de vapeur e et la température de l'air T_a . Les résultats obtenus avec le modèle d'Iziomon et al. démontrent une très bonne adéquation avec les mesures.

Remarque : Ce modèle comporte également une formulation pour la prise en compte de conditions nuageuses. Par diffusion, la présence de nuages augmente le flux atmosphérique reçu à la surface. La formulation précédente est alors modifiée, afin d'introduire un facteur nuageux N :

$$\phi_{atm}(N) = \sigma T_a^4 [1 - X_s \exp(-Y_s e/T_a)] (1 + Z_s N^2) \quad (2.11)$$

où :

- N est en okta ;
- $Z_s = 0.0035$ pour le site en plaine ;
- $Z_s = 0.0050$ pour le site montagneux.

2.2.2 Les modèles de flux solaire

Différents modèles existent pour le calcul de la composante solaire de l'éclairement. Certains d'entre eux ont été développés au sein du projet Heliosat¹. La première version de la méthode d'Heliosat utilisait le modèle de Bourges (1979) pour obtenir le flux global ϕ_{sun} par ciel clair. Puis la formulation de Perrin de Brichambaut et Vauge – notée PBV– (1982), plus précise, y a été substituée.

$$\phi_{sun(Bourges)} = 0.70 I_0 \epsilon (\sin \gamma_s)^{1.15} \quad (2.12)$$

$$\phi_{sun(PBV)} = 0.81 I_0 \epsilon (\sin \gamma_s)^{1.15} \quad (2.13)$$

¹La méthode Heliosat convertit des images acquises par des satellites géostationnaires météorologiques en cartes de rayonnement reçu au niveau du sol

Dans les équations 2.12 et 2.13, I_0 est la constante solaire, égale à 1367 W/m^2 , ϵ un facteur de correction de la distance terre-soleil, et γ_s est l'angle zénithal du soleil.

Il a été montré dans [MDOW89] que la fonction $(\sin \gamma_s)^{1.15}$ décrit bien les variations du flux solaire global ϕ_{sun} . Néanmoins son amplitude est trop faible avec le modèle PBV. Cette sous-estimation de l'amplitude serait due au manque de paramètres d'entrée du modèle. La prise en compte du facteur de trouble atmosphérique (turbidity factor) de Linke², noté $T_L(AM2)$, a été démontrée comme augmentant la précision des prédictions. Ainsi, le modèle utilisé par le WMO (World Meteorological Organization) est le suivant :

$$\phi_{sun} = (1297 - 57 T_L(AM2))(\sin \gamma_s)^{[(36+T_L(AM2))/33]} \quad (2.14)$$

Le modèle ESRA [RBW00] propose la prédiction du flux solaire global ϕ_{sun} en deux composantes : le flux solaire direct $\phi_{sun \text{ dir}}$ et le flux solaire diffus $\phi_{sun \text{ dif}}$. Le flux solaire direct s'écrit :

$$\phi_{sun \text{ dir}} = I_0 \epsilon \sin \gamma_s \exp(-0.8662 T_L(AM2) m \delta_R(m)) \quad (2.15)$$

Dans cette équation, $T_L(AM2)$ est le facteur de turbidité de Linke pour une masse d'air de 2, m est la masse d'air optique relative, et $\delta_R(m)$ est l'épaisseur optique de Rayleigh. La composante diffuse dépend également du facteur de trouble atmosphérique de Linke $T_L(AM2)$:

$$\phi_{sun \text{ dif}} = I_0 \epsilon T_{rd}(T_L(AM2)) F_d(\gamma_s, T_L(AM2)) \quad (2.16)$$

Dans cette équation, le rayonnement diffus est exprimé comme le produit de la fonction de transmission diffuse au zénith T_{rd} et d'une fonction angulaire diffuse F_d .

$$\begin{aligned} T_{rd}(T_L(AM2)) &= -1.5843 \times 10^{-2} + 3.0543 \times 10^{-2} T_L(AM2) + 3.797 \times 10^{-4} [T_L(AM2)]^2 \\ F_d(\gamma_s, T_L(AM2)) &= A_0 + A_1 \sin(\gamma_s) + A_2 [\sin(\gamma_s)]^2 \end{aligned}$$

Les coefficients A_0 , A_1 et A_2 dépendent uniquement du facteur de trouble atmosphérique de Linke. Ils sont donnés dans [RBW00].

Ce modèle permet une bonne représentativité des flux solaires reçus en surface. Il peut être utilisé en complément d'un modèle de flux atmosphérique, en vue d'éviter les appels à des codes plus précis mais plus exigeants en temps de calcul, comme FASCODE ou MODTRAN.

Le modèle *AMARTIS*

Dans beaucoup de références, le transfert radiatif est souvent simplifié : les réflexions multiples sont négligées. Or ces dernières peuvent jouer un rôle significatif, voire même prépondérant dans certains cas [MBKC99]. Miesch a développé dans sa thèse [Mie99] un code de calcul des éclairagements au sol et des luminances en entrée de capteur, nommé AMARTIS (Advanced Modeling of the Atmospheric Radiative Transfer for Inhomogeneous Surfaces).

²Le facteur de trouble atmosphérique de Linke (TL, pour une masse d'air égale à 2) est une bonne approximation pour modéliser l'absorption et la diffusion atmosphériques du rayonnement solaire pour un ciel clair : il décrit l'épaisseur optique de l'atmosphère due à la fois à l'absorption par la vapeur d'eau et à l'absorption et la diffusion par les aérosols, relatifs à une atmosphère sèche et propre. Ce coefficient représente le trouble de l'atmosphère et ainsi l'atténuation du rayonnement solaire direct. Plus le TL est grand, et plus l'atténuation est grande. Typiquement, la valeur du TL en Europe est 3 ; pour des villes très polluées, il est de 6 ou 7. Ce coefficient subit de grandes variations spatiales et temporelles. Pour cela, il existe une base de données climatologique mondiale, comportant des cartes de TL.

Au niveau du sol, cinq types d'éclairagements incidents sont définis (figure 2.1). On distingue les trajets descendants direct et diffus. Leurs éclairagements respectifs sont nommés E_{direct} et E_{diffus} . Deux composantes introduites par le relief, provenant des réflexions sur le voisinage, sont ensuite introduites : $E_{\text{direct-reflexion}}$, provenant de l'éclairage direct réfléchi par le voisinage, et $E_{\text{diffus-reflexion}}$, provenant de l'éclairage diffus réfléchi par le voisinage du point considéré. Le dernier terme E_{couplage} est associé au couplage terre-atmosphère, et correspond aux réflexions multiples entre le sol et l'atmosphère. Ces cinq contributions sont calculées séparément.

L'hypothèse de découplage de l'absorption gazeuse des autres phénomènes est faite. Cette hypothèse est faite pour gagner du temps de calcul. L'absorption moléculaire est très rapidement variable avec la longueur d'onde, contrairement aux autres phénomènes. Pour cela, l'échantillonnage pour les transmissions gazeuses est plus fin que celui utilisé pour la simulation des luminances hors absorption gazeuse.

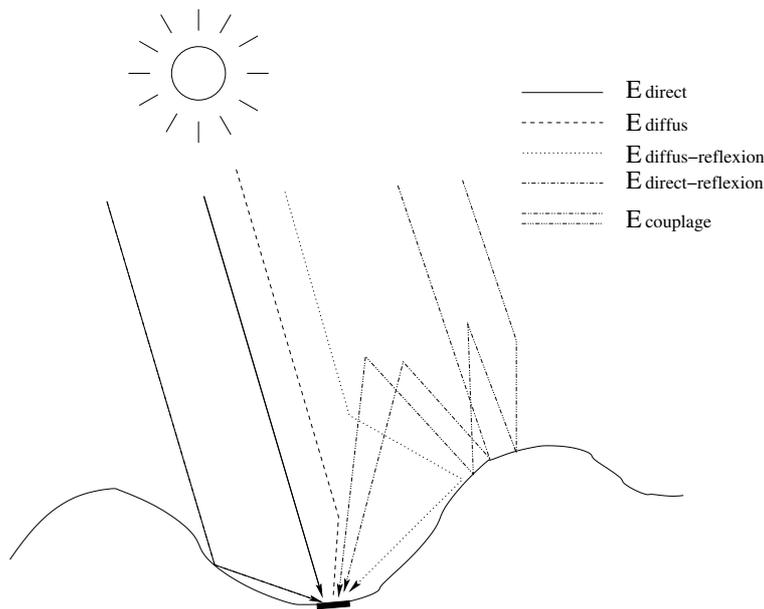


FIG. 2.1 – Types d'éclairagements au sol

Les éclairagements direct et diffus sont calculés avec le code Gauss Seidel, et la prise en compte de l'absorption gazeuse est effectuée après intégration des luminances. L'éclairage dû au couplage Terre-atmosphère étant trop complexe à définir analytiquement, il est calculé en ayant recours à une méthode de Monte Carlo³.

Trois configurations sont principalement testées : un bord de plage, des dunes de sable, et des vallées profondes entre des cimes enneigées, afin de quantifier les contributions relatives des cinq termes qui composent l'éclairage incident. Une simplification souvent faite pour le transfert radiatif est que les réflexions multiples sont négligeables. Or la simulation de la troisième configuration montre que, à l'ombre, le terme de réflexion participe à 85% du flux total reçu. Ce résultat montre que dans le cas de surfaces fortement réfléchissantes, comme la neige, les réflexions multiples sont loin d'être négligeables, et sont même largement prépondérantes sur les surfaces à l'ombre. Il peut donc être judicieux d'utiliser ce code dans le cas de surfaces à fort coefficient de réflexion.

³Une méthode de Monte Carlo est une méthode générique de simulation par tirage aléatoire. Elle est ici appliquée à la simulation statistique du trajet des photons dans le système Terre-atmosphère, afin de reproduire

2.2.3 Les codes de transmission atmosphérique

Les codes de transmission atmosphérique sont utilisés pour calculer à la fois les flux reçus en surface de la terre et les flux en entrée capteur. Ils permettent de prendre en compte l'atténuation due à l'atmosphère.

FASCODE [CKSA86] (Fast Atmospheric Signature Code) calcule le spectre de transmission de l'atmosphère à très haute résolution spectrale. Il comporte une base de données pour tous les gaz, et effectue le calcul de transmission raie par raie. De ce fait, les temps de calcul sont très longs. Ce code est principalement utilisé pour la propagation des raies laser. Ce code a été récemment couplé avec un modèle de transfert radiatif, et le code résultant est connu sous le nom de FASE [SMA⁺95] (FASCODE for the Environment).

LOWTRAN [KSA⁺88] (Low spectral resolution atmospheric Transmittance algorithm) est un code dont la première version date de 1972. Il permet la prédiction de la transmission atmosphérique et du rayonnement thermique émis par l'atmosphère et la terre, entre 350 et 40 000 cm^{-1} , avec une résolution spectrale de 20 cm^{-1} . Le calcul ne s'effectue pas raie par raie comme dans FASCODE : LOWTRAN dispose de profils d'absorption et effectue des intégrations sur des bandes larges de 20 cm^{-1} . En plus de l'absorption des gaz de l'atmosphère, il intègre des modèles d'aérosols. Différents modèles de nuages sont également implémentés (cirrus, cumulus, ...). Il permet également de prédire le rayonnement émis par le soleil et la lune. Ce code est encore utilisé, bien qu'il soit maintenant communément remplacé par MODTRAN [BBR89] (MODerate spectral resolution atmospheric TRANsmittance algorithm and computer model).

MODTRAN est un code de calcul qui a été développé pour accroître la résolution spectrale offerte par LOWTRAN. Il calcule le rayonnement et la transmission atmosphériques pour des fréquences allant de 0 à 50 000 cm^{-1} , par pas de 2 cm^{-1} (et 20 cm^{-1} dans l'ultraviolet). MODTRAN est compatible avec les versions antérieures de LOWTRAN, et utilise les mêmes modèles d'aérosols et de diffusion. Une amélioration de MODTRAN par rapport à LOWTRAN, outre l'affinage du pas de calcul, est la possibilité de faire appel à des fonctions de BRDF (Bi-directional Radiance Distribution Function), si l'utilisateur en dispose. Pour ces deux raisons, MODTRAN est maintenant généralement préféré à LOWTRAN.

Même si bien d'autres codes de transmission atmosphérique existent (APART, 6S, ...), ce sont les trois modèles cités ci-dessus qui sont le plus communément utilisés. MODTRAN est toutefois généralement préféré à LOWTRAN, parce que ce dernier est un code plus ancien et de résolution spectrale inférieure, et que MODTRAN intègre toutes les fonctionnalités de son prédécesseur. Anderson et al. [AKC⁺95] fournissent une bonne analyse de ces trois modèles, de leurs différences et de leur complémentarité.

2.3 Variabilité spatiale et temporelle de la température de surface

Cette section est dédiée à l'étude de la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface d'un sol. Les objectifs, à travers cette étude, sont d'obtenir des ordres de grandeur de la variabilité de la température des sols, et d'identifier les phénomènes influant le plus sur cette variabilité. Les phénomènes identifiés pourront ensuite être pris comme points de départ pour développer des modèles de cette variabilité.

La plupart des études menées sur ce sujet sont reliées à l'agronomie, l'agriculture ou la gestion de l'espace. La température du sol a en effet une forte influence sur la croissance de la végétation.

les phénomènes physiques sans introduire aucune approximation ou simplification.

Pour cela, beaucoup d'études concernent la température des sols de cultures différentes, qui est la plupart du temps comparée à la température d'un sol nu. C'est en ce point que ces études rejoignent notre sujet. Des analyses de la variabilité spatiale de la température sont menées sur des sols plats, utilisant les géostatistiques. Ces résultats nous permettent d'obtenir un ordre de grandeur de cette variabilité.

Il existe d'autre part beaucoup de modèles de température de surface. Ces modèles permettent d'obtenir des températures moyennes sur une période plus ou moins longue (journée, saison, année). Une courte analyse va nous permettre d'en dégager les paramètres d'entrée, et d'en voir les avantages ainsi que les limitations.

Par ailleurs, des études peu nombreuses, expérimentales et théoriques, s'intéressent à l'influence de la géométrie du sol sur sa température. Leurs conclusions vont nous permettre d'identifier les paramètres prépondérants dans la variabilité spatiale et temporelle des températures des sols.

2.3.1 Température d'un sol plat

Dans ce paragraphe quelques références consacrées à la température de surface pour des sols plats sont étudiées. Ces références nous permettent de mettre en évidence une variabilité spatiale non négligeable, même pour des sols sans relief. En premier lieu, les géostatistiques sont utilisées afin de quantifier la variabilité spatiale et temporelle de cette température d'après des mesures sur différents types de terrains. Des études expérimentales sont ensuite présentées, avec un traitement statistique classique. Enfin, plusieurs modèles de température de surface sont exposés. Ces modèles sont valables pour des sols plats horizontaux, et les transferts de chaleur sont supposés monodimensionnels.

2.3.1.1 Études expérimentales de la variabilité de la température

Des mesures au sol et des mesures IR aériennes sont réalisées par Hatfield et al. [HMG82] sur deux bandes, de 50 km et 20 km de long en Californie. Le but de leur étude est de quantifier la variabilité de la température de surface pour des champs cultivés. Les températures de surface mesurées le 3 mai 1979 se situent entre moins de 20°C et plus de 40°C.

Les schémas de variabilité ne sont pas consistants entre les champs : les températures de certains champs sont très uniformes alors que d'autres ont des variations de 6°C. Une partie de la variabilité sur la partie la plus au nord de la zone visée est attribuée aux différences topographiques. De plus, dans certains champs, la variabilité de la température de surface s'explique par les différences d'irrigations entre les différentes cultures.

Dans le cas des sols nus, un sol sec a une température moyenne comprise entre 37,2°C et 42,4°C et une variance comprise entre 0,5°C et 3°C, alors que pour un sol irrigué les températures moyennes se situent entre 25°C et 28,8°C, et leur variance varie de 0,5°C à 5,4°C. L'identification des champs confirme donc que les sols nus et secs sont plus chauds que ceux cultivés ou irrigués depuis peu. De plus, la température varie plus pour les champs nus et secs que pour les champs irrigués. L'eau contenue dans les sols a donc un rôle de régulation sur les températures.

Des mesures aériennes ont également été réalisées sous deux axes différents : nord-sud et est-ouest. Hatfield et al. constatent que la variabilité est grande quelle que soit la direction. L'orientation des sols, à cette hauteur d'observation, ne semble donc pas avoir d'influence sur les différences de températures en surface.

Les géostatistiques : ordres de grandeur de la variabilité spatiale de la température

En physique des sols, les différents phénomènes observables sont généralement interdépendants. Malgré cela, ils sont souvent supposés indépendants lors du traitement statistique. Des

méthodes et des modèles ont été développés ([BW80a, BW80b, Web85]) qui tiennent compte de l'interdépendance et de la variabilité des paramètres. Ce paragraphe présente ces articles, qui se fondent sur la théorie des géostatistiques, dont les caractéristiques essentielles, le variogramme et le *krigeage* sont présentés en annexe A.1.

Les géostatistiques, introduites notamment par Webster dans [Web85], ont été et sont très utilisées pour exploiter des campagnes de mesures et en dégager des schémas de variations spatiales et temporelles pour l'étude des sols [VVBH82, HVVB84, TYU85, DLS86, PW91, UW92, WU94, UMAF95, UKB96]. Pour l'analyse de variabilité de mesures, il est également possible d'utiliser les méthodes classiques, comme la fonction d'autocorrélation. L'intérêt des géostatistiques par rapport aux méthodes statistiques classiques réside dans le fait qu'elles permettent de traiter des données dont le pas, spatial ou temporel, n'est pas forcément constant.

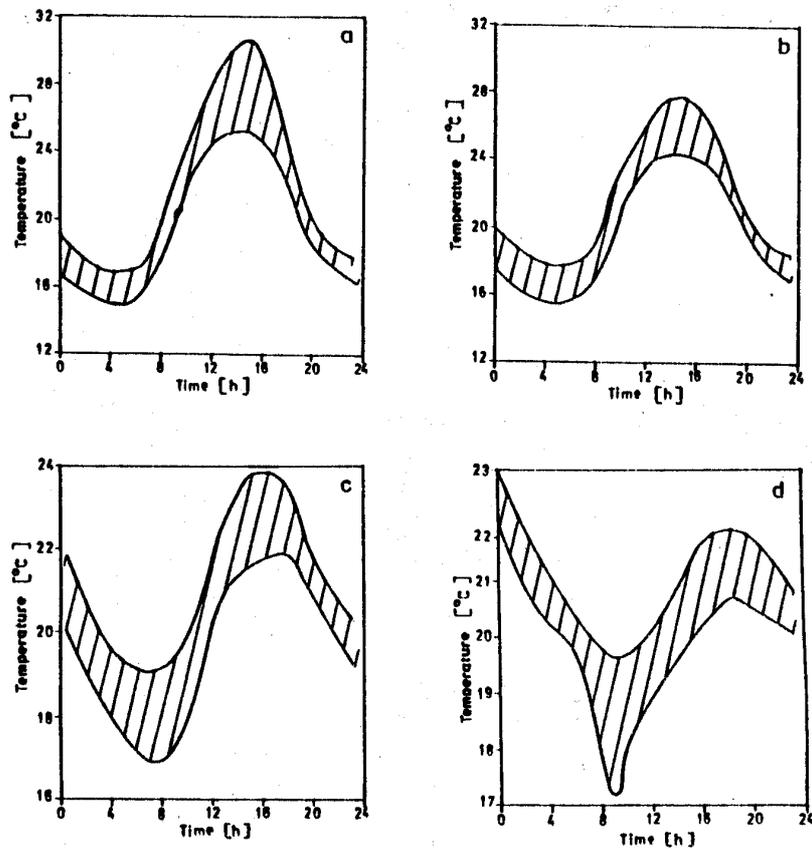


FIG. 2.2 – Plages de mesures de températures issues de 16 points sur une aire de $3\text{m}\times 3\text{m}$. Profondeurs : a -0.0005m , b -0.02m , c -0.1m , d -0.2m . Date : 20/08/1989. Mesures réalisées par Usowicz et Walczac en Pologne

Usowicz et Walczac [UW92] étudient la variabilité spatiale de la température d'un sol nu sur deux grilles : ils effectuent des mesures à différentes profondeurs, tous les mètres sur une zone de $3\text{m}\times 3\text{m}$, et tous les 10 mètres sur une zone de $30\text{m}\times 30\text{m}$. Ils mettent en évidence l'existence d'une variabilité spatiale de la température pour des sols plats. Leurs mesures montrent des différences de température de l'ordre de 3°C à 7°C à la surface (figure 2.2). L'article décrit le sol

étudié comme étant nu et plat, néanmoins il n'est fait aucune mention de l'état de la surface. De plus, aucun bilan d'erreur (erreurs notamment liées à l'instrumentation) n'est réalisé. Néanmoins, ces écarts de température de surface sont suffisamment importants pour montrer que, même si un sol est plat, sa température est loin d'être uniforme.

Vauclin et al. [VVBH82] étudient la variabilité spatiale de la température de surface à partir de mesures réalisées le 2 octobre 1981 en Californie, sur deux bandes de sol nu, longues de 60m et de 100m. Les mesures sont réalisées tous les mètres avec des caméras infrarouges. Leur analyse est réalisée avec des semivariogrammes et des fonctions d'autocorrélation. Les auteurs montrent que les températures de surface sont spatialement liées aux inhomogénéités d'irrigation.

Pierson et Wight [PW91] utilisent les statistiques classiques (moyenne, variance et coefficient de variation pour les maxima et minima) ainsi que les géostatistiques (semivariogramme et *krigeage*) sur des mesures effectuées sur des champs cultivés à différentes profondeurs (1 cm, 5 cm et 10 cm, mesures toutes les 10 minutes pendant 6 jours). Des semivariogrammes pour les températures minimales et maximales de la journée pour les trois profondeurs montrent une variabilité en température plus forte pour la partie de sol nue que pour la partie de sol accueillant les plants. Leurs mesures montrent également, comme [WU94], que les températures minimales et maximales sont obtenues pour un sol nu (figure 2.3). La protection des cultures permet donc un amortissement des fluctuations des températures. Néanmoins, cette influence s'atténue avec la profondeur : plus celle-ci est importante et moins les écarts de température sont élevés.

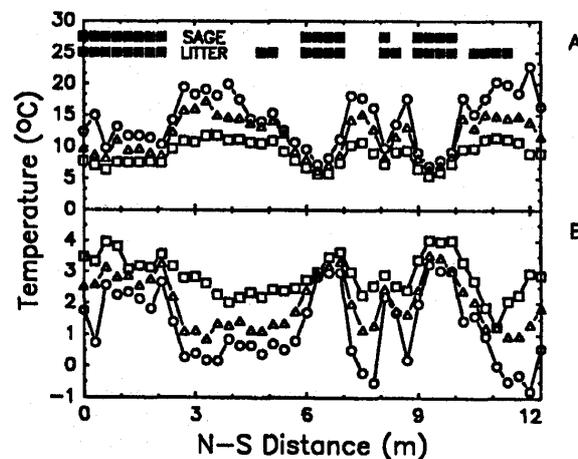


FIG. 2.3 – Températures maximales (A) et minimales (B) du sol pour des profondeurs de 1 cm (o), 5 cm (Δ) et 10 cm (\square) à des intervalles de 30 cm le long d'un transect orienté nord-sud, 81ème jour, 1989. La localisation des plantes et de la litière est aussi indiquée au-dessus des figures. Mesures réalisées par Pierson et Wight

2.3.1.2 Modèles de température de surface

Chaque application particulière inclut le développement de son propre modèle de température de surface. Certains prennent en compte une couche de neige, ou le *permafrost* [Ris01, Thu90]. D'autres, pour étudier l'écosystème des forêts, utilisent une première couche de feuilles ou d'hu-

mus [KKOL00, Thu90]. Les applications en agriculture sont également nombreuses, et beaucoup de modèles existent, incluant des cultures ([LLH92, GRL81, VS91] parmi d'autres).

Pour des sols "nus" – c'est-à-dire sans couverture végétale – ces modèles sont presque dans tous les cas des modèles multicouche. Les transferts de chaleur sont supposés monodimensionnels, perpendiculaires à la surface. La modélisation s'effectue avec un bilan des flux à la surface. La température de l'air est une des principales données d'entrée. Dans [Thu90] et [GRL81], la température de surface est même prise égale à la température de l'air. Cette condition limite est ensuite utilisée pour déterminer la température en profondeur.

Kang et al. [KKOL00] développent un modèle hybride afin de prédire les schémas journaliers de la température d'un sol forestier, c'est-à-dire sous la canopée. Ils combinent les principes de transfert de chaleur à un modèle empirique proposé par D. Zheng, E. Hunt et S. Running en 1993. Comme dans beaucoup d'autres modèles, les variations diurnes et annuelles de la température du sol sont supposées sinusoïdales :

$$T = T_m + A_0 \sin(\omega T) \quad (2.17)$$

Dans l'équation 2.17, T_m est la température moyenne du sol, A_0 son amplitude de la température à la surface du sol et ω la pulsation. Leur modèle est appelé hybride, parce qu'il introduit un coefficient d'amortissement selon la profondeur z , fonction des amplitudes de la température à la surface et à la profondeur z , ainsi que de la profondeur et la diffusivité du sol.

Afin de valider leur modèle, Kang et al. réalisent des mesures (voir figure 2.4), à 10 cm de profondeur, sur trois sites en Corée : deux sites sont en milieu forestier, et le troisième est un terrain dont la végétation et la litière du sol ont été enlevés, et représente donc un sol "nu". Afin d'évaluer la pertinence de leurs prédictions, ils utilisent l'erreur moyenne absolue (MAE) et le biais. Les résultats sont résumés en table 2.1. T_{air} est la température de l'air, T_{a11} la moyenne sur 11 jours de la température de l'air, χ la diffusivité du sol, LAI le *leaf area index* (index de surface de feuillage) et M un facteur d'échelle pour les régressions locales.

Modèle	Site	MAE (°C)	Biais (°C)	Informations requises
Hybride	Forêt (site 1)	0.96	0.03	T_{air}, LAI, χ
Hybride	Sol nu (site 1)	1.48	-1.32	T_{air}, LAI, χ
Hybride	Forêt (site 2)	1.21	1.01	T_{air}, LAI, κ_S
Empirique	Forêt (site 1)	2.07	-1.11	T_{a11}, LAI, M

TAB. 2.1 – Analyse d'erreur et comparaisons (erreur moyenne absolue (MAE) et biais) pour deux modèles prédictifs de température du sol

Les prédictions les moins bonnes, pour le modèle hybride, sont celles du sol nu. Les auteurs justifient cela par le fait que le modèle hybride donne beaucoup d'importance à la litière du sol et à l'index de surface de feuillage (LAI). L'étude des résultats expérimentaux révèle par ailleurs l'influence de la topographie sur les températures : au printemps et en automne, la variation et la moyenne journalière de la température du sol sont plus grandes pour les pentes situées au sud que pour celles situées au nord. L'orientation de la surface par rapport au rayonnement solaire direct creuse donc les minima et maxima.

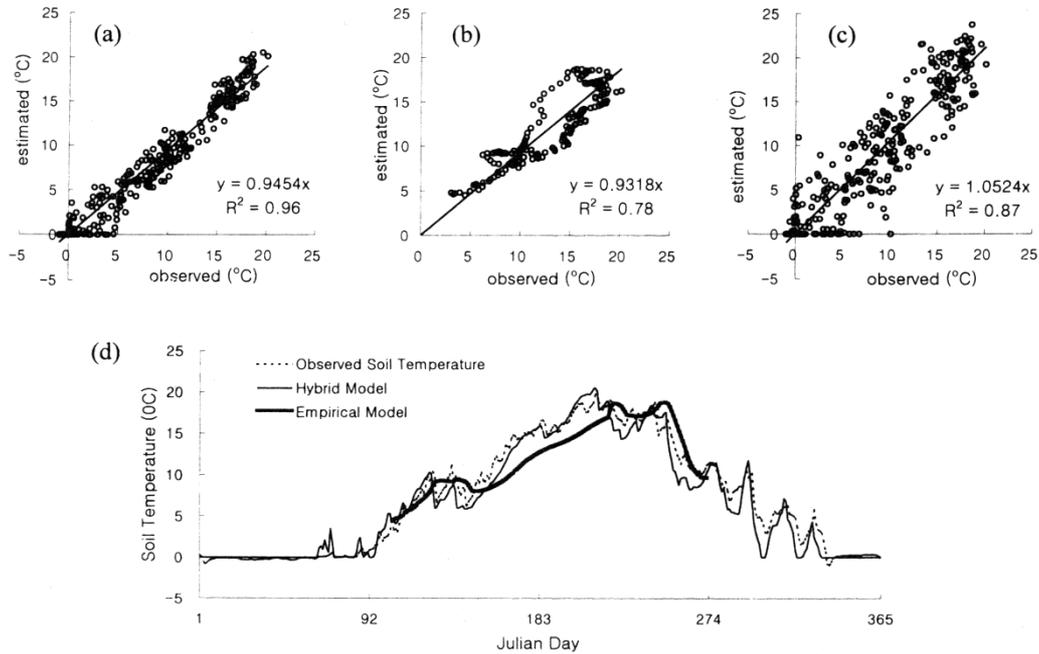


FIG. 2.4 – Modèle de Kang et al. : comparaison des prédictions et des mesures des températures journalières à 10 cm de profondeur avec (a) le modèle hybride, (b) le modèle empirique et (c) le modèle du coefficient d’amortissement. Comparaison sur une année sur le graphique (d)

L’étude de sols plats a révélé que ceux-ci présentent une variabilité temporelle des températures de surface. Elle atteint 13 K entre 6h et 14h dans les expériences menées par Uowicz et Walczak [UW92]. Celle-ci est due, à l’échelle d’une journée, au rayonnement solaire atteignant la surface. À l’échelle annuelle, la température du sol est liée à la température de l’air, et la plupart des modèles de température retiennent des variations sinusoïdales annuelles. La variabilité spatiale de la température de surface est, quant à elle, liée à la compacité des sols, ou encore à leur teneur en eau. Un autre facteur important est l’orientation du sol par rapport au rayonnement solaire direct : la température moyenne et son amplitude pour un sol orienté Sud sont plus importantes que pour un sol orienté Nord dans l’hémisphère Nord.

2.3.2 Température d’un sol avec relief

L’influence particulière du profil de surface sur la température du sol a été peu étudiée. Les quelques références trouvées concernent, comme précédemment, les domaines de l’agronomie et de l’agriculture. L’analyse de ces références va nous permettre, dans ce paragraphe, de mieux comprendre les phénomènes qui gouvernent la variabilité spatiale de la température de surface, et d’identifier les plus influents.

Deux articles comprenant une campagne expérimentale sont présentés. L’un [Bur63] concerne des mesures *in situ*, tandis que pour le deuxième [SB57] une géométrie a été créée dans le seul but de qualifier et quantifier l’influence du profil du sol sur sa température. La dernière référence [Mah82] étudie également cette influence, mais du point de vue théorique. Ces trois articles sont présentés et discutés dans ce paragraphe.

2.3.2.1 Burrows [Bur63]

Burrows caractérise en 1963 la distribution de la température du sol pour des reliefs créés par différentes méthodes de culture. Pour cela, il réalise des mesures de températures sur des champs de maïs, l'un plat et l'autre présentant des sillons, et un champ plat dégagé de toute végétation, à des fins de comparaison. Les mesures sont réalisées avec des thermocouples, à trois profondeurs : 0.6 cm, 5 cm et 10 cm. La géométrie envisagée est la suivante : des sillons, distants d'un mètre (40 inches⁴) et profonds d'environ 30 cm (12 inches); deux orientations pour ces sillons sont testées : Nord-Sud (N-S) et Est-Ouest (E-W). Les mesures, sur ce profil, sont réalisées tous les 25 cm (soit 10 inches – voir figure 2.5). Par conséquent, les points se trouvant sur les flancs font face à l'Est et à l'Ouest dans le cas de sillons N-S, et font face au Nord et au Sud pour les sillons orientés E-W. La figure 2.5 éclaire la localisation de chaque point de mesure.

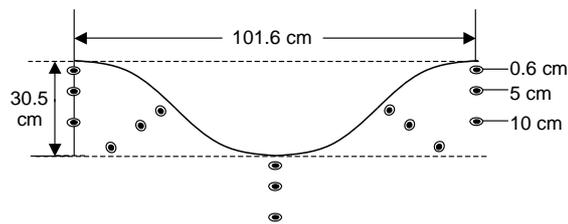


FIG. 2.5 – Localisation des thermocouples dans les sols cultivés ; mesures réalisées par Burrows (1963)

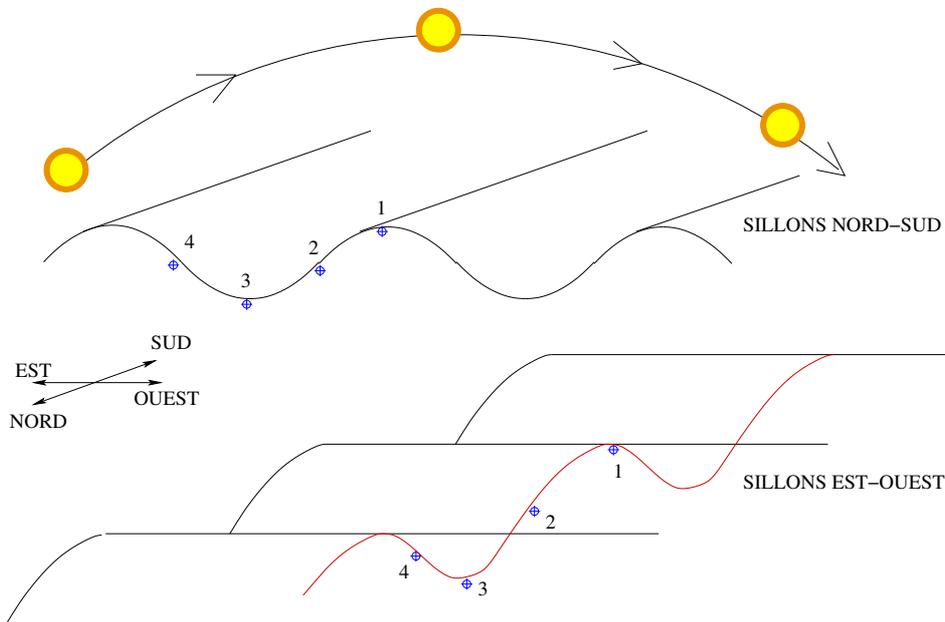


FIG. 2.6 – Emplacement des points de mesure selon l'orientation des sillons, Nord-Sud et Est-Ouest – mesures réalisées par Burrows. Le point 1 correspond au point désigné par "in row" sur la figure 2.7, le point 2 à "10 in. N or E of row", le point 3 à "20 in. N or E of row" et le point 4 à "30 in. N or E of row"

⁴La référence utilise des unités anglo-saxonnes : inches et degrés Fahrenheit. Dans notre analyse, la conversion est réalisée dès que cela est possible, mais les figures issues de l'article original utilisent ces unités. Les conversions sont les suivantes : $T(C) = (T(F) - 32) * 5/8$ et $1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm}$

Les mesures sont relevées toutes les heures durant 33 jours, entre le 16 mai et le 23 août 1958. L'auteur montre principalement deux journées : le 22 mai, et le 22 août. La journée du 22 août, bien que présentant des résultats intéressants pour la communauté agronomique, n'apporte pas de résultats importants pour notre étude. En effet, les sols sont cultivés, et à cette époque de l'année les plants de maïs sont très hauts et ombrent le sol. En revanche, pour la journée du 22 mai, l'auteur considère que les plants sont encore trop petits pour ombrer le sol ; ces résultats sont par conséquent exploitables, bien que devant être considérés avec réserve.

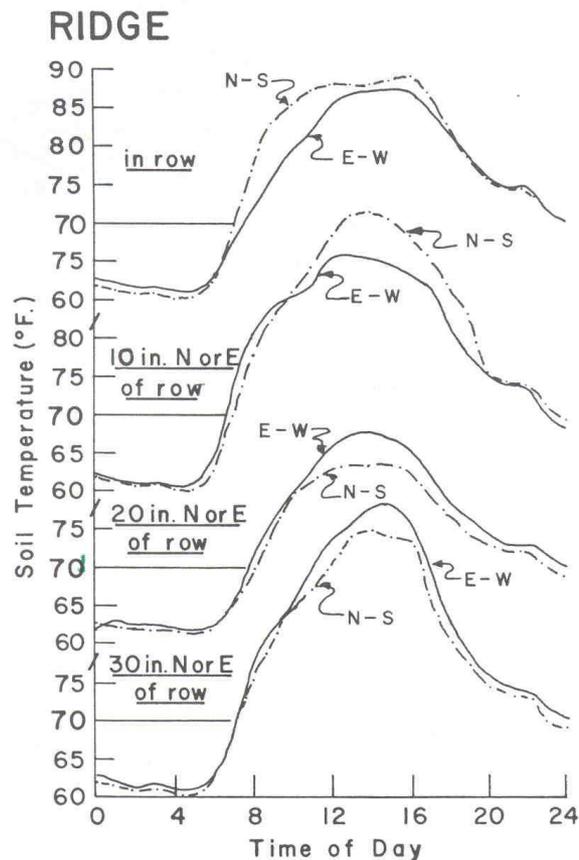


FIG. 2.7 – Effets de l'orientation des sillons sur les températures à 0.6 cm de profondeur à quatre positions : points 1, 2, 3 et 4 de la figure 2.6. Mesures réalisées le 4 juin 1958 par Burrows

Les résultats de Burrows mettent en évidence d'abord une forte variabilité temporelle : entre 13°C et 21°C selon la localisation du point, entre le jour et la nuit (figure 2.7). De plus, cette variabilité temporelle dépend de la situation spatiale du point considéré. Lorsque les sillons sont orientés E-W, les différences de température jour/nuit sont comprises entre 16°C (points 1 à 3) et 21°C (point 4), tandis que pour une orientation N-S les écarts sont plus importants : entre 13°C (point 3) et 20.6°C (point 2). Par ailleurs, pendant la nuit les températures sont légèrement plus faibles pour une orientation N-S des sillons, quelle que soit la localisation du point.

Pour les sillons orientés E-W, les points 1 et 4 reçoivent tous deux le rayonnement solaire pendant toute la période diurne. Néanmoins, pour le point 4 les rayons solaires arrivent avec une incidence proche de la normale. C'est pourquoi les températures les plus élevées sont enregistrées à ce point (36.7°C vers 14h30 contre 31 à 32°C pour les trois autres points).

Lorsque les sillons sont orientés N-S, les températures maximales (environ 35°C) sont enregistrées aux points 2 et 4, respectivement à 13h et 14h. La crête (point 1) est exposée au rayonnement solaire toute la journée ; sa température maximale est de 31.1°C, et elle reste à peu près constante entre 12h et 16h. Le point 3 (situé au creux d'un sillon) est ombré le matin et l'après-midi par les flancs Est et Ouest ; il atteint donc une température plus faible que les autres points (28.3°C entre 12h et 16h). Sa température commence à croître plus tard et à décroître plus tôt que celles des autres points.

Remarque : température de l'air

Seghi et al. [SBG⁺96] et Moriondo et al. [MBMO97] réalisent des études de la variabilité spatiale de la température de l'air en Toscane (Italie), sur un terrain de collines de 15 hectares. Cette étude montre que la température de l'air est fortement reliée à la distance entre le point considéré et le fond de la vallée, plus qu'à la hauteur de ce point. De plus, les différences de températures sont plus significatives lorsque le ciel est dégagé et que l'hygrométrie est faible. Cependant, la température de l'air et les températures de surface pour des sols non plats semblent ne pas interagir. En effet, Burrows [Bur63], lors de son étude expérimentale sur des terrains labourés en sillons, a effectué des mesures de températures d'air à 5, 10, 75 et 150 cm du sol. Il a constaté des gradients inférieurs à 0.5°C dans les couches proches du sol (entre 5 et 10 cm), et aucune différence significative selon la position géométrique du point (au-dessus d'une crête ou d'un sillon). Le gradient le plus important a été observé entre 5 et 150 cm : 1°C. L'auteur en conclut que le profil du sol n'affecte pas les mouvements d'air à la surface.

2.3.2.2 Shaw et Buchele [SB57]

Shaw et Buchele étudient en 1957 l'influence du profil d'un sol sur sa température et sa teneur en eau. Cette étude est menée dans la communauté agronomique, afin de déterminer la meilleure position pour les semis. Les auteurs se fondent sur plusieurs références ayant montré que la face sud d'une pente a une température supérieure à sa face nord.

Les observations ont été menées sur une crête et un sillon (voir figure 2.8) dépourvus de végétation, orientés Nord-Sud. Les points C et E sont donc orientés Est et Ouest. Les températures ont été relevées avec des thermomètres à mercure de petites dimensions.

Les mesures sur deux journées d'observation – 6 juillet et 13 mai 1952 – à une profondeur de 7,6 cm (3 inches) sont illustrées sur la figure 2.9. Les températures sur tout le profil sont plus élevées pour la journée du 6 juin. De plus, pour cette journée, durant toute la période diurne (8h-18h) c'est sur la pente Est que la température est la plus élevée. Les températures les plus faibles sont enregistrées dans le sillon, masqué par les pentes Est et Ouest avant 9h et à partir de 15h. Pour les deux journées de mesure, la température à la crête (*ridge*) est toujours plus élevée qu'au sillon (*furrow*). La face Est atteint son maximum de température autour de midi (par ordre chronologique 23.9°C et 36.7°C), alors que la face Ouest l'atteint peu avant 16h (25.6°C le 13 mai et 35°C le 6 juin). Les maxima de température se déplacent avec le soleil, de la pente Est vers la pente Ouest. Ces résultats rejoignent donc ceux de Burrows [Bur63]. Notons que pour la journée du 6 juin pendant l'après-midi la température sur la face Est est plus élevée que sur la face Ouest. Ce fait est attribué aux conditions météorologiques, l'après-midi ayant été nuageux.

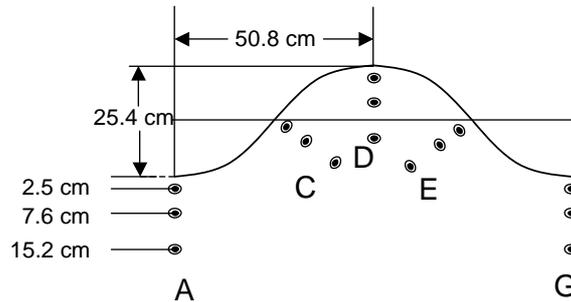


FIG. 2.8 – Localisation des thermomètres dans le profil idéalisé crête-sillon de Shaw et Buchele (1957)

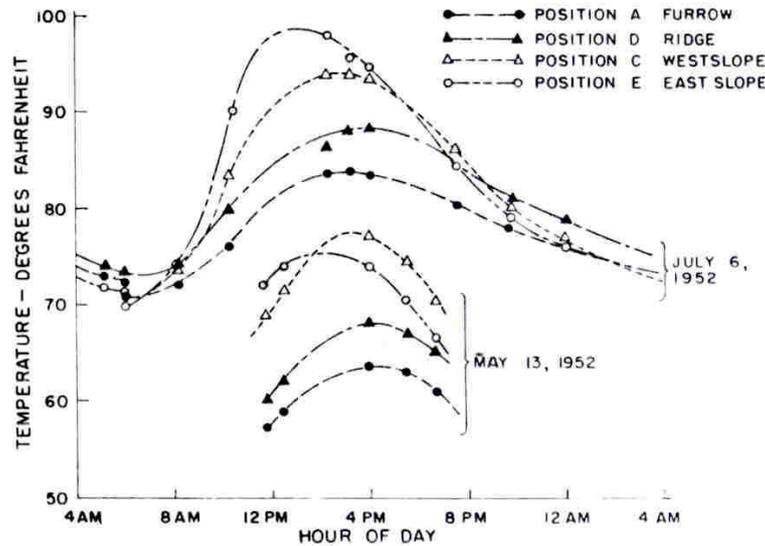


FIG. 2.9 – Températures du sol à 7.6 cm de profondeur dans le profil crête-sillon de Shaw et Buchele

2.3.2.3 Étude théorique : modèle de Mahrer [Mah82]

Mahrer réalise en 1982 une étude théorique et numérique de l'effet de la forme de la surface du sol sur le profil de température. L'auteur étudie trois profils : un sol plat, une crête et un sillon (figure 2.10). La table 2.2 présente la nomenclature utilisée pour ce modèle.

Le modèle développé par Mahrer utilise un maillage cartésien 2D. Ce maillage est le résultat d'une transformation conforme du système de coordonnées adaptées au profil réel de la surface (voir figure 2.11). Il est appliqué aux trois types de profils étudiés.

Dans l'équation 2.18, z est la coordonnée verticale, H est la profondeur du modèle (100 cm) et z_G représente l'ordonnée de la surface.

$$z^* = H \frac{z - z_G}{H - z_G} \quad (2.18)$$

z	coordonnée verticale (cm)	ε	émissivité du sol
H	profondeur du modèle (100 cm)	σ	constante de Stefan-Boltzmann
z_G	ordonnée de la surface	u_*	vitesse de friction à la surface
T_s	température du sol (K)	q_*	humidité spécifique de friction
a	diffusivité thermique (m^2/s)	θ_*	température potentielle de friction
α	albédo	h_x	angle d'élevation vers le plan x
R_S	rayonnement solaire (W)	h_y	angle d'élevation vers le plan y
R_L	rayonnement thermique (W)	e	pression de vapeur de l'air (hPa)
E	chaleur latente du sol	T_P	température prédite (K)
A	chaleur sensible du sol	T_0	température mesurée (K)
S	flux de conduction du sol	N	nombre de points

TAB. 2.2 – Nomenclature du modèle de Mahrer

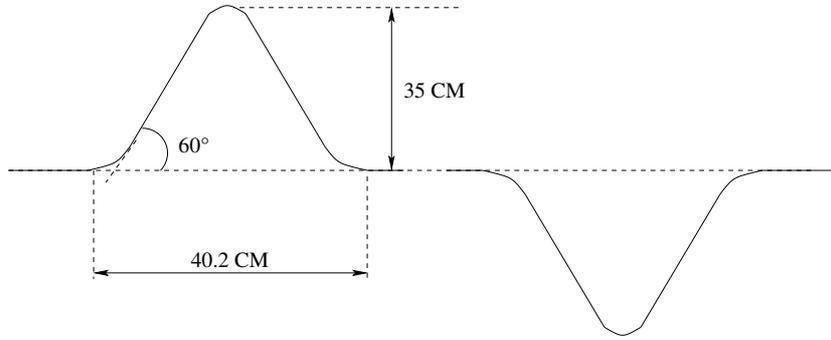


FIG. 2.10 – Profils de sols pour le modèle de Mahrer : une crête, un sillon et un sol plat

Avec ce nouveau système de coordonnées, l'équation de diffusion de la chaleur 2D s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_s}{\partial t} = & \left(\frac{H}{H - z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left(a \frac{\partial T_s}{\partial z^*} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(a \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) \\ & + 2a \frac{\partial^2 T_s}{\partial x \partial z^*} \left(\frac{\partial z^*}{\partial x} \right) + a \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^{*2}} \left(\frac{\partial z^*}{\partial x} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

où T_s est la température du sol et a la diffusivité thermique du sol, supposée constante.

Le calcul des températures est effectué à partir de l'équation de bilan suivante :

$$(1 - \alpha)R_S + R_L + E + A - S - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 = 0 \quad (2.20)$$

Les équations 2.21 à 2.23 décrivent les termes E , A et S :

$$S = \frac{H - z_G}{H} \lambda \frac{\partial T_s}{\partial z^*} \quad (2.21)$$

$$E = \rho L u_* q_* \quad (2.22)$$

$$A = \rho C_P u_* \theta_* \quad (2.23)$$

Dans ces équations, λ est la conductivité thermique du sol, L est la chaleur latente d'évaporation ; u_* , q_* et θ_* sont respectivement la vitesse de friction à la surface, l'humidité spécifique

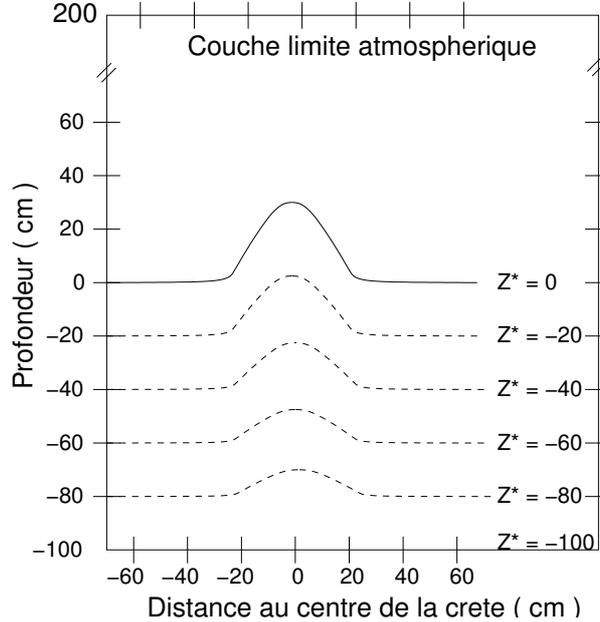


FIG. 2.11 – Description schématique du modèle de Mahrer

de friction et la température potentielle de friction. Leurs valeurs proviennent de fonctions développées dans [Bus73].

Les crêtes et les sillons sont supposés infinis. De plus, tout le sol est supposé émettre un rayonnement IR à la température du point en question. Avec ces deux hypothèses, la modélisation du flux IR est la suivante :

$$R_E = \frac{1}{2}(R_L - \varepsilon\sigma T_s^4)(\cos h_x + \cos h_y) \quad (2.24)$$

où R_L est le rayonnement IR atmosphérique, et h_x et h_y sont les angles d'élévation du point en question vers les surfaces inclinées. Le rayonnement IR atmosphérique est calculé à partir de l'équation de Brunt (voir section 2.2.1).

Les températures de surface sont calculées en utilisant la technique de Newton-Raphson. L'équation 2.19 est résolue numériquement par une technique aux différences finies implicite. Le pas de temps de calcul est de 10 minutes, et la grille spatiale est de 5 cm de côté. D'après l'auteur, ces choix de grilles spatiale et temporelle constituent un bon compromis entre la précision des résultats et la rapidité de temps de calcul.

Pour les simulations, une courbe journalière à deux harmoniques a été calquée sur les mesures de température d'air (voir section 2.4.1), d'humidité relative, des rayonnements solaires direct et diffus, et de vitesse de vent. Les simulations numériques sont comparées à des mesures réalisées pour un sol humide et sablonneux dans l'aire expérimentale de la Faculté d'Agriculture à Rehovot, Israël.

Les simulations des cycles journaliers de la température du sol à une profondeur de 5 cm, pour des points Nord-Sud, sont exposées sur la figure 2.12.

Les températures de la crête sont plus élevées durant la journée ; ces températures sont environ 3°C plus élevées que celles d'un sol plat, et environ 5°C plus élevées que celles du sillon.

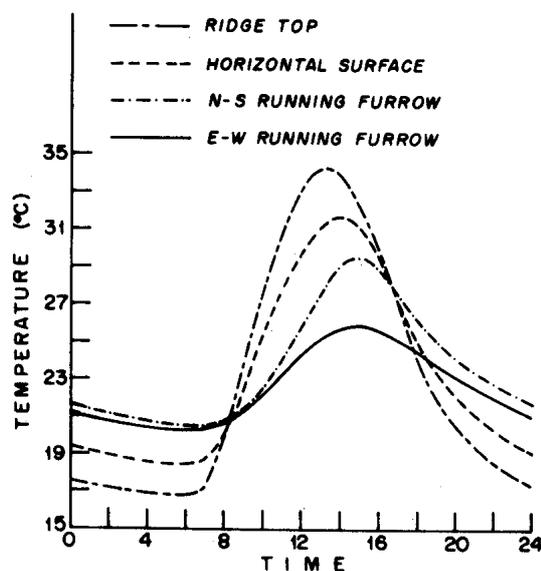


FIG. 2.12 – Modèle de Mahrer : simulation de cycles journaliers de la température du sol à une profondeur de 5 cm le long d'une crête nord-sud, une surface horizontale, un sillon est-ouest et un sillon nord-sud

Pendant la nuit, la crête enregistre la température la plus faible : 17°C contre 18.5°C pour la surface horizontale et 20.3°C au sillon.

Même si des différences notables apparaissent entre les températures des trois différents profils, la température moyenne est presque la même dans les trois cas : elle est, respectivement pour la crête, la surface plane et le sillon, de 24°C, 24.2°C et 24.4°C. L'auteur justifie ces moyennes proches par le fait que, au cours de la journée, les trois profils reçoivent la même quantité de rayonnement solaire.

L'heure de la journée où sont atteintes les températures maximales et minimales est plus tardive pour le sillon ; le terrain plat atteint des températures intermédiaires, et la crête atteint ses valeurs extrêmes plus tôt que les deux autres configurations. Ces résultats sont en accord avec ceux de Shaw et Buchele [SB57], étudiés en début de section.

Une simulation pour des crêtes et des sillons orientés Est-Ouest a également été menée, afin de tester la sensibilité du modèle à l'orientation. Les résultats indiquent qu'à la crête les températures sont similaires à celles obtenues pour une orientation Nord-Sud. Cependant, pour le sillon les températures sont sensiblement différentes (figure 2.12). Ceci est dû au fait qu'un sillon orienté Est-Ouest est presque toujours à l'ombre à l'époque de l'année où se déroulent les simulations, tandis qu'un sillon orienté Nord-Sud reçoit toujours du rayonnement solaire en milieu de journée.

La figure 2.13 montre la simulation de cycles journaliers de la température du sol à une profondeur de 5 cm au milieu des pentes Nord et Sud. La température sur la face Sud est nettement plus élevée qu'au Nord, particulièrement pendant la journée. Les températures maximales pour les deux pentes sont de 25°C et 37°C, respectivement pour la pente Nord et la pente Sud. La pente située au Nord est toujours à l'ombre, ce qui explique que sa température reste faible toute la journée. Au contraire, la pente Sud est toujours au soleil. De plus, le rayonnement solaire arrive avec une incidence presque normale ; le flux reçu est donc plus important, et la température

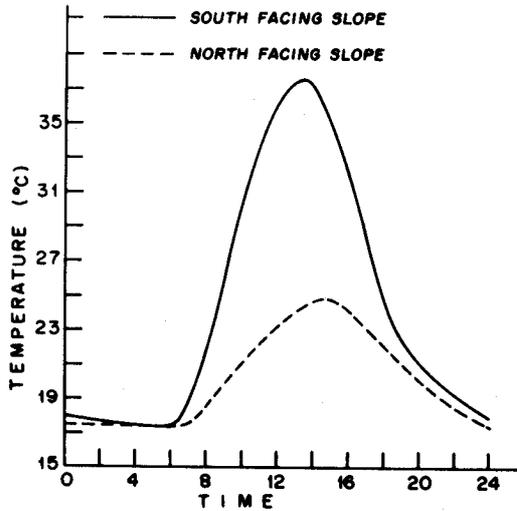


FIG. 2.13 – Modèle de Mahrer : simulation de cycles journaliers de la température du sol à une profondeur de 5 cm au milieu des pentes nord et sud

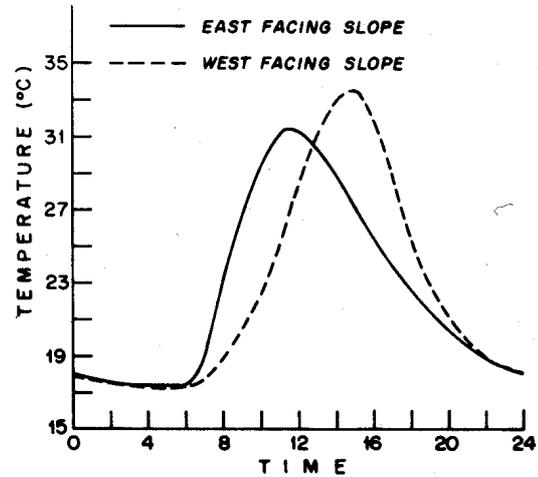


FIG. 2.14 – Modèle de Mahrer : simulation de cycles journaliers de la température du sol à une profondeur de 5 cm au milieu des pentes est et ouest

s'élève plus que pour un sol horizontal.

Les résultats des simulations pour des pentes orientées Est et Ouest sont présentées sur la figure 2.14. La pente Est atteint sa température maximale à 11h00 alors que la pente Ouest l'atteint bien plus tard, vers 15h00. De plus, la pente orientée Ouest est 2°C plus chaude que celle orientée Est. Ceci est expliqué par le fait que la pente Ouest reçoit son rayonnement maximal après 12h00, après avoir déjà été chauffée par conduction et rayonnement pendant la matinée.

L'étude théorique de Mahrer [Mah82] a permis de confirmer et de préciser les résultats expérimentaux précédents, fournis par Shaw et Buchele [SB57] et Burrows [Bur63]. La température la plus élevée est enregistrée pour une pente orientée Sud, tandis qu'une pente au Nord obtient les températures les plus basses. Les pentes Est atteignent leur température maximale le matin, avant un sol horizontal, tandis que les pentes Ouest l'atteignent durant l'après-midi. Par ailleurs, ces dernières atteignent des températures maximales généralement plus élevées que les pentes Est.

D'autre part, l'étude de Mahrer constitue à ce jour et à notre connaissance la seule description précise du champ de température dans un sol non plan. Cette approche est exacte, outre les erreurs de discrétisation numérique. Elle reste néanmoins limitée au cas 2D. Or un modèle de référence 3D est nécessaire pour étudier différentes géométries représentatives de la surface des sols naturels. Un code de calcul 3D est présenté à cet effet dans le chapitre suivant.

2.3.3 Principales conclusions sur la variabilité de la température de surface

Les résultats exposés dans cette section montrent clairement que pour un sol plan la température à la surface n'est en général pas uniforme. Pour un sol présentant des reliefs, la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface est loin d'être négligeable.

L'étude bibliographique concernant l'utilisation des géostatistiques et les études expérimentales a permis de mettre en lumière une variabilité temporelle importante des températures de surface, entre les saisons et entre le jour et la nuit. Les variations temporelles, journalières et annuelles, de la température du sol sont généralement supposées sinusoïdales. Aux échelles annuelle et journalière, cette modélisation donne des résultats satisfaisants. Les modèles sont nombreux, généralement monodimensionnels multicouches et adaptés à des cas particuliers (couche de neige, couche de sol glacé, feuilles ou humus, etc.). Spatialement, la variabilité de la température existe également, et elle semble être reliée entre autres facteurs au contenu en eau du sol et à sa topographie.

Les résultats expérimentaux tirés de [Bur63] et [SB57] ont mis en évidence, pour des surfaces non planes, une forte variabilité de la température à la fois temporelle et spatiale, celles-ci étant liées. L'étude théorique de Mahrer [Mah82] confirme ces variabilités.

Sur un cycle annuel, les températures du sol sont reliées à la température de l'air. Ainsi, dans [SB57], les températures mi-mai sont environ 11°C inférieures à celles relevées début juin. Sur un cycle diurne, c'est le rayonnement solaire qui gouverne les échanges : pour un sol horizontal plat, les variations journalières peuvent atteindre 22°C entre le jour et la nuit. La température maximale est atteinte généralement autour de 13h. Lorsque la surface n'est ni plane ni horizontale, les différences maximales de températures jour/nuit sont influencées, ainsi que l'heure du maximum de température.

Ainsi, la situation d'un point par rapport à l'incidence des rayons solaires apparaît comme primordiale. En effet, dans [Bur63], la pente Sud des sillons E-W reçoit les rayons solaires sous une incidence proche de la normale pendant toute la période diurne, et enregistre la température la plus élevée (36.7°C). De la même manière, les points 2 et 4 (respectivement sur les pentes Est et Ouest) pour une orientation N-S des sillons reçoivent les rayons solaires en incidence normale respectivement le matin et l'après-midi. Ils atteignent au maximum 35°C , l'un autour de 13h et l'autre vers 15h30. Au contraire, le point 3, situé dans le sillon, est ombré par les flancs ; il est le plus froid, avec seulement 28.3°C atteints entre 12h et 16h.

Les résultats des trois études [SB57, Bur63, Mah82], concernant des surfaces avec crêtes et sillons, orientés Nord-Sud ou Est-Ouest, concordent. Les températures maximales sont atteintes pour une pente orientée Sud, et les minimales pour une pente orientée au Nord. Pour des pentes orientées Est et Ouest, l'heure du maximum de température est décalée. Les températures maximales sont atteintes autour de 11h pour un point situé sur une pente Est, et autour de 15h pour une pente Ouest. Les températures sur la pente Ouest d'une crête sont plus élevées de quelques degrés que celles trouvées sur la pente Est. En effet, la pente située à l'Ouest reçoit le rayonnement solaire seulement après midi, alors qu'elle a déjà été chauffée par conduction et rayonnement pendant toute la matinée. Durant la nuit, ce sont les crêtes qui enregistrent les températures les plus faibles, tandis que les sillons possèdent les températures les plus élevées.

2.4 Modèles physiques

Cette section présente des modélisations analytiques de la température de l'air. Elle expose ensuite diverses formulations empiriques du coefficient de convection. La convection naturelle et la convection forcée sont traitées. Une modélisation 3D de ce coefficient d'échange convectif est également montrée.

2.4.1 Température de l'air

La température de l'air est une donnée d'entrée de la plupart des modèles de température de surface. La plupart du temps, on dispose de mesures de températures d'air. Néanmoins, pour faire de la prédiction, il est utile voire nécessaire de disposer de modèles simples et fiables, ceux-ci permettant de limiter les données d'entrée des modèles.

Mahrer [Mah82] (voir section 2.3.2.3) a utilisé, pour les simulations numériques, une fonction à deux harmoniques, recalée sur des mesures horaires. La fonction qu'il a utilisée est la suivante :

$$T_{air}(t) = 23 - 1.24 \sin(15t) - 3.22 \cos(15t) - 0.43 \sin(30t) + 0.65 \cos(30t)$$

Cette fonction est purement empirique, et ne peut pas être appliquée à un autre lieu et une autre date que celles de la simulation (Rehovot, Israël, octobre 1981).

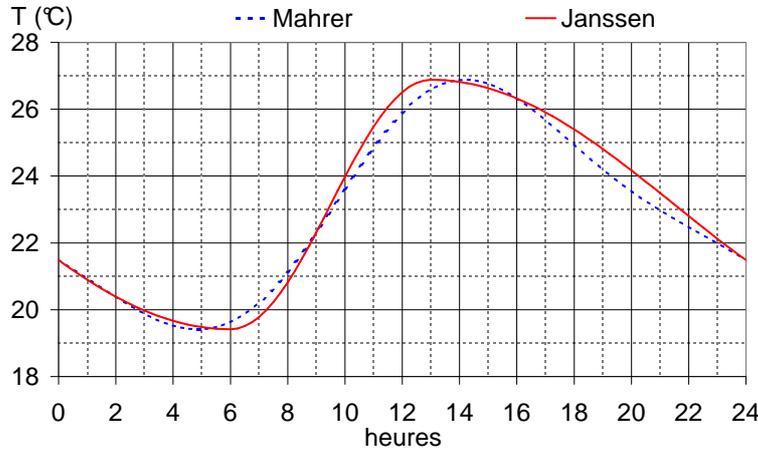


FIG. 2.15 – Comparaison des températures d'air : formule empirique de Mahrer et modèle analytique de Jansson

Jansson [Jan98] propose un modèle qui ne requiert que la connaissance de deux températures : les températures maximale et minimale de l'air (respectivement $T_{air\ max}$ et $T_{air\ min}$) sur une période de 24h. Alors la température moyenne et son amplitude sont obtenues ainsi :

$$T_{air\ moy} = \frac{T_{air\ max} + T_{air\ min}}{2} \quad \text{et} \quad T_{air\ ampl} = \frac{T_{air\ max} - T_{air\ min}}{2}$$

La température de l'air à l'instant t s'écrit alors :

$$T_{air}(t) = T_{air\ moy} + T_{air\ ampl} \cdot \cos\left(2\pi \frac{t - t_{ph}}{Y_{cycle}}\right) \quad (2.25)$$

où t_{ph} est le déphasage et Y_{cycle} la durée du cycle en secondes (ici $Y_{cycle} = 24 * 3600s$). En pratique, ce modèle se traduit par une température minimale à l'heure du lever du soleil, et une température maximale à t_{ph} après le zénith. Le déphasage de l'heure de température maximale généralement constaté est égal à une heure.

Une comparaison de la fonction de Mahrer et du modèle de Jansson a été réalisée (figure 2.15). Pour le modèle de Jansson, l'heure de température minimale est prise à 6h, le décalage t_{ph} est égal à 1h, et les températures $T_{air\ max} = 26.9^\circ\text{C}$ et $T_{air\ min} = 19.4^\circ\text{C}$. L'heure de température maximale est décalée entre les deux modèles, mais dans l'ensemble la concordance est bonne.

2.4.2 Coefficient d'échange convectif

En état d'équilibre, un système thermodynamique homogène est caractérisé par des variables d'état uniformes et constantes. Soumis à certaines conditions, un système peut être en état de déséquilibre. Pour une surface en contact avec un fluide, un transfert d'énergie par transport macroscopique de matière a alors lieu. Ce processus est appelé convection de la chaleur.

La convection peut avoir deux origines. Si le fluide est au repos, elle est due à une différence de température entre la surface et le fluide. On parle alors de convection naturelle. Si le fluide est au contraire en mouvement, la convection est dite forcée.

La convection est caractérisée par un coefficient d'échange h , qui est généralement décomposé en :

$$h = h_n + h_f \quad (2.26)$$

où h_n est le coefficient de convection naturelle, et h_f le coefficient de convection forcée.

Une formulation empirique, parmi les nombreuses existantes pour la convection naturelle externe, est extraite de [Jac84] et exprime le coefficient de convection naturelle h_n comme :

$$h_n = 1.7 \cdot |T_s - T_{air}|^{1/3} \quad (2.27)$$

où T_s est la température de la surface.

Le coefficient de convection forcée extérieur h_f dépend principalement de la vitesse du vent, et il existe, comme pour la convection naturelle, beaucoup de formulations empiriques, selon la forme et l'orientation des surfaces (plaques planes horizontales ou verticales, cylindres, etc.).

Le code de modélisation PRISM [SR88] utilise une approche simplifiée, dans laquelle :

$$h_n = 0.733(T_s - T_{air}) \quad (2.28)$$

$$h_f = 1.9 \cdot V_{vent} \quad (2.29)$$

Jacobs a formulé dans [Jac84] une expression en trois dimensions du coefficient de convection forcée h_f . Celui-ci se décompose en :

$$h_f = \sin \beta \cdot h_{f_{horizontal}} + (1 - \sin \theta) \cdot h_{f_{vertical}} \quad (2.30)$$

où :

$$h_{f_{horizontal}} = 10.5 \cdot V_{vent}^{0.57} \quad (2.31)$$

$$h_{f_{vertical}} = C \cdot V_{vent}^M \quad (2.32)$$

β est l'angle situé entre la verticale et la normale à la facette. Les coefficients C et M pour le calcul de $h_{f_{vertical}}$ dépendent de la situation au vent de la facette :

- si la surface est au vent : $C = 7.7$ et $M = 0.57$;
- si la surface est sous le vent : $C = 7.9$ et $M = 0.3$.

C'est cette formulation qui est utilisée dans le code thermique MISTRAL (voir chapitre 3), développé dans le Département d'Optique Théorique et Appliquée de l'ONERA⁵ (voir chapitre 3). Le modèle de Jacobs est un des seuls modèles permettant la prise en compte de la nature tridimensionnelle des objets pour le calcul du coefficient de convection forcée.

⁵Office National d'Études et Recherches Aéronautiques

2.5 Codes de simulation de scènes

Depuis les 30 dernières années, le besoin d'images artificielles s'est développé, dans des domaines aussi divers que l'animation, la conception assistée par ordinateur (CAO), ou la simulation de vol. La plupart de ces applications, développées au sein de la communauté informatique, sont désignées par le terme de modèles de génération d'images de synthèse. Toutes ces techniques créent des images dans la portion visible du spectre, et sont davantage attachées à la crédibilité visuelle des images qu'à leur réalisme. Les résultats de ces techniques dans la bande visible sont remarquables. Néanmoins le problème est plus complexe dès lors qu'on essaie de générer des images réalistes non seulement dans le visible mais sur tout le spectre, y compris dans la bande infrarouge (IR).

La création d'images crédibles requiert une modélisation 3D réaliste, où le réalisme est fondé principalement sur l'éclairage des objets dans le visible. La simulation correcte de cet éclairage est par conséquent une étape cruciale, et complexe, pour des images précises. La forme que prend cet éclairage doit être maîtrisée de la source jusqu'aux différents objets composant la scène. Cet éclairage est ensuite soit absorbé, soit diffusé, soit réfléchi par ces objets. Puis ces objets émettent à leur tour, et leur rayonnement est soit absorbé, soit réfléchi, soit diffusé lorsqu'il traverse l'atmosphère. La propagation atmosphérique doit donc être incluse dans la modélisation synthétique réaliste d'une scène. Les codes atmosphériques les plus communément utilisés pour simuler cette propagation sont *LOWTRAN*, *MODTRAN* et *FASCODE* pour la simulation des effets de l'atmosphère sur le rayonnement.

La luminance apparente d'un objet dans l'IR thermique est en premier lieu due à sa température et à ses propriétés optiques, ce qui constitue une difficulté supplémentaire par rapport à la modélisation dans le domaine visible. Le calcul de la température apparaît comme un enjeu primordial pour la modélisation de scènes infrarouges. D'autres variables environnementales s'ajoutent, comme la vitesse du vent ou la couverture nuageuse. Tous ces facteurs doivent être pris en compte pour générer une image synthétique infrarouge conforme à la réalité.

Cette section présente un état de l'art des codes générant des images infrarouges. Beaucoup de ces codes proviennent du domaine militaire. De ce fait, certains de leurs composants sont parfois classifiés ou confidentiels, et la littérature est donc souvent limitée à des descriptions générales. Ces généralités rendent difficile l'évaluation des capacités réelles des différentes approches. De plus, l'incorporation de composants de ces différents modèles dans d'autres méthodologies paraît difficile.

Tous les codes de simulation d'images doivent passer par quatre étapes avant de générer une image. Tout d'abord, la scène à modéliser doit être décrite géométriquement. Cette étape est réalisée à l'aide de modeleurs géométriques 2D ou 3D, qui créent un maillage de la scène et des objets qui la composent. Ensuite, les flux d'éclairage sur la scène doivent être calculés, en tenant compte de la transmission atmosphérique. La troisième étape consiste à calculer les températures de surface des objets. Ce calcul nécessite la connaissance des propriétés thermiques et optiques des différents objets de la scène. L'estimation des températures de surface repose sur deux hypothèses principales : l'élément de surface est supposé localement plan, et les différentes propriétés (conductivité, ...) sont supposées indépendantes de la température. La température d'une surface est ensuite obtenue en écrivant le bilan énergétique, c'est-à-dire l'équation de conservation des flux. Après estimation de ces températures surfaciques, les luminances de la scène sont calculées sur le maillage de la scène, à partir des éclairages, des propriétés optiques et des températures de surface des objets.

Les codes présentés dans cette section ne sont pas tous structurés de cette manière en quatre étapes. Certains modules de calcul regroupent plusieurs étapes (par exemple, le code GENESSIS groupe le maillage de la scène et le calcul des éclairagements), et en découpent d'autres (par exemple SHIPIR sépare la luminance de l'environnement de celle des objets). Néanmoins, quelle que soit l'architecture des codes, la génération d'images nécessite ces quatre étapes de calcul. Cette section s'attache à décrire, aussi précisément que possible au regard des informations disponibles, les capacités et limitations des principaux codes de simulation infrarouge. L'accent est mis sur la modélisation des températures de surface et la prise en compte éventuelle de la variabilité spatiale et temporelle de celles-ci.

2.5.1 Le code SHIPIR [VF99]

SHIPIR est un code de prédiction de signature infrarouge de bateaux et de leur environnement maritime. Il est constitué de plusieurs modules : un modèle géométrique permettant la modélisation de géométries de navires complexes, un modèle de propagation atmosphérique (MODTRAN), un modèle de transfert thermique, un modèle de réflectance de la mer, un modèle de rayonnement surfacique prenant en compte les réflexions multiples, et un modèle d'émission de gaz d'échappement. Ce code fournit des résultats convenables pour la radiance de l'environnement.

Le modèle thermique de SHIPIR réalise les calculs en stationnaire, ce qui conduit à de fortes erreurs (de l'ordre de 8°C), dues à la variabilité temporelle des températures. Ce code est donc inutilisable hors de sa fonction primaire.

2.5.2 Le code USAF-TDA

Le code USAF-TDA (US Air Force Tactical Decision Aid) permet le calcul des températures apparentes d'une scène. Son modèle repose sur une modélisation en couches du sol.

Chaque pixel est supposé homogène en matériau.

Le flux solaire absorbé est considéré comme ne dépendant que du flux solaire incident total, la surface est supposée se comporter comme un corps gris dans l'infrarouge, et le flux conductif est supposé normal à la surface. De plus, la température dans le volume est supposée varier comme la température extérieure. L'éclairage solaire est calculé avec le modèle semi-empirique de Shapiro, et le modèle de Wachmann est utilisé pour la détermination de l'éclairage de fond de ciel.

La limitation principale de ce modèle est que ses paramètres sont ajustés à l'aide d'un grand nombre d'observations d'une même scène en fonction des conditions météorologiques, donc le modèle ne peut pas être appliqué à une zone arbitraire pour la prédiction. Cette limitation conduit à une erreur maximale de l'ordre de $\pm 5^\circ$ sur la température apparente absolue de la scène.

2.5.3 GMGO Background model "CANOPY"/"ROAD"

Les codes "CANOPY" et "ROAD" du GMGO (German Military Geophysical Office) permettent de générer des vues 2D d'une scène dans l'IR. Les hypothèses de ces modèles sont principalement les suivantes, comme pour le modèle USAF-TDA :

- le flux solaire absorbé ne dépend que du flux solaire incident ;
- la surface se comporte comme un corps gris dans l'infrarouge.

"CANOPY" est d'application spécifique à des zones de végétation vues du dessus à basse résolution. Cette application permet de supposer le problème quasi-monodimensionnel et de se

ramener à un modèle de couches. L'autre, nommé "ROAD", est le même que celui de l'USAF-TDA, mais n'est utilisé que dans le cadre de surfaces artificielles.

La principale limitation de ces codes est qu'ils nécessitent la connaissance de nombreux paramètres météorologiques : température et humidité de l'air, vitesse du vent, visibilité, couverture nuageuse, hauteur et type de nuages, etc. Par ailleurs, la modélisation de la température étant 1D, nulle considération n'est faite de la variabilité spatiale de la température à la surface.

2.5.4 Le code IGADS

IGADS (Image Generation And Delivery System) est un logiciel anglais développé par *Logical Defence and Civil Government Ltd.* Cet outil permet la génération d'images infrarouges à partir de modèles de terrains entrés par l'utilisateur et générés par le modèleur géométrique AUTOCAD 12; des objets 3D stationnaires ou se déplaçant peuvent être inclus. La modélisation thermique du terrain prend en compte les caractéristiques géométriques et thermiques des surfaces (position, orientation, conductivité et diffusivité thermique), ainsi que les caractéristiques atmosphériques à une date et une heure données, calculées par LOWTRAN [KSA⁺88]. Les valeurs optiques (émissivité et absorptivité) associées aux différentes surfaces sont entrées pour deux longueurs d'onde. Ces deux longueurs d'onde permettent de dissocier les caractéristiques visibles et l'infrarouge.

Le module thermique tient compte d'un historique au niveau de l'éclairement solaire des facettes. Cependant, les réflexions multiples, les ombres portées et les interactions entre les différents objets ne sont pas mentionnées. De plus, le modèle de radiance n'est pas accessible. L'utilisation de ce modèle est donc exclue, tant à cause de la simplicité apparente du modèle thermique qu'à cause de l'indisponibilité des sources du code.

2.5.5 Le code PRISM [SR88]

Le code PRISM (Physically Reasonable Infrared Signature Model) a été développé au TACOM (Tank Automotive COMmand). À l'origine, ce code a été développé pour modéliser la radiosité des véhicules terrestres en milieu naturel. Son originalité tient dans le fait qu'il est capable de modéliser une source de chaleur interne (moteur, échappement, ..). PRISM est interfacé avec le modèleur géométrique FRED (Facet Region Editor).

Le traitement du milieu environnant est découplé du traitement du véhicule. Dans un premier temps, la température du terrain autour du véhicule 3D est calculée par le module thermique TERSIG, lequel inclut un modèle de sol et de couverture. La température du terrain est calculée par la résolution monodimensionnelle de l'équation de la chaleur en multicouche, et discrétisée par une méthode aux différences finies de type Crank-Nicholson. Les propriétés thermiques du sol (conductivité et diffusivité) sont fonction du taux d'humidité interne. La surface est supposée absorber et réfléchir de façon diffuse dans les bandes visible et IR. Les éclairagements solaire et de fond de ciel sont approximatés par des fonctions internes, ou bien entrés par l'utilisateur.

Après le traitement du sol, les températures de facette du véhicule 3D sont calculées. Le principe de modélisation utilisé est identique à celui du sol : le calcul est 1D, les facettes sont supposées isothermes et l'éclairement est supposé uniforme par facette. La conduction latérale est donc négligée. Le bilan radiatif sur les facettes prend en compte les échanges avec le sol. La radiosité de la scène est ensuite calculée par un bilan entre le ciel, le terrain et les facettes.

Plusieurs critiques peuvent être faites à l'encontre de ce code. Premièrement, il n'est fait aucune mention de l'écrantage solaire sur les facettes. De plus, seuls deux facteurs optiques

sont pris en compte : α pour la fraction d'énergie absorbée dans le visible, et ε pour la fraction d'énergie absorbée sur l'ensemble du spectre (hypothèse de corps gris). Enfin, les calculs sont monodimensionnels et les températures uniformes par facette, indiquant que la variabilité spatiale des températures de surface n'est nullement prise en compte.

2.5.6 Le code GENESSIS

GENESSIS (GENERIC Scene SIMulation Software) est un code qui permet de générer des vues 2D du sol dans les domaines visible, proche infrarouge et infrarouge, en fonction d'un certain nombre de paramètres spécifiés par l'utilisateur, tels que la définition spatiale de la vue, la bande spectrale, la date et l'heure d'observation, l'angle de vue et les conditions météorologiques. Ce modèle est structuré en deux modules principaux : le module géométrique, qui calcule l'orientation des surfaces, leur visibilité et leur éclairage solaire, et le module de radiance, qui calcule la carte des radiances. Les composantes atmosphériques doivent être calculées séparément avec le code APART (Atmospheric Propagation And Radiation Transfer). Trois bases de données sont également associées au code GENESSIS, pour les propriétés optiques, les propriétés thermiques et les géométries.

La base de données géométrique décrit la topographie et les informations relatives au type de couverture. La surface à modéliser est définie en tant que grille rectangulaire de points uniformément répartis. À chaque point sont associés quatre paramètres : altitude, type de couverture primaire, type de couverture secondaire, et pourcentage de couverture primaire. Une carte continue des valeurs est ensuite calculée par interpolation bicubique des valeurs discrètes. Le fichier de données thermiques contient les températures de surface pour un certain nombre de conditions d'environnement local et de types de matériaux. Le fichier de propriétés optiques contient le spectre de réflexion de 19 types de surfaces et exploite six types de réflexions (diffuse, directionnelle et bidirectionnelle pour les cas polarisés et non polarisés).

La simulation d'une scène utilise un algorithme point par point. Un cycle correspond à la collecte d'information au point considéré, puis au calcul de la radiance apparente de ce point, et enfin au calcul de la radiance de ce pixel à la résolution spatiale demandée par l'utilisateur. La radiance apparente est définie comme la radiance de la source, atténuée de la diffusion et de l'absorption atmosphériques, et augmentée par l'émission atmosphérique entre la source et l'observateur.

La grille de points uniforme est bien adaptée à la modélisation des sols. Néanmoins, plusieurs points négatifs conduisent à ne pas envisager l'utilisation de ce modèle. En premier lieu, l'interpolation par spline bicubique n'est pas compatible avec des géométries présentant des surfaces anguleuses. De plus, le choix n'est pas possible pour le calcul et l'interfaçage des données atmosphériques : il faut utiliser le code APART. Par ailleurs, il n'existe pas d'écrantage solaire permettant de prendre en compte le déplacement des ombres solaires ; Enfin, la température de surface est approchée par une méthode empirique. Cette méthode peut conduire à des erreurs importantes ; de plus, elle ne permet en aucun cas la modélisation ou la prise en compte de la variabilité spatiale de la température de surface.

2.5.7 Le code SensorVision [DW01]

SensorVision est un code de prédiction de scènes infrarouges en temps réel. Son modèle d'émission thermique calcule la radiance reçue par un capteur provenant de l'émission thermique d'un matériau à la température T . La base de données optiques utilisée contient les données d'émissivité de 110 matériaux. Le coefficient de transmission atmosphérique spectrale est calculé avec le code MOSART (Moderate Spectral Atmospheric Radiance and Transmittance).

Le calcul des températures de surface s'effectue avec le code TERTEM (Terrain Temperatures). C'est un modèle thermique considérant chaque surface comme composée de trois couches : une couche de surface et deux sous-couches, la deuxième étant supposée d'épaisseur infinie. Les calculs sont 1D, et les matériaux des différentes couches sont définis par six paramètres : l'absorptivité, l'émissivité, la conductivité thermique, la capacité calorifique, la masse volumique et la longueur caractéristique.

La prise en compte de la variabilité spatiale est réalisée dans le module de radiance, mais pas dans le module thermique. SensorVision dispose d'un TMM (Texture Material Mapper), qui permet à l'utilisateur d'associer la radiance d'un matériau à une texture, qui est ensuite plaquée sur l'objet (voir les méthodes de placage de texture en section B.2). Ce code est l'un des seuls prenant en compte des "textures thermiques". Néanmoins, cette prise en compte est réalisée après le calcul des températures ; c'est donc la variabilité spatiale de l'émissivité de surface et non celle de la température qui est prise en compte.

2.5.8 Le code GTVISIT

Le laboratoire d'électromagnétique de l'Institut de Recherche Technologique de Géorgie (GTRI) a développé un programme permettant la génération d'images synthétiques de scènes, appelé GTVISIT (Georgia Tech Visible and Infrared Synthetic Imagery Testbed). Ce code requiert les sorties de deux autres modèles : GTSIG et IRMA, décrits plus loin dans ce paragraphe. Dans GTVISIT, les scènes sont composées d'un environnement modélisé par un maillage, et d'objets, composés de facettes et placés dans cet environnement.

Pour chaque point, quatre données sont nécessaires, issues de bases de données : le type de matériau (regroupant les propriétés thermiques), la hauteur du point ou élévation, la radiance, et la réflectance IR thermique. Le type de matériau et l'élévation peuvent provenir soit de sources réelles (images satellites et mesures d'élévation) soit de données synthétiques, soit d'une combinaison des deux. La radiance et la réflectance sont générées à partir de la température et/ou de la réflectivité de chaque matériau. Celles-ci sont issues soit de mesures soit de prédictions thermiques. Le code génère ensuite des scènes par la technique de Z-buffering (voir section B.1). Ensuite, l'atténuation atmosphérique est calculée. Pour gagner en temps de calcul, GTVISIT précalcule les valeurs de radiance pour 12 orientations différentes de chaque objet de la scène.

GTSIG calcule la radiance des objets de la scène. Il utilise un modèle thermique 3D et un modèle de radiosité. Les processus physiques inclus dans le modèle thermique sont les rayonnements solaire et atmosphérique, les processus de transfert de masse (évaporation, condensation, sublimation et précipitation), la convection, les ombrages et les réflexions multiples.

IRMA a été développé pour l'Air Force par Grumman Aerospace Corporation. C'est une approche semi-empirique de transfert thermique, permettant le calcul de la radiance pour chaque facette d'un objet, fondé sur l'historique thermique de l'objet. Un modèle IRMA est plus facile à construire qu'un modèle GTSIG et est préféré lorsque le rayonnement solaire et les ombrages sont importants.

Le précalcul des valeurs de radiance selon 12 orientations ne permet pas de générer une image radiométrique exacte. Les textures de surface ne sont pas du tout gérées, ni au niveau des températures de surface ni au niveau des radiances. De plus, les interactions entre l'environnement et les différents objets ne sont pas prises en compte, pas plus que l'historique d'ombrage solaire pour chaque pixel. Enfin, les données disponibles sur les modèles thermiques et de radiance utilisés sont trop faibles pour convenir à une quelconque utilisation de tout ou partie de ce code.

2.5.9 Le code DIRSIG [SBVS95]

DIRSIG (Digital Imaging and Remote Sensing Image Generation model) est un logiciel de génération de scènes synthétiques multispectrales. Il a été développé au Rochester Institute of Technology (RIT) et est décrit dans la thèse de Salvaggio [Sal94]. Le code DIRSIG permet de générer des images sur tout le spectre, de 0.4 à 20 μm ; il part de la modélisation géométrique d'une scène 3D avec le modèleur AutoCAD, et prédit la radiance issue de la surface.

Le but de la modélisation thermodynamique est ici énoncé comme le calcul, au cours du temps, des températures des objets de la scène influencés par leur environnement. Ce calcul est réalisé par le code THERM, qui est un module composant AIRSIM (Air Force Infrared Simulated Image Model), et qui a été développé par DCS Corp. [DCS97]. Les températures sont calculées séparément pour chaque facette, en fonction du temps, et chaque facette est supposée uniforme en température. Ce calcul utilise le modèle thermique du code PRISM (voir plus haut). Les calculs sont donc 1D, et la conduction entre deux facettes adjacentes n'est donc pas prise en compte.

Les paramètres météorologiques peuvent être pris en compte de deux manières : soit par appel à un fichier météo défini par l'utilisateur, soit en fournissant au code un minimum de données (par exemple, pour la température de l'air : heures et températures minimale et maximale). Des modèles internes permettent d'interpoler les données manquantes, et ainsi d'estimer l'historique météorologique sur 24h. Par un algorithme de lancer de rayon, le code détermine pour chaque facette si elle est soumise partiellement ou totalement au rayonnement solaire direct. La présence de nuages est gérée, à l'aide de LOWTRAN. L'atténuation atmosphérique est calculée avec un modèle appelé SVGM (Spectral Vector Generating Model), et incluant le code MODTRAN.

Le code DIRSIG fournit des images de radiance réalistes en entrée capteur. La validation par rapport à des mesures montre que les erreurs sur les températures apparentes sont de l'ordre de 5°C en bande III (8-12 μm) et de 6°C en bande II (3-5 μm). Les auteurs soutiennent qu'en échelle absolue les erreurs observées sont acceptables pour les applications de reconnaissance de cible (ATR : Automated Target Recognition).

Ce code a deux principaux inconvénients. Tout d'abord, il considère les transferts thermiques comme monodimensionnels, et ne gère donc pas la diffusion latérale. Ensuite, même si c'est une suggestion des auteurs, le code ne gère pas encore les textures de surface, en température ou en radiance.

2.5.10 Le code "Paint the Night" [VS97]

Paint The Night (PTN) est un logiciel développé par le CECOM (US Army Communications Electronics Command) en collaboration avec le laboratoire de recherche de l'armée américaine (ARL : Army Research Laboratory). C'est un code de recherche, faisant partie d'un programme gouvernemental.

PTN est un logiciel de simulation de scènes synthétiques thermiques à haute résolution. Le module OSIRIS (Optimized Synthetic Infra-Red Interactive Simulation) réalise la modélisation 3D thermique et inclut la génération de textures thermiques 2D, les effets thermiques atmosphériques, la génération de terrain à haute résolution spatiale (moins d'un mètre), et la représentation d'arbres. PTN peut produire des images en temps réel. Il est possible de réaliser des simulations en réseau LAN (Local Area Network), par exemple pour les entraînements virtuels de l'infanterie.

Ce code semble intéressant, puisqu'il mentionne la prise en compte de textures thermiques 2D. Néanmoins, c'est un code de recherche des laboratoires de l'armée américaine. Les sources ou tout autre renseignement plus précis sur les modèles utilisés sont par conséquent indisponibles.

2.6 Vue d'ensemble

Beaucoup de codes de génération d'images synthétiques en luminances existent. Quelle que soit la structure interne des modules de calcul de ces codes, la génération d'images nécessite quatre étapes, partant de la représentation géométrique et arrivant à une image en luminances. La première étape est la représentation en 3D de la scène à simuler, sous forme de maillage, avec des modeleurs de géométries surfaciques tels AUTOCAD (code IGADS). Ensuite, les flux d'éclairement sur la scène doivent être calculés, en tenant compte de la transmission atmosphérique. Ces calculs sont réalisés généralement à l'aide des codes MODTRAN ou LOWTRAN (utilisés par les codes ShipIR, DIRSIG ou IGADS) ; certains codes de simulation IR ont développé un module spécifique, comme APART pour le code GENESSIS, ou MOSART pour le code SensorVision. La troisième étape constitue le calcul des températures de surface des différentes facettes composant la scène. Ce calcul nécessite la connaissance de paramètres de localisation (date, heure, latitude, longitude, ...), de paramètres météorologiques (température d'air, visibilité, humidité, ...), et bien sûr des propriétés thermiques (conductivité, diffusivité, ...) et optiques (émissivité, absorptivité) de chaque type de surface. La quasi-totalité des codes considère des transferts de chaleur monodimensionnels. Enfin, à partir des températures de surface, des éclairagements et des propriétés optiques des surfaces, la carte de luminances peut être calculée, par un bilan entre le ciel, le terrain et les facettes.

Un des principaux inconvénients, commun à beaucoup de codes (en particulier les codes du German Military Geophysical Office), est le besoin de données météorologiques pour obtenir des résultats de températures acceptables. Or lorsqu'il s'agit de prédiction ces données sont indisponibles. Toute la difficulté réside dans la simulation de ces données météorologiques à partir du minimum d'entrées possible. Différents codes de simulation ont donc intégré des modèles pour générer un historique météorologique sur 24h (DIRSIG, GTVISIT, GENESSIS).

Les codes de simulation de scènes IR et de génération d'images présentés dans cette section sont principalement issus de laboratoires de recherche militaires. Cette origine limite la disponibilité des codes sources et des modèles réellement implantés, de par le caractère confidentiel de certaines informations. Il est donc très difficile d'estimer la validité de chaque code, et impossible de réaliser une comparaison de leurs performances respectives.

Le présent état de l'art des codes de simulation IR existants nous a permis de constater que la prise en compte de la variabilité spatiale des températures de surface est un domaine encore peu exploré. C'est pourtant un enjeu important pour l'amélioration du réalisme des scènes simulées, en particulier à résolution fine (moins d'un mètre).

La variabilité spatiale des températures en surface n'est jamais considérée : pour tous les codes, la température de chaque élément de surface (facette) est supposée uniforme. Les variations spatiales de la température conduisent à des variations spatiales de luminance, qui peuvent être prises en compte comme des textures. Seulement deux codes mentionnent le terme de texture : le code SensorVision effectue du placage de texture (voir section B.2) sur les objets, uniquement pour l'image en luminance. Et le code PTN (Paint The Night) fait état d'utilisation de textures thermiques 2D. Néanmoins, c'est un code de recherche de l'armée américaine. Il n'est de ce fait pas disponible, et aucun détail à propos de ces textures thermiques ne peut être obtenu.

Chapitre 3

Le code MISTRAL

Les images infrarouges mettent en jeu un grand nombre de processus physiques tels que l'orientation des surfaces observées, leur réflexion, leur émissivité, ou l'inertie thermique des différents matériaux constituant la scène. Ces processus interviennent également dans la génération d'images visibles, mais dans l'infrarouge intervient également la température de surface des différents objets de la scène, et le calcul de cette température est complexe. Il est par conséquent difficile de générer des images ou des scènes infrarouges physiquement réalistes. Du fait de la grande variabilité des phénomènes physiques et de la complexité du problème thermique, la prédiction d'images infrarouges est encore difficile, et leur utilisation reste par conséquent délicate.

Une solution au problème est l'utilisation d'outils de simulation informatique. Ces outils permettent la reconstitution d'images infrarouges synthétiques. Nous avons vu dans le chapitre précédent que la simulation d'images infrarouges s'effectue généralement en trois temps. Tout d'abord, la scène à simuler est modélisée en trois dimensions (3D), avec un terrain et des objets. Chaque objet est représenté avec des polygones, ou facettes, constituant le *maillage surfacique* de la scène. Ensuite, un modèle de température permet le calcul des températures, en faisant appel à des codes de transmission atmosphérique et de calcul des éclairagements. Et enfin, un modèle de luminance permet de générer une image en luminance, à partir des températures et de la sphère d'éclairage de la scène et des propriétés optiques spectrales des différents objets.

Peu de codes permettent d'assurer la modélisation de scènes terrestres complexes dans l'infrarouge (voir section 2.5). De plus, la plupart de ces codes fait une simplification majeure pour la détermination des températures de surface des scènes : l'hypothèse de transferts de chaleur monodimensionnels –une seule direction de propagation– alors que la nature est tridimensionnelle, surtout dans le domaine de la haute définition (résolution spatiale inférieure à un mètre). C'est pourquoi l'ONERA¹ a décidé de développer son propre code de simulation. Ainsi, à partir de 1995 le code de recherche MISTRAL (Modélisation Infrarouge de Scènes Terrestres RéAListes) a été développé, au sein du Département d'Optique Théorique et Appliquée. Ce code calcule les températures des scènes en 3D, en gérant les contacts et interactions d'ombrage entre les objets constituant la scène. Il permet ensuite la création d'une image infrarouge (image en luminances en entrée du capteur).

Comme présenté dans l'introduction, l'objectif de cette thèse est d'établir des modèles simples de température de surface de sols prenant en compte la variabilité spatiale de la température. La première étape de notre démarche sera l'obtention, via une campagne expérimentale, d'une banque de mesures pour la validation ultérieure des modèles. Pour dimensionner le dispositif expérimental utilisé lors de cette campagne de mesures, nous aurons besoin d'un code de calcul thermique utilisant des modèles physiques rigoureux et réalisant des calculs en 3D. Nous devons

¹Office National d'Études et Recherches Aéronautiques

également disposer d'un code dont les sources de programmation soient accessibles, afin de pouvoir y apporter modifications et améliorations éventuelles. Ensuite, après le développement de modèles simples de température de surface et leur validation par rapport aux résultats expérimentaux, les modèles devront être confrontés à des simulations numériques 3D. Cette étape nous permettra de quantifier les bénéfices de nos simplifications, aussi bien pour les résultats en température que pour les images de luminance. Ainsi, à chaque étape de notre démarche, le code MISTRAL apparaît comme complètement adapté à nos besoins : son code source est disponible, il effectue les calculs en trois dimensions et, comme nous le verrons dans ce chapitre, à chaque étape de calcul il fait appel à des modèles physiques complets et adaptés au calcul 3D. Le code MISTRAL sera par conséquent utilisé, en tout ou partie, tout au long de ce travail.

Ce chapitre a pour objectif de présenter l'outil numérique principal utilisé au cours de cette thèse. Il détaille l'architecture de la chaîne de simulation MISTRAL. Le code MISTRAL a été développé avec une structure modulaire, afin de faciliter les améliorations et les mises à jour. Ainsi, il est composé de quatre modules, dont les tâches sont : le maillage surfacique de la scène, le calcul des sphères d'éclairement, la résolution thermique, et enfin la création d'une image en luminance en entrée capteur. Ce chapitre expose tout d'abord l'enchaînement de ces quatre modules, ainsi que les fichiers d'entrées nécessaires à chaque code. Il détaille ensuite le fonctionnement de chacun des modules, s'attardant principalement sur la résolution thermique et les modèles physiques utilisés. Il présente enfin les améliorations fonctionnelles que nous avons apportées au code pour affiner la prise en compte des données thermiques et météorologiques.

3.1 Architecture du code

Le code MISTRAL (Modélisation Infrarouge de Scènes Terrestres RéAListes) constitue une chaîne de simulation complète, qui permet d'obtenir, à partir du maillage surfacique d'une scène en 3D, une carte de températures et de luminances à chaque pas de temps pour la scène simulée. Cette scène est constituée d'un terrain, et peut contenir également des objets, disposés sur ce terrain.

MISTRAL est constitué de quatre modules. Le premier, le module CORINTHE, réalise le maillage géométrique de la scène à simuler, objet par objet. Le deuxième module, nommé DÉESSE (DÉpôt d'Énergie Solaire sur la ScènE), permet, à partir de la description géométrique de la scène simulée, de générer les sphères d'éclairement et les ombrages solaires aux différents instants du calcul thermique. Puis le module thermique TESOS (TEMPérature de Surface des Objets de la Scène) calcule, à partir de ces sphères d'éclairement, les températures de tous les objets de la scène, avec gestion des contacts entre ceux-ci. Enfin, le module MOLIERE (MOdule de Luminance InfrarougE pour la Représentation de l'Environnement) produit une carte des luminances en entrée capteur, à partir des températures de surface et des conditions de luminance issues du module DÉESSE. L'enchaînement de ces quatre modules et leurs entrées/sorties est rapporté sur la figure 3.1.

3.2 Maillage géométrique

Le module CORINTHE est un modéleur géométrique. Son rôle est de fournir, à partir d'un fichier de données d'entrée simple (voir exemple en annexe D.1), une définition de la scène sous forme de facettes quadrangulaires, ou triangulaires dans le cas particulier du sol 1D. Ces facettes sont appelées mailles. La scène à simuler est composée d'objets de différents types, ayant des formes élémentaires : parallélépipède régulier ou quelconque, cylindre, terrain structuré ou non structuré.

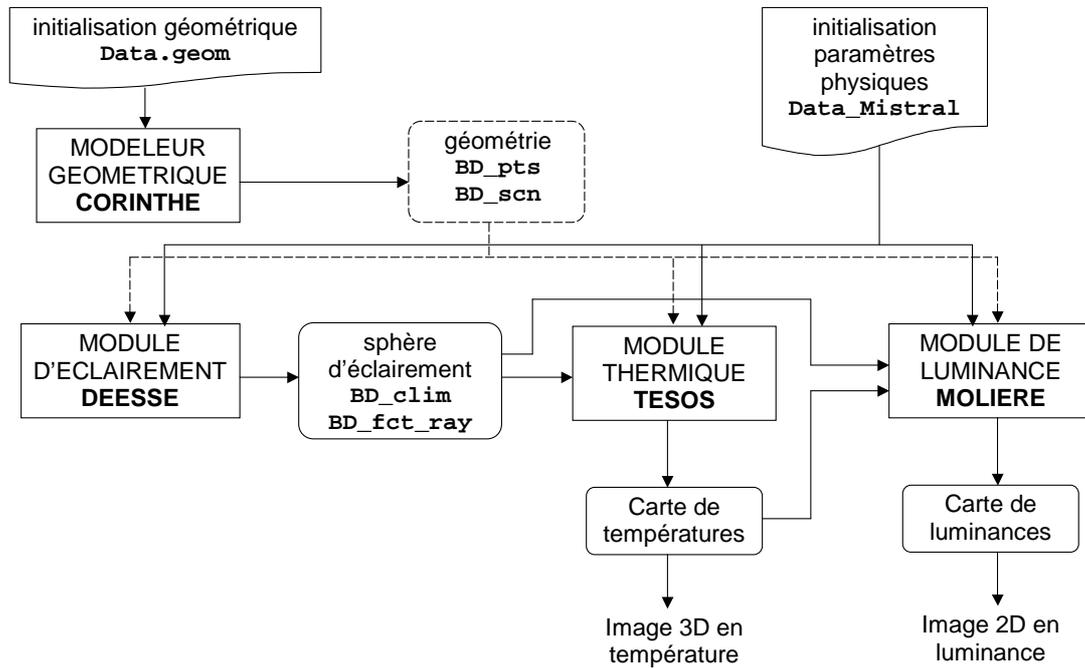


FIG. 3.1 – Organisation de la chaîne MISTRAL : enchaînement des différents modules de calcul

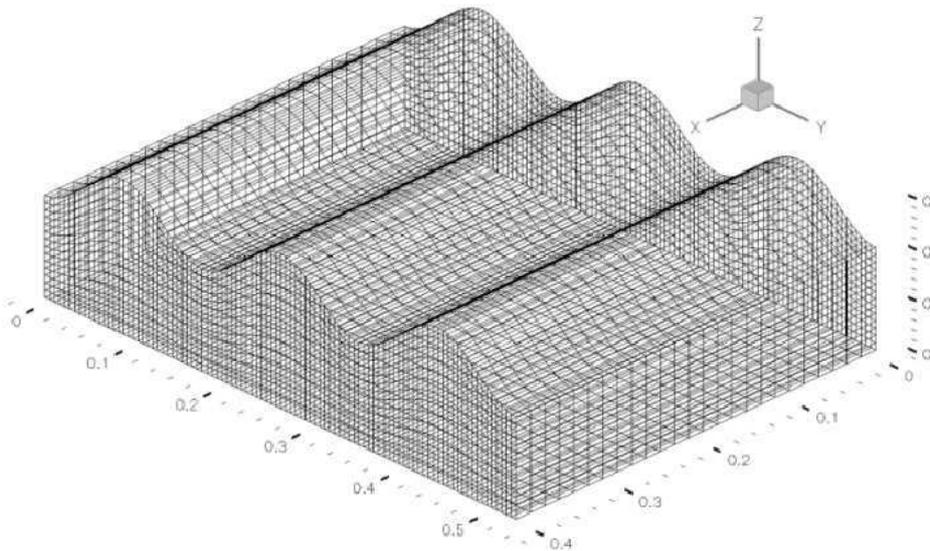


FIG. 3.2 – Exemple de maillage généré avec CORINTE

Si un objet à simuler n'est pas décomposable en des objets élémentaires existants, il faut le créer, en respectant le format de sortie des données. Ainsi, pour les besoins de cette thèse, une géométrie supplémentaire a été créée, à surface sinusoïdale et à base parallélépipédique (voir exemple figure 3.2). Ce nouvel objet est décrit dans le fichier d'entrée par cinq arguments : longueur, largeur, épaisseur, distance crête à crête, et amplitude du motif.

Le module CORINTHE génère deux fichiers de sortie, nommés `BD_pts` et `BD_scn`. Le premier contient la liste des sommets des facettes de la scène complète, ainsi que leurs coordonnées cartésiennes. Le second rassemble les informations topologiques (liens entre objets, faces, facettes, attributs par facettes, matériaux, revêtement optique). Ces fichiers sont utilisés en entrée des trois modules physiques DÉESSE, TESOS, et MOLIERE. Afin de contrôler le bon déroulement du calcul, un fichier de sortie est également créé, qui permet la visualisation du maillage grâce au logiciel *TECPLOT*.

3.3 Module d'éclairement

Le module DÉESSE (DÉpôt d'Énergie Solaire sur la ScènE) calcule la contribution de luminance de l'atmosphère sur la scène, sous forme d'une sphère d'éclairement. Cette sphère est supposée unique pour toute la scène : on ne considère pas de variation spatiale de l'éclairement. Elle est calculée à chacun des pas de temps du calcul thermique. Le module DÉESSE nécessite en entrée la représentation géométrique de la scène (`BD_pts` et `BD_scn`), générée par le mailleur CORINTHE (voir figure 3.1). Deux codes du commerce sont utilisés : le code *MODTRAN* [BBR89] calcule les éclairagements spectraux directionnels (ou luminances), tandis que le code de lancer de rayons *INFOVISION* calcule les ombrages solaires en fonction du maillage surfacique de la scène et la position du soleil, considérée comme la seule source lumineuse.

3.3.1 Calcul de la sphère d'éclairement

Les calculs de la sphère d'éclairement sont menés avec le code de transmission atmosphérique *MODTRAN*. Pour une longueur d'onde λ et une direction incidente (θ, φ) , la luminance reçue par une facette horizontale en provenance de l'atmosphère est décomposée en trois termes :

$$L_{\lambda \theta \varphi} = I \cdot L_{\lambda \theta \varphi}^{\text{solairedirecte}} + L_{\lambda \theta \varphi}^{\text{solairediffuse}} + L_{\lambda \theta \varphi}^{\text{fonddeciel}} \quad (3.1)$$

où I est le pourcentage de la facette éclairé par le soleil. On obtient en fin de calcul une sphère d'éclairement, contenant ces trois valeurs, pour chaque pas de temps du calcul thermique. La décomposition de la luminance de l'équation 3.1 est réalisée pour optimiser le nombre de calculs.

Luminance solaire directe

La composante majeure de jour par temps clair sur l'ensemble du domaine spectral est l'émission solaire directe. Elle se limite principalement à la partie visible du spectre, et en moindre mesure au proche infrarouge. Cette composante, non nulle uniquement dans la direction solaire, est calculée par le code *MODTRAN*.

La position du soleil associée à un code de lancer de rayons définit les ombres portées (ou facettes à l'ombre). Elles sont dues à la présence de corps opaques sur le trajet optique soleil-facette. Le pourcentage ombré de la facette géométrique est traduit par un coefficient d'ombrage variant de 0 pour une facette complètement à l'ombre à 1 pour une facette entièrement au soleil.

Luminance solaire diffuse

La seconde source de rayonnement sur la scène est la luminance solaire diffuse de l'atmosphère. Cette luminance est également obtenue par le code *MODTRAN*. Elle est importante surtout dans la partie visible du spectre, puis diminue très rapidement avec l'augmentation de la longueur d'onde (la contribution du flux solaire diffus dans la bande 3-5 μ m est inférieure à 1% de la contribution sur le spectre total).

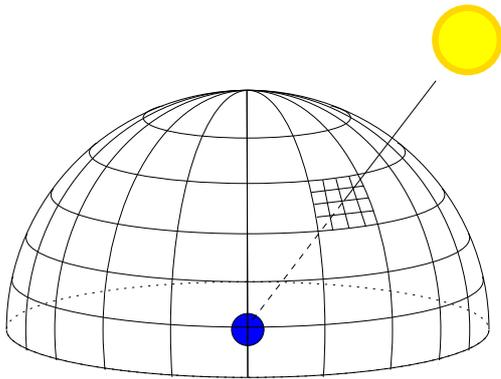


FIG. 3.3 – Discrétisation de la sphère d'éclairage dans le cas de la diffusion solaire

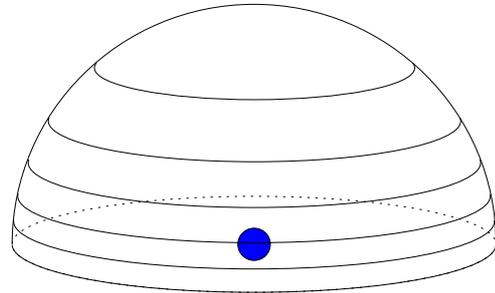


FIG. 3.4 – Discrétisation de la sphère d'éclairage dans le cas de la diffusion thermique de fond de ciel

La discrétisation spatiale se fait dans les deux directions, zénithale et azimutale. Par ailleurs, la maille se trouvant sur le trajet soleil-scène est discrétisée plus finement (voir figure 3.3) afin de prendre en compte les gradients importants dans la direction solaire. Il est possible de régler ce pas de discrétisation dans le fichier d'initialisation.

Luminance de fond de ciel

Le rayonnement propre de fond de ciel est relativement constant de jour comme de nuit. La bande d'émission prépondérante se situe entre 8 et 14 μm , avec un maximum vers les 10 μm , correspondant à l'émission d'un corps noir à 300 K.

De même que pour les composantes solaires, la luminance de fond de ciel est calculée par *MODTRAN*. Dans ce code, la luminance de fond de ciel ne dépend pas de la direction azimutale. La discrétisation spatiale de l'hémisphère se fait donc uniquement en bandes concentriques, à des fins de minimisation du nombre de calculs (voir figure 3.4)

Remarque : Avant de choisir *MODTRAN*, l'utilisation de modèles semi-empiriques, plus rapides, avait été envisagée (modèle d'Idso-Jackson [IJ69], et modèle de Centeno [Cen82], utilisé dans le code PRISM [SR88]). Mais les écarts avec le code de référence étaient trop importantes (surestimation et sous-estimation de l'ordre de 10% par rapport à *MODTRAN*). Le choix s'est par conséquent porté sur *MODTRAN*, afin de privilégier la précision au détriment du temps de calcul. En effet, aucun des modèles semi-empiriques ne permet de discrétisation spatiale ou spectrale de l'hémisphère.

3.3.2 Entrées / sorties

Un exemple de fichier d'entrée pour le calcul de la sphère d'éclairage est décrit en annexe D.2.1. La première partie du fichier est relative à la situation géographique et temporelle de la scène, ainsi que le pas de temps de calcul et le nombre de pas de temps. La période de calcul est fixée par l'utilisateur dans `Data_Mistral` pour les trois modules physiques (DÉESSE, TESOS, MOLIERE). Néanmoins, pour le module DEESSE, une période de calcul de 24h permet la réutilisation des sphères d'éclairage de façon cyclique dans le code thermique.

Pour faire appel au code *MODTRAN*, quatre paramètres doivent être fixés. *model* correspond au modèle d’atmosphère, *imult* détermine si le calcul prend en compte ou non la diffusion multiple et prend les valeurs 0 ou 1, et *ihaze* définit le type d’aérosols. Les valeurs possibles de ces trois paramètres sont regroupées dans la table D.1 en annexe D.2.2. Les modèles les plus utilisés sont 2 et 3, correspondant respectivement à une atmosphère d’été et d’hiver en France. Le type d’aérosol le plus communément utilisé pour des calculs en France est le type *rural*, avec une visibilité de 23 km (correspondant à *ihaze* = 1). Les autres paramètres nécessaires à l’exécution du code *MODTRAN* sont fixés dans le code source. Le dernier paramètre à renseigner est la visibilité, en kilomètres.

Il est possible, pour les trois composantes de l’éclairement, de changer les bornes inférieure et supérieure de la bande spectrale d’intégration, ainsi que le pas d’intégration. Par ailleurs, l’utilisateur peut régler la discrétisation spatiale de la sphère d’éclairement (figures 3.3 et 3.4).

MODTRAN permet le calcul des composantes de luminance sur une large bande spectrale (0.2 à 80 μ m). Chaque composante (solaire directe, solaire diffuse et fond de ciel) a une bande d’émission prépondérante. Les bandes généralement utilisées dans *MISTRAL* sont les suivantes :

luminance solaire directe	0.2 - 3 μ m
luminance solaire diffuse	0.2 - 2 μ m
luminance de fond de ciel	3 - 40 μ m

Le module DÉESSE prend en entrée le fichier d’initialisation physique *Data_Mistral*, et les fichiers *BD_pts* et *BD_scn*, issus du calcul du maillage géométrique et contenant la description géométrique du maillage surfacique de la scène et des différents objets qui la composent. Il génère deux fichiers de sortie.

Le premier, *BD_clim*, contient la sphère d’éclairement : pour chaque pas de temps de calcul, il comporte :

- les luminances solaires diffuses $L_{\lambda\theta\varphi}$;
- les angles solides associés $\Omega_{\theta\varphi}$;
- les luminances solaires directes $L_{\lambda\theta_S}$;
- les luminances de fond de ciel $L_{\lambda\theta}$;
- les angles solides associés Ω_{θ} .

Le second, nommé *BD_fct_ray* contient, pour chaque pas de temps, le coefficient d’ombrage de chaque facette géométrique de la scène. Ces deux fichiers sont nécessaires au calcul thermique, réalisé par le module suivant.

3.4 Module thermique

Le module thermique TESOS (TEmpérature de Surface d’Objets de Scène) a pour fonction le calcul de la température des facettes de tous les objets de la scène à simuler. Ces objets font partie de la bibliothèque du maillage CORINTHE.

Le module TESOS utilise en entrée le fichier *Data_Mistral*, dont un exemple est illustré en annexe D.2.1, pour l’initialisation des paramètres physiques. Ce fichier est utilisé par les trois modules physiques DÉESSE, TESOS, et MOLIERE.

L’utilisateur peut appliquer aux objets de la scène un maillage thermique différent en surface du maillage géométrique. Dans ce cas, le code réalise une interpolation des données d’entrée sur

ce maillage. D'autre part, pour les constantes physiques et optiques l'utilisateur peut soit entrer une valeur constante par objet dans le fichier d'initialisation, soit faire appel à une base de données thermo-optique. Cette BDTO contient, pour chaque type de matériau, la conductivité thermique, la masse volumique, la capacité calorifique, et les émissivités moyennes en bande II et bande III. Dans le cas des données optiques (émissivité, absorptivité, BRDF) il est également possible d'utiliser un fichier de données spectrales et directionnelles par type de matériau.

3.4.1 Résolution thermique

Les transferts thermiques dans un matériau opaque sont régis par l'équation de diffusion :

$$\operatorname{div}(\kappa \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad}T}) + q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.2)$$

Les hypothèses pour sa résolution sont les suivantes :

- il n'y a pas de source de chaleur ($q = 0$) ;
- du fait des faibles variations de température des matériaux, les caractéristiques physiques et optiques sont supposées indépendantes de la température. L'équation 3.2 devient donc :

$$\kappa \cdot \operatorname{div}(\overrightarrow{\operatorname{grad}T}) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} ;$$

- chaque objet élémentaire est constitué d'un seul matériau ;
- dans cette version du code, les objets sont pleins (et non creux) ;
- les éléments de surface sont supposés localement plans ;
- les matériaux sont considérés imperméables ;
- les sols sont nus (pas de modèle de végétation) ;
- la température de l'air et la vitesse du vent sont constantes au cours d'un calcul ;
- les réflexions multiples ne sont pas considérées.

Le bilan de flux à la surface peut être écrit sous la forme suivante :

$$\Phi_{cond} + \Phi_{conv} + \Phi_{ray} + \Phi_{emis} + \Phi_{s-fict} = 0 \quad (3.3)$$

où les flux de l'équation 3.3 sont les suivants :

- Φ_{cond} le flux dissipé par conduction ;
- Φ_{conv} le flux dû aux échanges convectifs entre le sol et l'air ;
- Φ_{ray} le flux de rayonnement net absorbé ;
- Φ_{emis} le flux de rayonnement perdu par émission radiative de la surface ;
- Φ_{s-fict} le flux de rayonnement apporté par une surface de sol horizontal vue par une facette inclinée.

3.4.1.1 Flux conductif

Le flux conductif à la surface en 1D s'écrit :

$$\Phi_{cond} = -\kappa \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (3.4)$$

où κ est la conductivité thermique du matériau.

3.4.1.2 Flux convectif

Selon l'hypothèse de Fourier, le flux convectif s'écrit :

$$\Phi_{conv} = h \cdot (T_{sol} - T_{air}) \quad (3.5)$$

où h est le coefficient de convection. Il existe deux types principaux de convection, la limite dépendant du nombre de Grashof. La convection forcée intervient lorsque le champ de vitesse dans l'air est imposé (vent), et la convection naturelle intervient lorsque le coefficient d'échange résulte d'un couplage entre les champs de vitesse et de température. Une hypothèse communément admise est la séparation des convections naturelle et forcée. Notons h_n et h_f les coefficients de convection naturelle et forcée respectivement. Alors :

$$h = h_n + h_f \quad (3.6)$$

h peut être pris en compte de deux manières par le code : soit il est constant, et sa valeur est fixée par l'utilisateur dans le fichier d'initialisation, soit il est calculé analytiquement à chaque pas de temps.

Un coefficient de convection constant au cours du temps n'est pas réaliste. En effet, la convection naturelle est fonction des températures de surface et de l'air, qui varient toutes les deux dans le temps. Quant à la convection forcée, elle dépend du vent, qui n'est constant ni en vitesse ni en direction au cours du temps. Pour ces raisons, le code fait appel à des modèles empiriques pour le calcul des coefficients h_n et h_f .

Le coefficient de convection naturelle h_n est calculé d'après [Jal98] (voir section 2.4.3) :

$$h_n = 1.7 \cdot |T_{surf} - T_{air}|^{1/3}$$

Le code MISTRAL réalisant des calculs thermiques en 3D, il a été choisi d'utiliser une formulation adaptée aux objets en trois dimensions, et la formulation utilisée est par conséquent celle de [Jac84], présentée en section 2.4.3 :

$$h_f = \sin \beta \cdot h_{f_{horizontal}} + (1 - \sin \beta) \cdot h_{f_{vertical}}$$

où

- β est l'angle entre la verticale et la normale à la facette ;
- $h_{f_{horizontal}} = 10.5 \cdot V_{vent}^{0.57}$;
- $h_{f_{vertical}} = C \cdot V_{vent}^M$.

avec les valeurs de C et de M dépendant de la situation au vent de la facette.

3.4.1.3 Flux de rayonnement absorbé

Le flux de rayonnement net absorbé est calculé par les intégrations, spatiale sur tout l'hémisphère et spectrale sur la bande spécifiée dans `Data_Mistral`, des luminances spectrales directionnelles calculées par `MODTRAN`. Ces luminances sont fournies à TESOS par l'intermédiaire du fichier `BD_clim` généré par DEESSE.

$$\begin{aligned} \Phi_{ray} = I \int_{\lambda} L_{\lambda \theta_S \varphi_S}^{solairedirecte} \cos \theta \, d\lambda &+ \int_{\lambda} \int_{\Omega} \alpha_{\lambda \theta \varphi} L_{\lambda \theta \varphi}^{solairediffuse} \cos \theta \, d\Omega \, d\lambda \\ &+ \int_{\lambda} \int_{\Omega} \alpha_{\lambda \theta} L_{\lambda \theta \varphi}^{fonddeciel} \cos \theta \, d\Omega \, d\lambda \end{aligned} \quad (3.7)$$

Dans l'équation 3.7, $\alpha_{\lambda\theta}$ représente le coefficient d'absorption spectral hémisphérique, Ω fait référence à l'hémisphère, l'intégration étant réalisée sur tous les angles solides Ω .

3.4.1.4 Flux de rayonnement émis

Le rayonnement de la paroi est assimilé à celui d'un corps gris :

$$\Phi_{emis} = \int_{\lambda} \int_{\Omega} \varepsilon_{\lambda\theta\varphi} L_{CN} \cos \theta \, d\Omega \, d\lambda \quad (3.8)$$

La loi de Stefan-Boltzmann est utilisée pour une approximation des pertes par émission radiative Φ_{emis} :

$$\Phi_{emis} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{surf}^4 \quad (3.9)$$

où T_{surf} est la température de la surface, σ la constante de Boltzmann et ε le coefficient d'émissivité hémisphérique moyen.

3.4.1.5 Flux d'un sol fictif

Le flux d'un sol fictif fournit une approximation de la part de rayonnement reçue par la facette en provenance d'une autre surface (autre que l'atmosphère). C'est le cas d'une facette inclinée, ou d'une facette dont une partie de l'atmosphère est occultée par la présence d'un obstacle. Le flux absorbé ayant pour origine l'émission des facettes environnantes à la température T_{sol_fictif} s'écrit :

$$\Phi_{s-fict} = \int_{\lambda} \int_{\Omega_S} \varepsilon_{s-fict}(\lambda\theta\varphi) L_{CN}^{s-fict} \cos \theta \, d\Omega \, d\lambda \quad (3.10)$$

La relation suivante donne une valeur approchée de ce flux :

$$\Phi_{s-fict} = \varepsilon_{s-fict} \cdot (1 - I) \cdot \sigma \cdot T_{sol_fictif}^4 \quad (3.11)$$

avec :

- ε_{s-fict} l'émissivité hémisphérique moyenne en bande III (8-12 μ m) du sol vu par la facette ;
- I un coefficient sans dimension appartenant à l'intervalle [0;1] et correspondant au pourcentage de l'hémisphère vu depuis la facette ;
- T_{sol_fictif} la température fictive des facettes environnantes. Cette température est soit imposée dans `Data_Mistral` soit prise égale à la moyenne des facettes surfaciques de la scène.

3.4.1.6 Conditions aux limites

Plusieurs types de conditions aux limites peuvent être rencontrés. Ils sont classés en trois grandes catégories :

- condition de Dirichlet ou de première espèce : la température est imposée : $T = cte$. Cette condition n'a pas de réalité physique, mais elle est utile pour la validation du code ;
- condition de Neumann, ou de deuxième espèce : la valeur du flux est imposée (éclairage solaire par exemple) : $\varphi = cte$;
- condition mixte, ou de troisième espèce : le flux est une fonction linéaire de la température. Par exemple, pour des pertes convectives, cela se traduit par : $\varphi = h_{conv}(T - T_0)$.

3.4.2 Résolution numérique

La résolution numérique peut être réalisée en 1D, 2D ou 3D, en géométries cartésienne ou cylindrique, avec le choix possible du schéma numérique (implicite, Crank-Nicholson, explicite). Le problème est résolu par discrétisation de l'équation de la chaleur (équation 3.2) par une méthode aux volumes finis. Le système d'équations discrétisées (une équation par nœud du maillage) est écrit sous forme matricielle. Sa forme réduite à l'instant $n + 1$ est :

$$[A]^{n+1}\{T\}^{n+1} = \{B\}^n \quad (3.12)$$

avec

- $[A]$ la matrice carrée implicite à l'instant $n + 1$;
- $\{T\}$ le vecteur température inconnu à l'instant $n + 1$;
- $\{B\}$ le vecteur second membre explicite au pas de temps précédent n .

Pour des raisons de facilité d'écriture, de discrétisation et de programmation, les conditions aux limites présentées au paragraphe 3.4.1.6 sont réécrites sous la forme standard $\varphi = \mathcal{A} \cdot T + \mathcal{B}$, où les coefficients \mathcal{A} et \mathcal{B} prennent les valeurs de la table 3.1. Afin de se ramener à une condition de troisième espèce $\varphi = f(T)$, la condition limite relative aux pertes radiatives des facettes $\varphi = \varepsilon\sigma T^4$ est linéarisée de manière classique : $\varphi = \varepsilon\sigma T'^3 \cdot T$ (on a alors $\mathcal{B} = 0$ et $\mathcal{A} = \varepsilon\sigma T'^3$, où T' est prise égale à la température au pas de temps précédent).

Type de condition	Écriture classique	Écriture générale	Valeur des coefficients
3ème espèce	$-\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_i = \mathcal{A}T_i + \mathcal{B}$		
2ème espèce	$-\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_i = \varphi$	$-\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_i = \mathcal{A}T_i + \mathcal{B}$	$\mathcal{A} = 0, \mathcal{B} = \varphi$
1ère espèce	$T_1 = T_0$	$-\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_i = \mathcal{A}T_i + \mathcal{B}$	$\mathcal{A} = 10^{20}, \mathcal{B} = -\mathcal{A}T_0$

TAB. 3.1 – Écriture généralisée des conditions aux limites

Par la linéarisation des pertes radiatives, il est fait en sorte que la structure de la matrice A de l'équation 3.12 soit diagonale pour l'application d'algorithmes de résolution performants. Pour la résolution 1D, le système se réduit à une matrice implicite comportant trois bandes. Dans ce cas, la résolution est effectuée avec l'algorithme de Thomas [PFTV92].

Dans les cas 2D et 3D, le système matriciel peut atteindre des dimensions très importantes. C'est pourquoi il est résolu par une méthode nommée Modified Strongly Implicit Procedure²(MSIP [SZ81]). Cette méthode utilise une décomposition en LU particulière : L et U sont des matrices triangulaires respectivement inférieure et supérieure (classiquement), mais elles profitent du caractère creux à 5 diagonales de la matrice du système, grâce à une adjonction d'une matrice complémentaire A' (voir annexe E). Le caractère creux de ces matrices permet de ne stocker que les diagonales non nulles, d'où un gain de place mémoire considérable.

²Dans [SZ81], la méthode MSIP est développée en 1D et 2D. L'adaptation de cette méthode au cas 3D, qui conduit à une matrice à 19 diagonales, a été réalisée à l'ONERA

Pour chaque calcul, les nombres de Fourier, dans les trois directions, sont calculés :

$$Fo = \frac{at}{l^2} = \frac{\lambda \frac{\Delta T}{l} l^2}{\rho C_p l^3 \Delta T} \quad (3.13)$$

Le numérateur représente le flux thermique à travers la surface l^2 , et le dénominateur correspond à la vitesse de stockage dans le volume l^3 . Ces nombres mesurent le rapport entre la vitesse de transfert et la vitesse de stockage de la chaleur. Pour assurer la bonne convergence des calculs, les nombres de Fourier dans les trois directions doivent être proches (rapport inférieur à 10), et ne pas excéder quelques dizaines en schéma implicite.

3.4.3 Architecture et résultats

Les connexions du module TESOS sont résumées sur la figure 3.5. TESOS extrait les données de luminance calculées précédemment par le module DÉESSE. Après obtention de la carte de températures, la visualisation du résultat en trois dimensions est possible avec le logiciel *TECPLOT*. La figure 3.6 est un exemple de scène traitée.

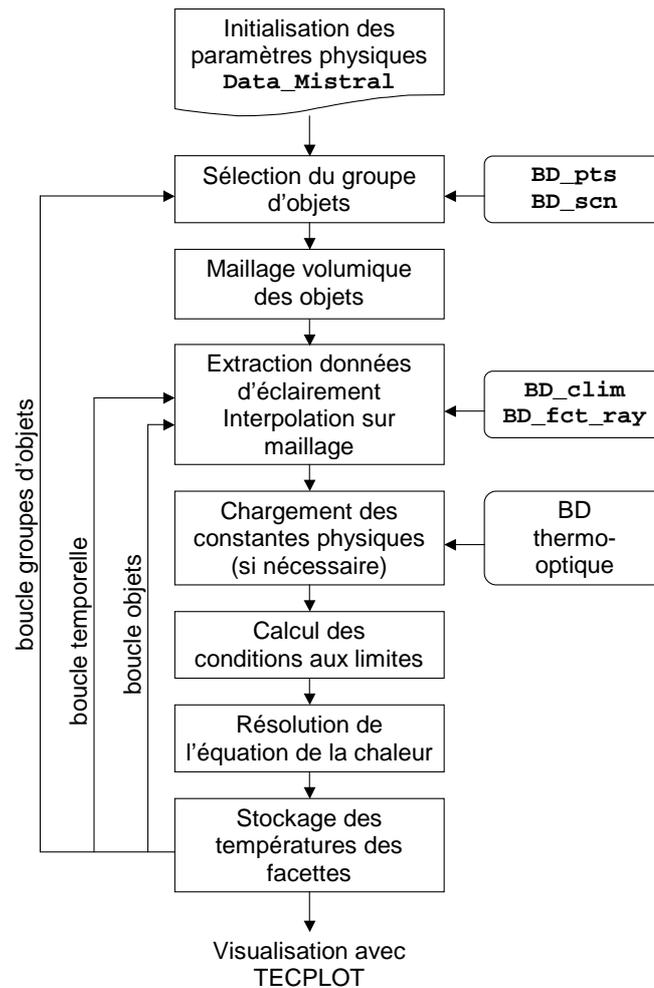


FIG. 3.5 – Architecture et fonctionnement du module thermique TESOS

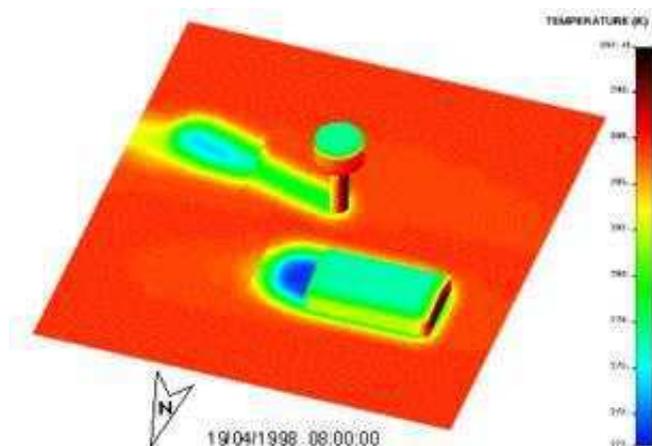


FIG. 3.6 – Exemple d’une scène simulée : hangar et château d’eau sur un terrain plat, le 19 avril 1998 à 8h. Les résultats en température sont calculés par le module TESOS

Le code enregistre les résultats des calculs à chaque pas de temps. Outre la température volumique, il stocke également, pour les facettes surfaciques, la température d’air, la vitesse du vent, le coefficient de convection et les flux d’éclairement reçus (solaire direct, solaire diffus et thermique de fond de ciel).

Remarque : limitations initiales du code

Les hypothèses de calcul de TESOS amènent des limitations au code. Le code TESOS prend en entrée, pour les valeurs météorologiques (température de l’air et vitesse du vent) uniquement des constantes. Or, elles ne sont jamais constantes au cours du temps : la température de l’air, qui est liée au rayonnement solaire, est nettement plus élevée pendant la période diurne que durant la nuit, et même par temps calme la vitesse du vent peut varier très vite. Il serait approprié de pouvoir faire appel à un fichier météorologique, offrant la possibilité d’utiliser une température d’air et une vitesse du vent fonctions du temps.

Par ailleurs, le code TESOS ne considère pas de réflexions multiples. Or, si elles sont généralement négligeables, celles-ci sont prépondérantes dans le cas de surfaces à forte réflectivité, comme par exemple la neige. Miesch [Mie99] a montré que dans le cas d’une vallée enneigée les réflexions multiples peuvent constituer jusqu’à 85% de l’éclairement sur les surfaces à l’ombre. L’auteur se fonde sur des simulations menées avec le code AMARTIS (Advanced Modeling of the Atmospheric Radiative Transfer for Inhomogeneous Surfaces) – voir section 2.4.1. Un couplage de ce code avec le module d’éclairement DEESSE permettrait de quantifier les apports des réflexions multiples sur les scènes simulées.

3.5 Le module de luminance

MOLIERE (MODule de Luminance InfrarougE pour la Représentation de l’Environnement) permet pour une position d’observation donnée le calcul d’une image infrarouge, par un bilan de luminance de la scène en entrée du capteur. Cette image est générée dans la bande précisée dans le fichier d’initialisation `Data_Mistral`. Il utilise en entrée les températures de surface des facettes, calculées par le module thermique TESOS, et les données optiques directionnelles

(émissivité spectrale directionnelle, BRDF) si elles sont disponibles. Le module utilise également les données atmosphériques (transmission spectrale, luminance de fond de ciel, ...) calculées par *MODTRAN*. La luminance en entrée capteur est calculée par le bilan suivant :

$$L_{\lambda \text{ capteur}} = L_{\lambda \text{ path}} + L_{\lambda \text{ reflechie}}^{\text{fond de ciel}} + L_{\lambda \text{ reflechie}}^{\text{solaire diffuse}} + L_{\lambda \text{ reflechie}}^{\text{solaire directe}} \quad (3.14)$$

La carte de luminance générée est ensuite transformée en une image 2D par une technique d'élimination des surfaces cachées (technique de Z-buffer, voir annexe B.1). Les figures 3.7 et 3.8 montrent des exemples d'images en luminances obtenues avec *MOLIERE* en bandes II et III.

Ce module n'étant pas utilisé dans cette thèse, il ne sera pas décrit plus en détail.

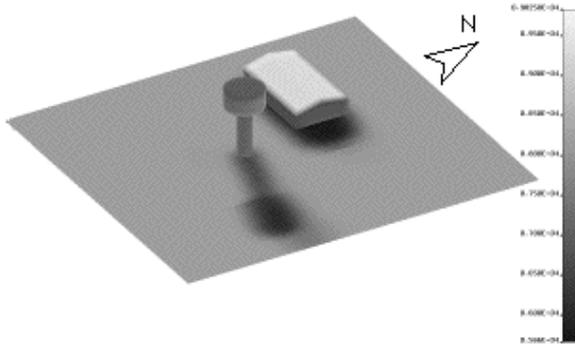


FIG. 3.7 – Image en bande II (3 - 5 μm) de l'exemple de scène simulée par le module de luminance *MOLIERE*

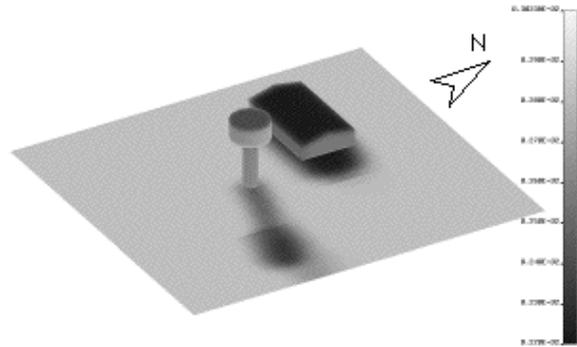


FIG. 3.8 – Image en bande III (8 - 12 μm) de l'exemple de scène simulée par le module de luminance *MOLIERE*

3.6 Améliorations fonctionnelles et validation

Nous apportons plusieurs modifications au code, afin d'améliorer la résolution numérique d'une part, et la prise en compte des données météorologiques d'autre part. Nous avons mis en place, dans *CORINTHE* et dans *TESOS*, la possibilité de disposer d'un maillage dont les nœuds de calcul sont répartis selon les termes d'une suite géométrique. Pour les calculs thermiques, ce maillage devrait améliorer la précision des calculs au voisinage de certaines frontières. Par ailleurs, nous avons ajouté des options dans le fichier d'initialisation *Data_Mistral* afin de rendre la vitesse du vent et la température d'air variables en fonction du temps. Pour la température d'air, nous avons également implanté un modèle analytique de variation journalière. Cette section présente les différentes modifications appliquées aux modules de *MISTRAL*, puis précise les améliorations apportées.

3.6.1 Maillage géométrique

Le mailleur surfacique *CORINTHE* et le mailleur volumique inclus dans *TESOS* génèrent un maillage régulier des objets. Or il est parfois utile, pour la résolution thermique, que celui-ci soit plus fin près de certaines frontières. Pour cette raison, nous avons ajouté une option dans le fichier d'entrée afin que l'utilisateur ait le choix entre un maillage régulier et un maillage à progression géométrique (cette option est décrite en annexe D.1). Ce dernier calcule les longueurs

des mailles selon une suite géométrique, à partir du nombre de mailles souhaité et de l'épaisseur de la première maille.

La répartition géométrique est disponible quel que soit l'objet et pour chaque direction de l'espace.

3.6.2 Température de l'air

La version précédente de MISTRAL prend en compte, dans la résolution thermique, une température d'air constante. Or celle-ci n'est jamais constante sur 24 heures. Nous avons par conséquent retenu deux possibilités : l'utilisation d'un fichier météorologique (voir exemple en annexe D.3), et le calcul analytique de la température de l'air à chaque pas de temps. Pour que le code prenne en entrée un fichier météo, il faut entrer dans le fichier d'initialisation `Data_Mistral` le chemin d'accès à ce fichier. Pour le calcul analytique de la température de l'air à chaque pas de temps, l'utilisateur doit fournir la température moyenne de l'air sur 24h et de sa demi-amplitude au cours de cette période. Le calcul analytique est ensuite réalisé avec la formulation présentée en section 2.4.1. La fonctionnalité de départ est conservée : pour obtenir une température d'air constante, il suffit d'entrer une amplitude nulle.

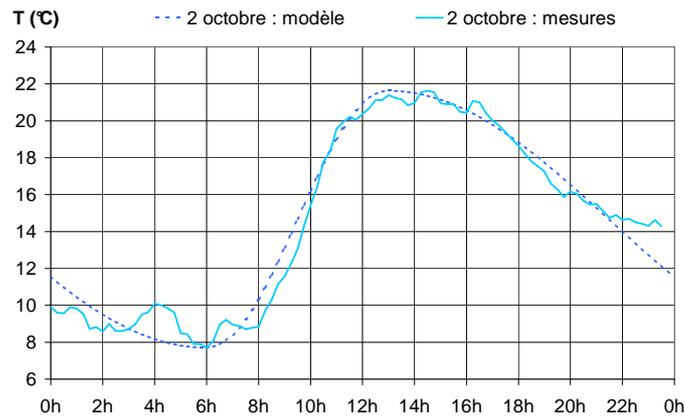


FIG. 3.9 – Comparaison du modèle analytique de température d'air implanté dans le module thermique TESOS avec des mesures réalisées sur la Base Aérienne 701 à Salon-de-Provence en octobre 2002. Données d'entrée du modèle : 1er octobre : température moyenne = 14.9°C, amplitude = 7.5°C. 2 octobre : température moyenne = 14.7°C, amplitude = 7°C.

Afin de vérifier la validité de ce modèle, nous avons réalisé des mesures de températures d'air sur la Base Aérienne de Salon-de-Provence le 2 octobre 2002. La comparaison de ces mesures avec les résultats du modèle montre que ce dernier est satisfaisant (voir figure 3.9).

3.6.3 Vitesse du vent

De même que pour la température de l'air, la vitesse de vent était constante dans la version 2.7 du code MISTRAL. Pour la rendre variable en fonction du temps, nous avons ajouté la possibilité de faire appel à un fichier météorologique. Ce fichier (voir exemple en annexe D.3) peut également contenir la température de l'air³.

³Le code sélectionne la variable à lire, en colonne, en fonction du mot-clé spécifié dans l'entête. Ce mot-clé est `VWIND` pour la vitesse du vent et `TA_AV` pour la température de l'air

3.6.4 Apports

Des simulations ont été menées avec MISTRAL, avant et après modifications. Elles sont comparées avec des mesures, réalisées le 1er octobre 2002. La valeur constante de vitesse de vent fournie à MISTRAL est la moyenne des mesures sur 24h : 1.51 m/s. De même, la moyenne de la température de l'air est de 288.06 K, et son amplitude 7.53 K (nécessaire pour le modèle analytique).

3.6.4.1 Température d'air

Lors des simulations concernant la température de l'air (figure 3.10), la vitesse du vent est constante (1.51 m/s). Trois cas sont simulés : température d'air constante, calculée analytiquement, ou mesurée. Quelle que soit la méthode utilisée, les courbes de température de surface sont "lisses" (figure 3.10). Le calcul thermique avec le modèle analytique de température d'air permet un léger gain de précision : l'écart-type avec les mesures passe de 4.33 K à 4.19 K (voir table 3.2). L'introduction des mesures météorologiques permet un gain considérable : l'écart-type avec les mesures se réduit à seulement 1.7 K. Remarquons néanmoins que toutes ces simulations conduisent à des courbes "lisses". Ceci est sans doute dû à un masquage par la vitesse du vent qui est constante.

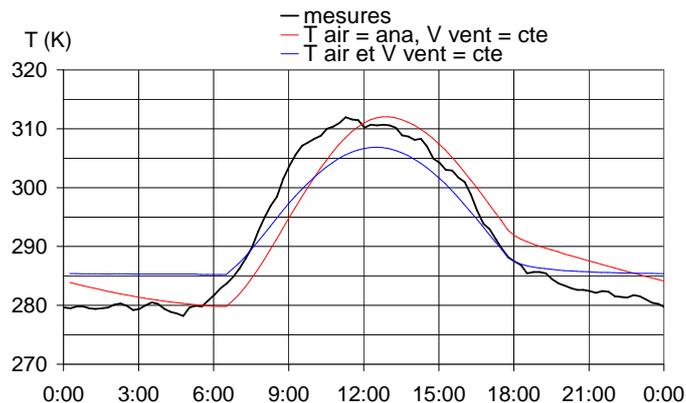


FIG. 3.10 – Comparaison des températures de surface entre les mesures, menées le 1er octobre 2002, et les simulations MISTRAL – étude de l'influence de la température de l'air

3.6.4.2 Vitesse de vent

Dans une deuxième étape, la température de l'air entrée dans le code est constante (288.06 K) afin de quantifier les améliorations apportées par la prise en compte des mesures de vitesse de vent (figure 3.11). Un vent de vitesse constante au cours du temps induit des températures de surface simulées éloignées des mesures : l'écart-type est de 4.33 K. Lors de l'utilisation des mesures de la vitesse du vent, les températures simulées évoluent d'une manière analogue aux températures mesurées, mais l'amélioration n'est pas très importante (l'écart-type passe de 4.33 K à 4 K lors de l'appel au fichier météorologique).

Il apparaît donc que c'est moins la précision sur la vitesse du vent que celle sur la température de l'air qui améliore la précision des températures simulées. L'analyse des écarts entre les

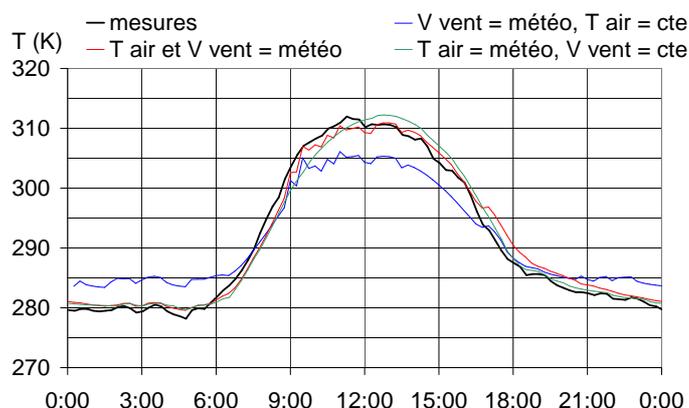


FIG. 3.11 – Comparaison des températures de surface entre les mesures, réalisées le 1er octobre 2002, et les simulations MISTRAL – étude de l’influence de la vitesse du vent

températures mesurées et simulées (figure 3.12) lors de l’utilisation des données météo montre des écarts maximaux de 6.8 K (à 9h30) pour le vent et de seulement 4.3 K à la même heure pour la température de l’air. En outre, dans cette configuration l’écart-type pour la température de l’air est 60% inférieur à celui trouvé pour la vitesse du vent. La disponibilité des valeurs de la température de l’air apparaît donc comme plus importante que celle des vitesses de vent, lorsque celles-ci sont assez faibles (entre 1 m/s et 4 m/s). Dans ces conditions particulières, la convection naturelle est prépondérante sur la convection forcée.

Remarquons enfin que la meilleure précision des simulations est obtenue lorsque les deux fichiers météorologiques de mesures, pour la température d’air et la vitesse de vent, sont employés. L’écart-type se réduit en effet à 1.59 K.

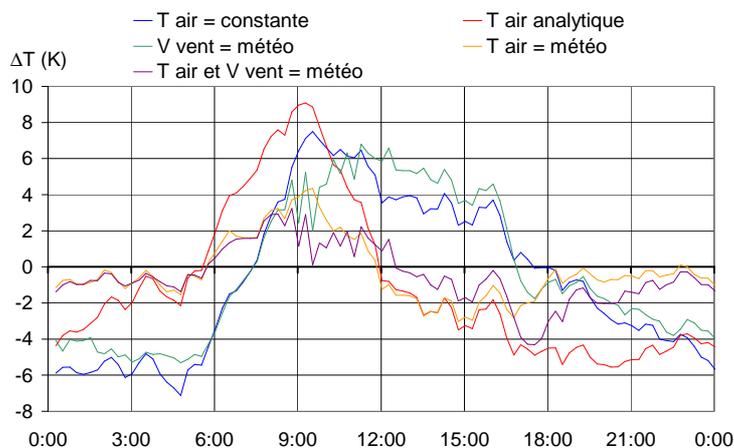


FIG. 3.12 – Comparaison des écarts de températures de surface entre les mesures, menées le 1er octobre 2002, et les simulations MISTRAL

	Configuration	Écart-type
cas 1	Température d'air et vitesse de vent constantes	4.33 K
cas 2	Température d'air analytique, vitesse de vent constante	4.19 K
cas 3	Température d'air mesurée, vitesse de vent constante	1.7 K
cas 4	Température d'air constante, vitesse de vent mesurée	4 K
cas 5	Température d'air et vitesse de vent mesurées	1.59 K

TAB. 3.2 – Écart-types de températures entre les mesures et les simulations MISTRAL

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre l'outil numérique principal utilisé au cours de cette thèse a été présenté : le code de calcul MISTRAL. C'est un code qui permet l'obtention d'une image infrarouge d'une scène simulée en entrée du capteur, à partir de sa représentation géométrique sous forme de facettes. L'architecture de la chaîne de simulation MISTRAL a été présentée. Cette chaîne de calcul est composée de quatre modules : le mailleur surfacique des objets, le calcul de la sphère d'éclairage, la résolution thermique, et enfin le module de calcul en luminance d'une image en entrée capteur. Après la présentation de l'enchaînement de ces quatre modules, le fonctionnement de chacun des modules a été détaillé, s'attardant principalement sur la résolution thermique et les modèles physiques utilisés.

Des modifications ont été apportées au code, en vue d'affiner les résultats des calculs thermiques. Par l'implantation d'une routine de calcul des termes d'une suite géométrique, la répartition des nœuds du maillage est maintenant soit linéaire soit géométrique, dans chacune des directions de l'espace, et pour chacun des objets constituant la scène. Par ailleurs, il est désormais possible d'utiliser des températures d'air et des vitesses de vent variables au cours du temps, par appel à un fichier météorologique. Dans le cas de la température de l'air, un modèle analytique a également été implanté. La pertinence de ces modifications a également été démontrée.

Le chapitre suivant présente le dimensionnement du dispositif expérimental utilisé lors de la campagne d'essais. Ces travaux ont été réalisés avec la version initiale du code MISTRAL, c'est-à-dire avec une température d'air et une vitesse de vent constantes, et un maillage à pas constants.

Chapitre 4

Conception et réalisation de la campagne expérimentale

L'étude bibliographique réalisée dans le chapitre 2 de ce travail a révélé que peu de modèles tiennent compte de la variabilité spatiale et temporelle des températures de surface. La plupart des codes de simulation considère des transferts de chaleur monodimensionnels, alors que les températures en surface peuvent subir des variations allant jusqu'à la dizaine de degrés, même pour une surface plane. Quelques études expérimentales nous ont permis d'avoir un ordre de grandeur de ces variations, mais ces études sont trop peu nombreuses : nous voulons modéliser ces variations mais nous ne disposons pas d'une banque de mesures suffisante pour la validation de ces modèles. Il apparaît donc nécessaire de réaliser des essais susceptible à la fois de nous aider à appréhender les phénomènes en jeu et de constituer une banque de données suffisante.

Pour réaliser ces essais, nous devons concevoir un dispositif qui soit représentatif d'une surface avec relief, et analogue à une surface complexe naturelle, de matériau homogène. L'objectif est que ce dispositif de mesure nous permette d'accéder aux températures à la surface et à faible profondeur. Afin que l'expérience soit le plus possible fidèle à la réalité, les mesures vont être réalisées en extérieur. Le dispositif expérimental doit par conséquent être composé d'une maquette instrumentée, ainsi que d'instruments annexes mesurant les paramètres météorologiques.

À ces fins, ce chapitre présente tout d'abord le dimensionnement de la maquette. Celui-ci est réalisé avec le code MISTRAL dans sa version initiale (chapitre 3). Après les choix dictés par cette étape, une deuxième partie expose la conception et la réalisation de la maquette, ainsi que le dispositif expérimental complet. Enfin, une dernière partie montre les résultats obtenus lors des campagnes de mesure, et l'analyse de ceux-ci.

4.1 Dimensionnement de la maquette

Dans cette section, la maquette, qui fera partie du dispositif de mesure pour la campagne expérimentale, est dimensionnée afin de satisfaire au mieux nos hypothèses et nos contraintes. Ce dimensionnement est réalisé avec le code MISTRAL (chapitre 3).

Par souci d'analogie avec un sol naturel avec relief tel un champ labouré, le profil choisi pour la maquette est un profil périodique, de type sinusoïdal. De plus, nous voulons réaliser une maquette de dimensions réduites, afin d'en faciliter la transportabilité. Enfin, pour limiter les paramètres du problème, nous voulons maîtriser au maximum la connaissance des données thermo-optiques telles la densité, la conductivité thermique et la capacité calorifique du matériau, ainsi que son émissivité de surface.

Pour faciliter le transport de la maquette, il faut en limiter les dimensions. Il faut également trouver un matériau de mise en œuvre facile. De plus, pour être au plus près de conditions météorologiques réelles, les mesures doivent être réalisées en extérieur, ce qui ajoute une contrainte forte. En effet, toujours pour réduire les paramètres, nous avons besoin de réaliser les mesures sur plusieurs jours consécutifs de conditions stables. Enfin, en termes de températures de surface, l'objectif est d'obtenir des écarts importants en particulier durant la période diurne, pour limiter l'influence du bruit sur les mesures. Notons de plus que, outre la prise en compte des résultats numériques, la faisabilité de la maquette va être également prise en compte dans le choix des divers paramètres testés.

Le dimensionnement de la maquette a été réalisé avec une température d'air et une vitesse du vent constantes – 293 K et 0 m/s. L'échantillon représentatif de la maquette, pour ces simulations, est donc soumis uniquement à la convection naturelle. Par ailleurs, afin de se rapprocher théoriquement d'un terrain semi-infini, les faces latérales de l'échantillon sont adiabatiques dans toutes les simulations présentées.

Quatre matériaux différents sont testés, pour déterminer lequel d'un matériau isolant ou conducteur convient le mieux. Deux profils géométriques sont testés : un profil sinusoïdal et un profil triangulaire. De plus, l'orientation des crêtes, Nord-Sud et Est-Ouest est étudiée, afin de vérifier quelle orientation produit les plus grands écarts de température surfacique. Différentes dimensions de maquette sont testées, afin de vérifier qu'il est possible de réaliser une maquette de faibles dimensions tout en satisfaisant l'objectifs de grands écarts de température en surface. L'isolation des faces latérales et inférieure de la maquette est également réalisée et plusieurs émissivités de surface sont retenues. Après tous ces tests, le dispositif final est déterminé et présenté.

4.1.1 Choix du profil géométrique de surface

Le profil surfacique choisi est de forme sinusoïdale. Ses dimensions sont 17.7 cm de crête à crête et 5.1 cm d'amplitude. En effet, il existe dans le commerce une tôle ondulée à ces dimensions (type 177/51). Dans ce paragraphe et dans toute la suite du dimensionnement de la maquette, l'échantillon de test aura ces dimensions, résultant à une épaisseur moyenne de 106 mm.

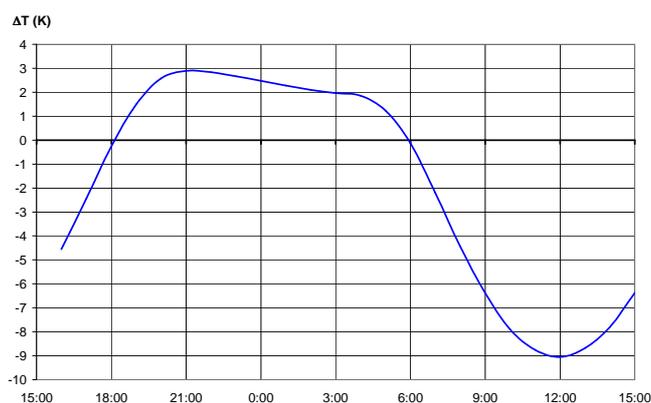


FIG. 4.1 – Écarts de température en surface du profil entre la crête centrale et le sillon 2 pour le profil sinusoïdal, du 14/06/2000 au 15/06/2000

Une simulation est menée sur 24 heures de temps physique, du 14/06/2000 à 12h au 15/06/2000 à 12h, et le pas de temps de calcul est de 30 mn (figure 4.1). Les faces latérales et la face infé-

rière de l'échantillon sont adiabatiques. Les côtés de l'échantillon étant isolés, les échanges de chaleur se font principalement en deux dimensions, ce qui permet de réduire la largeur –fixée à 50 mm– et le nombre de mailles. La surface comporte 25 nœuds de calcul selon l'axe x et 5 selon l'axe y . Le sens de la profondeur (axe z) comporte 15 nœuds de calcul. Les crêtes sont orientées Est/Ouest. Les différences de température en surface vont jusqu'à 9 K à 12h. Ces différences élevées confirment le bon choix de ce profil de surface.

Remarque

Les trois motifs envisagés en premier lieu étaient un profil en créneaux, un profil triangulaire et un profil sinusoïdal. Le premier a été rapidement écarté. En effet, il est facile d'imaginer que la mise en œuvre d'une maquette avec un tel profil va poser des problèmes de fabrication, notamment pour le démoulage. Par ailleurs, contrairement au profil sinusoïdal, le profil triangulaire semble difficile à réaliser sans que les pointes soient émoussées : la présence d'arêtes vives est un obstacle *a priori* majeur. De plus, l'implantation de sondes de température aux crêtes semble assez difficile.

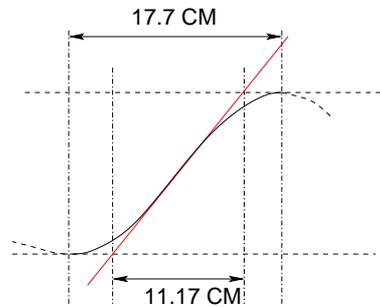


FIG. 4.2 – Dimensions du profil triangulaire par rapport au maillage sinusoïdal

Des compromis à ces inconvénients pourraient être envisagés, à condition que les différences de températures entre les deux profils soient assez significatives. Un calcul a donc été réalisé avec un profil triangulaire. Celui-ci a pour pente la pente celle de la sinusoïde précédente en son milieu (voir figure 4.2). La longueur de l'échantillon à profil triangulaire s'en trouve donc changée : elle passe de 35.4 cm à 22.34 cm. Les longueurs des deux échantillons étant différentes, les courbes de comparaison des écarts de température sont présentées non en fonction de l'abscisse mais en fonction des nœuds de calcul (nœuds du maillage). Il y a en surface 25 nœuds de calcul, notés de 0 à 24. La crête centrale est au nœud 12. Le matériau utilisé pour ces calculs est du plâtre.

La figure 4.3 montre les écarts entre la crête (nœud 12) et le sillon (nœud 18) durant toute la durée de la simulation. Le profil triangulaire confère, quelle que soit l'heure, des écarts de température plus élevés. Cependant, même si ce profil est plus favorable aux gradients de température en surface, le gain est au maximum de 2 K au cours de la journée. Ce gain n'est pas jugé suffisant pour justifier des contraintes lourdes de mise en œuvre. En conséquence, c'est le profil sinusoïdal qui a été retenu.

4.1.2 Sélection du matériau

Quatre matériaux ont été utilisés : du polystyrène, du béton, de la résine PEEK (polyétherectone), et du plâtre de gypse. Les caractéristiques thermiques de ces matériaux sont rassemblées dans la table 4.1. Ce sont des matériaux aux caractéristiques thermiques assez différentes, et tous sont envisageables pour la fabrication de la maquette. Le profil surfacique choisi

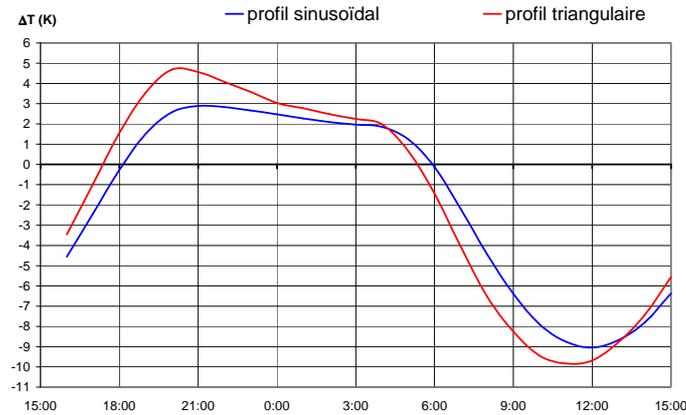


FIG. 4.3 – Écarts de température en surface du profil, entre la crête centrale (nœud 12) et le sillon (nœud 18) , du 14/06/2000 au 15/06/2000

est la sinusoïde définie dans le paragraphe précédent, et le maillage et les dimensions géométriques sont les mêmes que précédemment. Le calcul est mené sur 24 heures de temps physique, du 14/06/2000 à 12h au 15/06/2000 à 12h. Le pas de temps de calcul est de 30 mn.

Matériau	Masse volumique ρ (kg/m^3)	Conductivité thermique κ ($W/m.K$)	Capacité calorifique C_P ($J/kg.K$)
plâtre de gypse	1680	0.22	1085
béton	1860	0.72	780
polystyrène expansé	55	0.027	1210
résine PEEK (Polyétheretercétone)	1320	0.25	320

TAB. 4.1 – Caractéristiques thermiques des matériaux testés pour le dimensionnement de la maquette avec MISTRAL

Le sommet de la crête centrale du motif a été choisi comme référent. Les figures suivantes présentent les différences de température simulées entre ce point et les autres points de surface.

La figure 4.4 montre les écarts de température en surface de l'échantillon le 15/06/2000 à 7h. Le polystyrène, très isolant, ne répond pas à l'objectif d'obtenir des différences de températures élevées en surface. C'est la résine PEEK qui semble obtenir les meilleurs écarts en surface : plus de 3.8 K entre le sillon et la crête. On voit de plus que le béton et le plâtre semblent avoir des comportements thermiques très proches. La figure 4.5 montre que cette dernière remarque s'applique de moins en moins avec l'avancement de la journée. En effet, à 9h les écarts de température entre le béton et le plâtre se creusent, et ce dernier prend l'avantage : jusqu'à 6.5 K entre sillon et crête.

La figure 4.6 montre les écarts de température entre le sillon 2 et la crête au cours de la période de simulation, pour les quatre matériaux testés. On y voit nettement que le matériau fournissant les plus grands écarts est le plâtre, devant le béton et la résine PEEK, et loin devant le polystyrène. C'est donc le plâtre qui sera utilisé dans la suite des calculs pour le dimensionnement de la maquette. Ajoutons que le plâtre a aussi l'avantage d'une mise en œuvre facile, pour la réalisation ultérieure de la maquette.

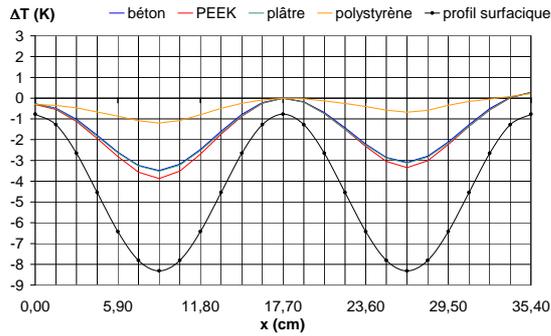


FIG. 4.4 – Écarts de température en surface du profil, entre la crête centrale et les autres points de la surface, le 15/06/2000 à 7h, pour les quatre matériaux testés

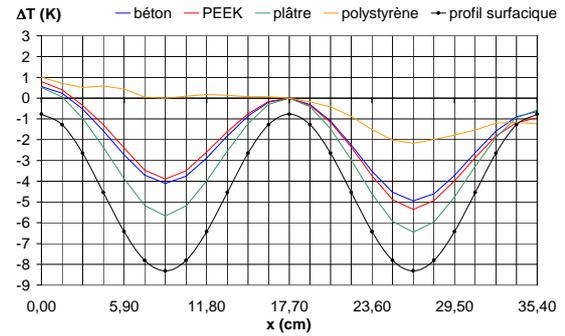


FIG. 4.5 – Écarts de température en surface du profil, entre la crête centrale et les autres points de la surface, le 15/06/2000 à 9h, pour les quatre matériaux testés

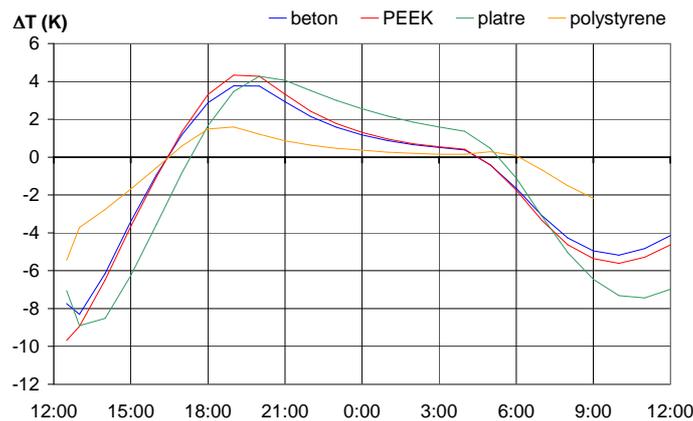


FIG. 4.6 – Écarts de température en surface du profil, entre la crête centrale et le sillon 2, du 14/06/2000 au 15/06/2000, pour les quatre matériaux testés

Remarque : matériau

Un cinquième matériau a été testé : le fer, afin de disposer, avec le polystyrène, de deux matériaux aux caractéristiques thermiques extrêmes. Cependant, le fer, de par sa conductivité très élevée, ne permet pas, dans la configuration de calculs choisie, d'obtenir la convergence du calcul. En effet, les coefficients de Fourier (relation 3.13) sont bien trop élevés. Un test en raffinant le maillage spatial a été réalisé, mais sans résultat sur la convergence du calcul.

4.1.3 Détermination des dimensions

Dans cette section, nous voulons déterminer quelles dimensions de maquette nous permettent à la fois d'obtenir des écarts de température importants en surface, d'avoir une maquette réalisable, et de limiter les effets de bord.

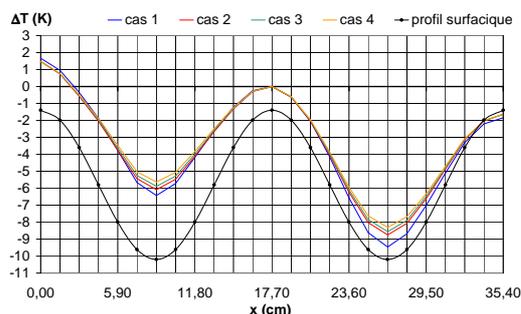


FIG. 4.7 – Températures en surface du profil pour les quatre épaisseurs testées : 7.65 cm (cas 1), 12.75 cm (cas 2), 17.85 cm (cas 3), et 22.95 cm (cas 4), le 15/06/2000 à 11h

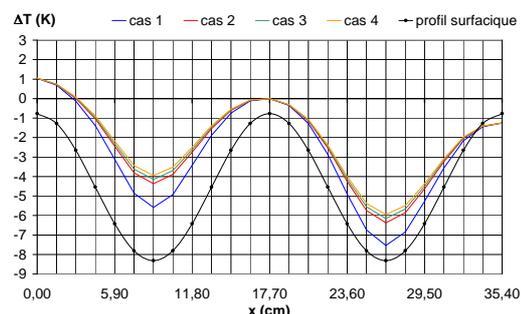


FIG. 4.8 – Températures en surface du profil pour les quatre épaisseurs testées : 7.65 cm (cas 1), 12.75 cm (cas 2), 17.85 cm (cas 3), et 22.95 cm (cas 4), le 15/06/2000 à 15h

Quatre hauteurs aux sillons sont simulées, par multiples de l'amplitude : 5.1 cm (cas 1), 10.2 cm (cas 2), 15.3 cm (cas 3), et 20.4 cm (cas 4), soit des épaisseurs moyennes de 7.65 cm, 12.75 cm, 17.85 cm, et 22.95 cm.

La figure 4.7 montre les températures surfaciques obtenues à 11h pour ces quatre cas. On voit que, quelle que soit l'épaisseur de l'échantillon, les températures en surface sont très proches. La figure 4.8 montre ces mêmes températures, mais à 15h. On voit que le cas 1, c'est-à-dire la plus petite épaisseur testée, fournit les plus grands gradients de température en surface, qui sont légèrement supérieurs aux autres cas (cas 2, 3 et 4).

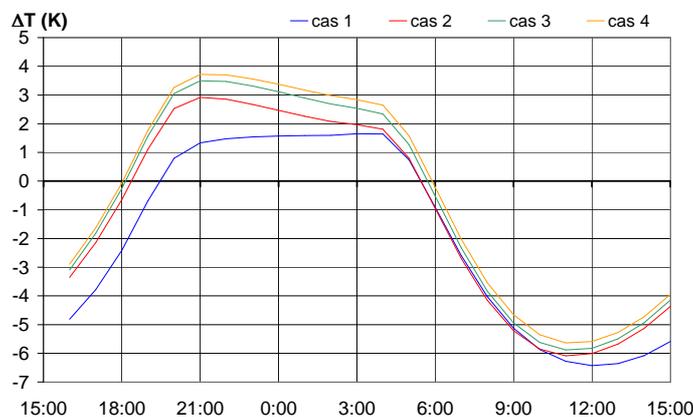


FIG. 4.9 – Écart de températures entre la crête et le sillon 2 en surface du profil pour les quatre épaisseurs moyennes testées : 7.65 cm (cas 1), 12.75 cm (cas 2), 17.85 cm (cas 3), et 22.95 cm (cas 4) –simulation du 14/06/2000 à 16h au 15/06/2000 à 15h

La figure 4.9 montre l'évolution des écarts de température entre la crête et le sillon 2 du 14/06/2000 à 16h au 15/06/2000 à 15h. On voit que durant la nuit les écarts les plus élevés se trouvent pour la plus grande épaisseur. Le matin, les écarts pour les cas 1 et 2 sont très proches, et la journée avançant, les écarts de température augmentent quand l'épaisseur de l'échantillon diminue.

Ceci montre que plus l'échantillon est fin et plus les ΔT en surface sont importants. Néanmoins ces différences restent modérées : elles sont au maximum de 1 K. L'épaisseur de l'échantillon n'est donc pas un facteur prépondérant, et il restera à trouver un compromis entre l'épaisseur de la maquette et sa solidité. En effet, une trop petite épaisseur de plâtre pourrait se briser trop facilement, et une épaisseur trop importante alourdirait inutilement la maquette. La solution la plus favorable, une épaisseur moyenne de 7.65 cm n'est pas forcément la meilleure dans la réalité, et l'épaisseur de l'échantillon va être fixée en fonction des dimensions dans les deux autres directions de l'espace.

Après l'épaisseur de l'échantillon, il reste à fixer les dimensions dans les deux autres directions. Pour la direction y , c'est-à-dire la largeur, il faut que, dans l'axe de symétrie de la maquette, les températures ne soient pas influencées par les effets de bord. Ceci dépendant également de l'orientation des axes des crêtes.

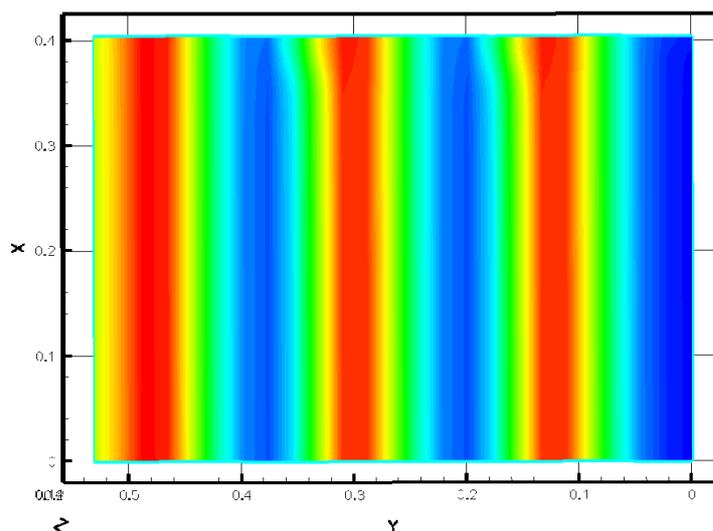


FIG. 4.10 – Températures de surface simulées par MISTRAL, avec 100 mailles dans la largeur, le 15 juin 2000 à 8h

Une simulation en axe Nord/Sud avec un échantillon de longueur 53.1 cm, de largeur 40 cm et d'épaisseur moyenne 10.6 cm (figure 4.10) a été réalisée, avec un maillage en y très dense : 100 mailles. Ce calcul montre que les températures sur le bord Sud de l'échantillon sont plus élevées qu'au centre. Mais cette longueur de pénétration est faible (de l'ordre de 3 cm). Par conséquent la largeur de la maquette doit être supérieure à 6 cm, afin d'avoir un profil central indépendant des effets de bord, et plus la largeur sera importante plus les effets de bord seront limités au milieu de l'échantillon. La borne supérieure de la largeur de la maquette, quant à elle, est constituée par les dimensions de l'étuve. En effet, la future maquette en plâtre va être placée en étuve (voir section 4.2) pour son séchage. Cette contrainte pratique nous amène à fixer la largeur de l'échantillon à 40 cm.

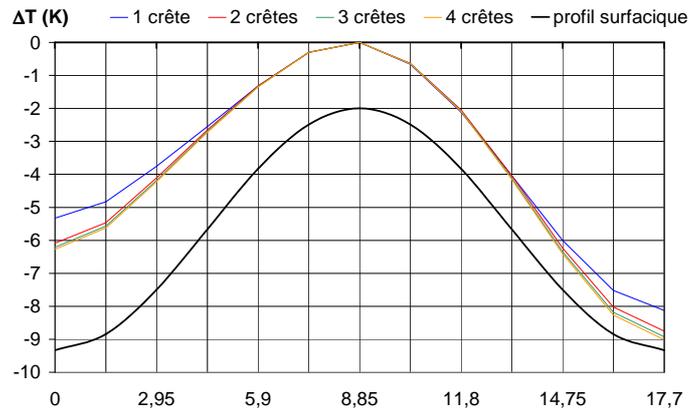


FIG. 4.11 – Écarts de températures avec la crête centrale, en surface du profil, pour les quatre longueurs testées : 17.7 cm (1 crête), 35.4 cm (2 crêtes), 53.1 cm (3 crêtes), et 70.8 cm (4 crêtes) –simulation le 15/06/2000 à 11h

Pour déterminer la longueur de la maquette, quatre simulations sont effectuées avec plusieurs nombres de périodes : une, deux, trois et quatre périodes, soit des longueurs de 17.7 cm, 35.4 cm, 53.1 cm et 70.8 cm. Les différences de températures avec la crête centrale sont comparées (figure 4.11). Il apparaît que trois périodes sont suffisantes pour que la température de surface soit suffisamment indépendante des effets de bord. Dans le cas idéal, la maquette devrait comporter quatre périodes, afin de vérifier que les deux crêtes centrales fournissent les mêmes résultats et que les températures de surface sont affranchies des effets de bord. Néanmoins, encore une fois les dimensions de l'étuve nous contraignent à choisir trois périodes.

La longueur de la future maquette est donc fixée à 53.1 cm. Les dimensions de l'étuve nous amènent à fixer la largeur de la maquette à 40 cm. Pour fixer son épaisseur, nous devons tenir compte des contraintes de transportabilité et de fragilité de la maquette en plus des résultats du dimensionnement. Pour ces raisons, et compte tenu de la longueur et largeur de la maquette, l'épaisseur est fixée à 10 cm aux sillons, soit 15.1 cm aux crêtes, ce qui correspond à une épaisseur moyenne de 12.55 cm. Le poids approximatif de la maquette dans cette configuration est d'environ 40 kg.

4.1.4 Isolation de la face inférieure

Dans cette partie, nous voulons déterminer quel mode d'isolation de la face inférieure de l'échantillon va permettre d'obtenir les plus grands écarts de température en surface. Deux calculs sont menés : l'un où la face inférieure de la maquette est isolée (cas A), et l'autre où celle-ci est laissée "libre" (cas B), c'est-à-dire soumise à la convection et au rayonnement du sol.

Les figures 4.12 et 4.13 montrent une comparaison des résultats de ces deux calculs dans le cas d'un échantillon en plâtre, de géométrie de surface sinusoïdale, de dimensions 53.1 cm × 40 cm × 12.55 cm, et d'émissivité de surface 0.95. La simulation a été réalisée sur trois journées et c'est la dernière journée simulée qui est présentée, du 14/06/00 au 15/06/00. La figure 4.12 montre les températures en surface du profil, tandis que la figure 4.13 montre les écarts de température entre la crête centrale et les autres points, à 11h le 15/06/2000. On voit que les températures de surface sont plus élevées dans le cas A, mais que les écarts de température sont plus grands dans le cas B.

La figure 4.14 montre l'évolution des écarts de température entre la crête centrale et le sillon 2, pour la période du 14/06/00 à 17h au 15/06/00 à 15h. On voit que dans le cas A les écarts crête/sillon sont plus importants la nuit, et que dans le cas B ils sont plus importants le jour : les écarts maximaux entre les deux modes d'isolation sont de 1 K autour de midi.

C'est en particulier pendant la période diurne qu'on veut obtenir des écarts de température élevés ; c'est par conséquent le cas qui fournit les meilleurs ΔT en journée qu'il faut retenir. Le cas B est donc retenu, et la face arrière de la maquette sera laissée libre.

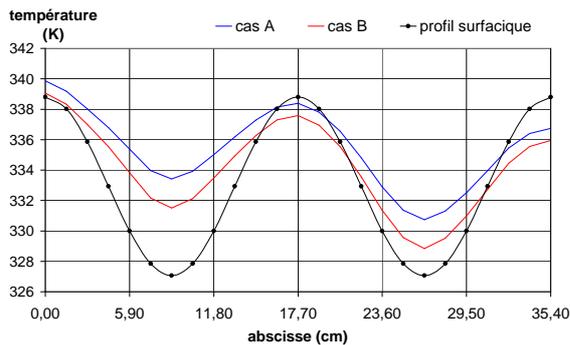


FIG. 4.12 – Températures en surface du profil le 15/06/2000 à 11h, avec la face arrière de l'échantillon isolée (cas A) ou libre (cas B)

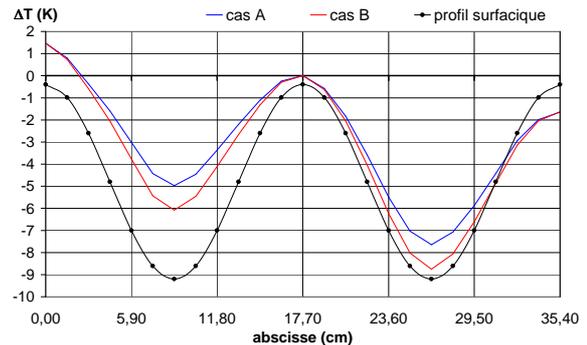


FIG. 4.13 – Écarts de températures en surface du profil le 15/06/2000 à 11h, avec la face arrière de l'échantillon isolée (cas A) ou libre (cas B)

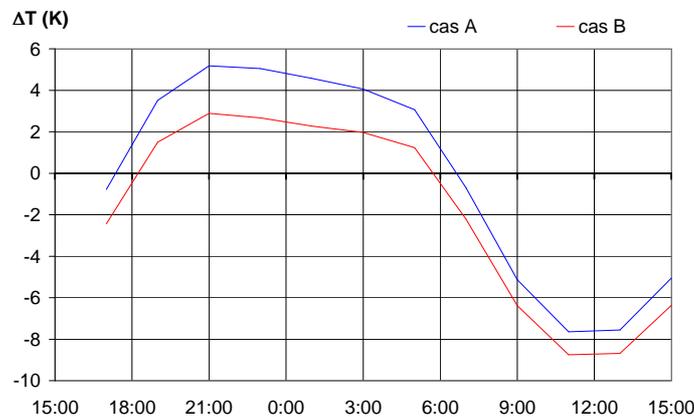


FIG. 4.14 – Écarts de température en surface du profil, entre la crête centrale et le sillon 2, du 14/06/2000 au 15/06/2000, avec la face arrière de l'échantillon isolée (cas A) ou libre (cas B)

4.1.5 Choix de l'émissivité de surface

Cinq émissivités de surface, couvrant une large gamme, sont testées : 0.3, 0.5, 0.7, 0.95 et 0.98. Pour ces tests, le matériau est toujours du plâtre, le profil de surface de l'échantillon est sinusoïdal, les dimensions de la maquette sont 53.1 cm × 40 cm × 12.55 cm, les faces latérales sont isolées et la face arrière est laissée libre.

La figure 4.15 montre les écarts de températures, entre la crête centrale et les autres points, en surface du profil, le 15/06/2000 à 11h. On voit qu'à ce moment de la journée ces écarts

de température augmentent lorsque l'émissivité de surface augmente. La figure 4.16 montre l'évolution des écarts entre la crête centrale et le sillon 2 au cours de la période du 14/06/2000 à 15h au 15/06/2000 à 15h. On voit que pendant la période nocturne une faible émissivité de surface donne des gradients de température surfacique élevés. Au contraire, pendant la période diurne, plus l'émissivité est élevée et plus les écarts de température en surface sont importants. De plus, en valeur absolue, ces écarts sont plus importants de jour que de nuit.

Pour la maquette, il faudra donc une émissivité de surface la plus proche possible de 1, afin d'obtenir des ΔT en surface les plus élevés possible.

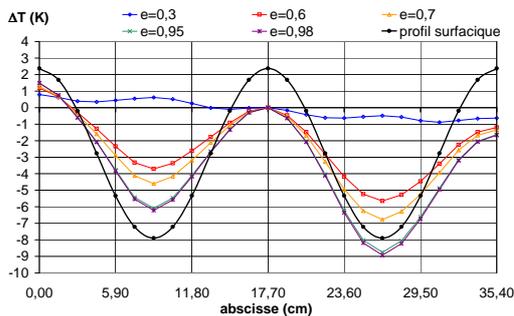


FIG. 4.15 – Écarts de températures avec la crête centrale en surface du profil pour les cinq émissivités testées, le 15/06/2000 à 11h

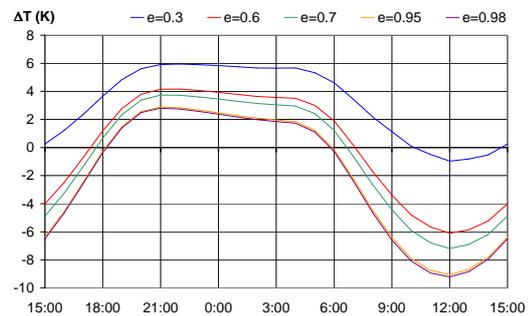


FIG. 4.16 – Écarts de températures entre la crête centrale et le sillon 2 pour les cinq émissivités testées

4.1.6 Orientation des crêtes

L'orientation Nord/Sud (N/S) des axes des crêtes est testée. Celle-ci n'est pas de nature à remettre en cause les résultats précédents, mais les tests vont permettre de voir si cette autre orientation crêtes creuse les écarts de température en surface.

La figure 4.17 montre la comparaison de températures en surface du profil, entre la crête centrale et les autres points de surface, à 11h, pour les deux orientations des axes des crêtes. On voit que les écarts de température sont beaucoup plus importants dans le cas d'une orientation N/S que pour une orientation E/W : à 11h on a presque 8 K entre le sillon 2 et la crête pour l'orientation E/W, et plus de 15 K entre la face Est et la crête pour l'orientation N/S.

Avec l'orientation N/S des crêtes, on profite des ombrages solaires. La crête et les sillons ne sont plus les points où on trouve les extréma de température. La figure 4.18 montre, pour les deux orientations des axes des crêtes, les différences de température entre la crête centrale et les autres points. Contrairement aux autres paramètres dimensionnés, cette figure ne montre pas seulement ce ΔT pour un sillon, mais aussi pour les flancs de la crête centrale, qui sont orientés Nord et Sud lorsque la crête est orientée E/W, et Est et Ouest lorsque la crête est orientée N/S. On voit bien sur la figure 4.18 que les écarts de température en surface sont beaucoup plus importants pour une orientation N/S des crêtes, quelle que soit l'heure de la journée. C'est donc évidemment l'orientation N/S des crêtes qui est retenue pour la phase expérimentale.

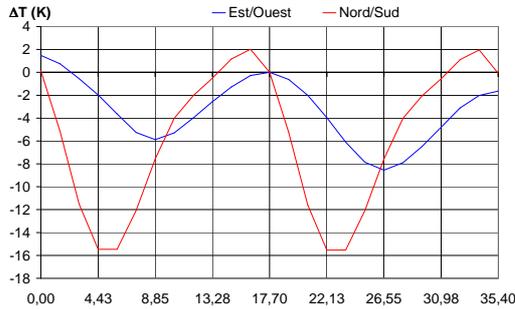


FIG. 4.17 – Écarts de températures en surface du profil, entre la crête centrale et les autres points de surface, pour deux orientations des crêtes : Nord/Sud et Est/Ouest, le 15/06/2000 à 11h

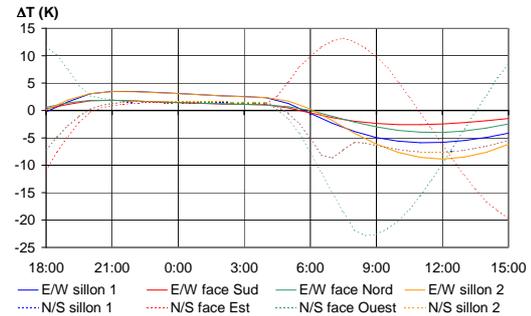


FIG. 4.18 – Écarts de températures en surface du profil entre la crête centrale et le sillon 2 pour deux orientations des crêtes : Nord/Sud et Est/Ouest –simulation du 14/06/2000 à 15h au 15/06/2000 à 15h

4.1.7 Dispositif final choisi

Des calculs avec le code MISTRAL ont été menés afin de choisir les différents paramètres de la future maquette d'essais. Ceux-ci ont porté sur le matériau, le profil surfacique, les dimensions de la maquette, les conditions d'isolation des faces, l'émissivité de surface et l'orientation des crêtes. Les hypothèses de réalisation de la campagne expérimentale sont une mise en œuvre facile du matériau, la transportabilité de la maquette, et un profil de surface périodique –par analogie à un champ labouré ou à un champ de dunes. Les tests sont réalisés avec pour but d'obtenir les écarts de températures les plus élevés possible en surface.

Au vu des tests précédents, la maquette va être réalisée en plâtre ; la géométrie de surface choisie est une géométrie sinusoïdale, de période 17.7 cm et d'amplitude 5.1 cm. Les dimensions sont les suivantes : 40 cm de largeur, 53.1 cm de longueur –soit trois périodes, et 10 cm d'épaisseur aux sillons –soit 15.1 cm d'épaisseur aux crêtes. Les crêtes sont orientées Nord/Sud afin de profiter des ombrages solaires pour creuser les écarts de température. Les faces latérales sont isolées, et la face arrière est laissée libre. L'émissivité de surface doit être prise aussi élevée que possible. Pour cela, la surface de la maquette devra être peinte avec une peinture noire mate.

4.2 Réalisation de la maquette

La section précédente nous a aidés à définir le matériau de la maquette, ses dimensions, son profil de surface. Après les simulations numériques, il faut passer à la mise en œuvre de la maquette, c'est-à-dire sa fabrication. Le plâtre est un matériau d'utilisation facile. Néanmoins des tests sont nécessaires, afin de choisir le type de plâtre et le matériau du moule. De plus, le plâtre choisi a des caractéristiques thermiques différentes de celles utilisées pour le dimensionnement. Cette section présente d'abord le choix du plâtre, avant une comparaison numérique de celui-ci avec le plâtre de départ. Ensuite, des mesures de densité du plâtre choisi sont réalisées. Après la description de l'emplacement des thermocouples dans la maquette, la maquette finale est enfin présentée, démoulée, instrumentée, peinte et isolée.

4.2.1 Choix du plâtre

Deux raisons nous conduisent à choisir le plâtre Lafarge[©] Prestia. La première est qu'il est en règle générale difficile d'obtenir les caractéristiques thermiques des plâtres de construction, mais que le fabricant Lafarge[©] est d'accord pour nous les fournir. La seconde est que le plâtre Lafarge[©] Prestia est un plâtre plus fin que les plâtres de construction, adapté au moulage et donc à prise rapide. Il correspond en conséquence parfaitement à ce que nous recherchons. Les caractéristiques thermiques du plâtre choisi sont rapportées dans la table 4.2.

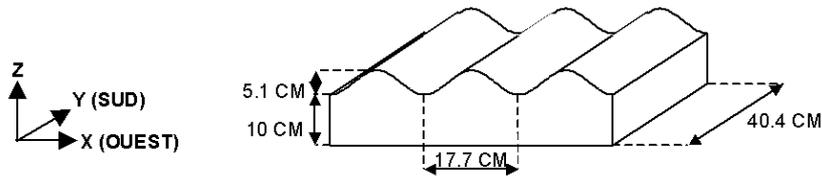


FIG. 4.19 – Dimensions et orientation de la maquette

Les caractéristiques thermiques de ce plâtre diffèrent de celles du plâtre utilisé pour le dimensionnement de la maquette. Un calcul avec ces nouvelles caractéristiques est par conséquent mené avec le code MISTRAL, afin de comparer les écarts de température en surface et de vérifier que le plâtre Lafarge[©] Prestia fournit bien des écarts de température en surface comparables à ceux obtenus avec le plâtre de bâtiment utilisé pour le dimensionnement. Ce calcul est réalisé dans les conditions de simulation de la section précédente, c'est-à-dire avec un échantillon de longueur 35.4 cm, de largeur 5 cm et d'épaisseur moyenne 12.55 cm, avec faces latérales isolées, sur 3 jours de temps physique. Les résultats présentés sont ceux du dernier jour de simulation : du 14/06/2000 à 16h au 15/06/2000 à 15h.

	Masse volumique $\rho(kg/m^3)$	Conductivité thermique $\kappa(W/m.K)$	Capacité calorifique $C_P(J/kg.K)$
Plâtre de gypse	1680	0.22	1085
Plâtre Lafarge [©] Prestia	1200	0.58	1072

TAB. 4.2 – Caractéristiques thermiques du plâtre de moulage Lafarge[©] Prestia choisi pour la réalisation de la maquette

La figure 4.20 montre les écarts de température entre la crête centrale et le sillon 2 pour les deux plâtres. On voit que de nuit le plâtre Lafarge[©] Prestia fournit des écarts de température en surface moins importants. Néanmoins, de jour les écarts en surface sont très similaires ; ces remarques nous permettent de vérifier que ce plâtre de moulage est bien adapté à nos objectifs.

De plus, le plâtre Lafarge[©] Prestia étant un plâtre adapté aux moulages, la réalisation de la maquette va être facilitée : en effet, ce plâtre est facilement démoulable, c'est-à-dire *a priori* sans application d'agent extérieur sur les parois du moule. La face supérieure de la future maquette doit avoir une forme sinusoïdale : celle de la tôle ondulée de type 177/51 (17.7 cm de distance crête à crête et 5.1 cm d'amplitude). Cette tôle métallique existe également en plastique ; un morceau de cette tôle en plastique va constituer la face inférieure du moule de la maquette, et des essais sont réalisés (voir annexe) afin de vérifier le démoulage facile du plâtre coulé sur cette tôle en plastique. Quant aux faces latérales, notre choix s'est porté sur du bois mélaminé.

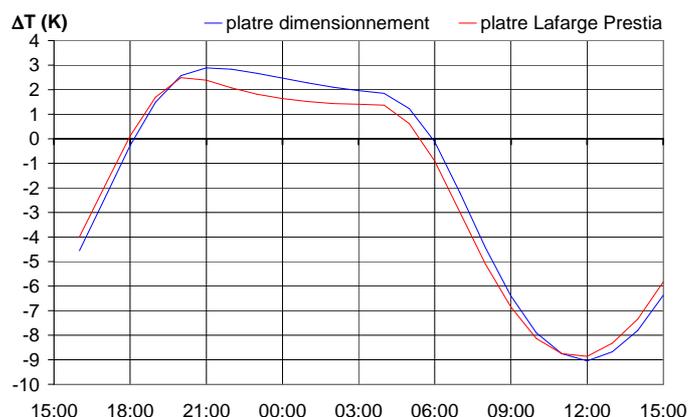


FIG. 4.20 – Écarts de température en surface du profil, entre la crête centrale et le sillon 2, du 14/06/2000 au 15/06/2000 pour les deux plâtres

4.2.2 Densité et séchage du plâtre

Le plâtre ainsi que le matériau du moule étant choisis, il faut procéder à des essais, à la fois pour se familiariser avec le plâtre et pour choisir la méthode de placement des thermocouples dans la maquette. Concernant le plâtre, des essais préliminaires sont nécessaires, afin d'obtenir un gâchage homogène, de tester le démoulage du plâtre, et d'estimer le temps de séchage de la maquette. Outre ces essais de mise en place, la réalisation de moulages-tests va nous permettre d'estimer le temps de séchage du plâtre, ainsi que sa densité réelle.

Le séchage préconisé par le constructeur pour le type de plâtre utilisé est un séchage en étuve à une température inférieure à 50°C. Deux cubes de 20 cm d'arête sont réalisés. Le dosage de ce plâtre est d'un volume d'eau pour un volume et demi de plâtre. Pour que le dosage soit précis, une balance avec une précision relative de 1 g est utilisée.

Les moules sont en mélaminé (figure 4.21). Après coulage, il faut attendre environ 10 minutes pour que le plâtre soit pris et que le démoulage soit possible. Le démoulage aisé des deux cubes confirme le bon choix du matériau pour les faces latérales de la maquette.

Un cube est placé à l'air libre, tandis que l'autre est placé au séchage dans une étuve¹(figure 4.22). Le pesage quotidien des deux cubes va nous permettre de suivre leur séchage et, au terme de celui-ci, de vérifier la densité du plâtre fournie par le fabricant. Celle-ci est donnée à 1200 kg/m³. Un cube de 20 cm d'arête devrait donc peser, à sec, 9.6 kg.

Au cours du séchage en étuve, plusieurs méthodes sont testées, afin d'identifier laquelle permet le séchage le plus rapide et le meilleur. La figure 4.23 montre les courbes de séchage des deux cubes de plâtre.

Le cube n°1, qui sèche à l'air libre, a été déplacé le 3 juin 2002 d'un laboratoire plutôt froid (orienté au nord et climatisé) à un laboratoire orienté à l'ouest et climatisé à une température supérieure. C'est pourquoi son poids diminue plus nettement à partir de cette date. Deux remarques immédiates peuvent être faites au vu de la figure 4.23. La première est que le cube n°1 sèche beaucoup plus lentement que celui placé en étuve (cube n°2), comme attendu. Ceci

¹L'étuve utilisée est le modèle MK240 de la marque WTB BINDER. Sa gamme d'utilisation est [-40°C ; +150°C]. C'est une étuve réfrigérée série MK2 avec programmateur-régulateur à microprocesseur. Cette étuve permet également de créer un point froid, afin de condenser l'eau évaporée et d'accélérer le processus de sèche. Ce processus est appelé *séchage*



FIG. 4.21 – Cube de plâtre, de 20 cm d’arête, dans son moule, avant démoulage



FIG. 4.22 – Cube de plâtre, de 20 cm d’arête, placé dans l’étuve

confirme donc la grande utilité de l’étuve pour sécher la maquette. La deuxième remarque est que, arrivés à 9.6 kg, qui est le poids attendu correspondant à la densité fournie par le fabricant, les cubes sont loin d’être secs. La densité de ce plâtre, au gâchage indiqué, est donc inférieure à celle attendue.

Pour le cube n°2, on constate de plus qu’au début de la sèche la mise en marche de la fonction de *séchage* de l’étuve est plutôt utile, vu que celle-ci contribue à faire décroître plus rapidement le poids du cube. Au contraire, lorsque le cube a déjà perdu les deux tiers de son contenu supposé en eau, la fonction *séchage* de l’étuve ne change pas de façon notable la perte de poids du cube. À partir du 9/07/2002, soit plus d’un mois après la mise en étuve, le poids du cube n°2 se stabilise. Il est de 9.11 kg au 15/07/2002, ce qui donne une densité de 1139 kg/m^3 . Les caractéristiques thermiques du plâtre Lafarge[©] Prestia prises par la suite sont par conséquent celles consignées dans la table 4.3.

Plâtre Lafarge [©] Prestia	Masse volumique $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	Conductivité thermique $\kappa \text{ (W/m.K)}$	Capacité calorifique $C_P \text{ (kJ/kg.K)}$
Données constructeur	1200	0.58	1.072
Données corrigées	1139	0.58	1.072

TAB. 4.3 – Caractéristiques thermiques du plâtre de moulage Lafarge[©] Prestia choisi pour la réalisation de la maquette

4.2.3 Conception

Après ces essais, la méthodologie de réalisation et d’instrumentation de la maquette est fixée et suivie afin de réaliser la maquette. Les faces latérales du moule sont en contreplaqué, et sa face inférieure, qui sera ensuite la face supérieure de la maquette et donc la surface à instrumenter, est constituée d’un morceau de tôle ondulée en plastique, de type 177/51 (17.7 cm de distance

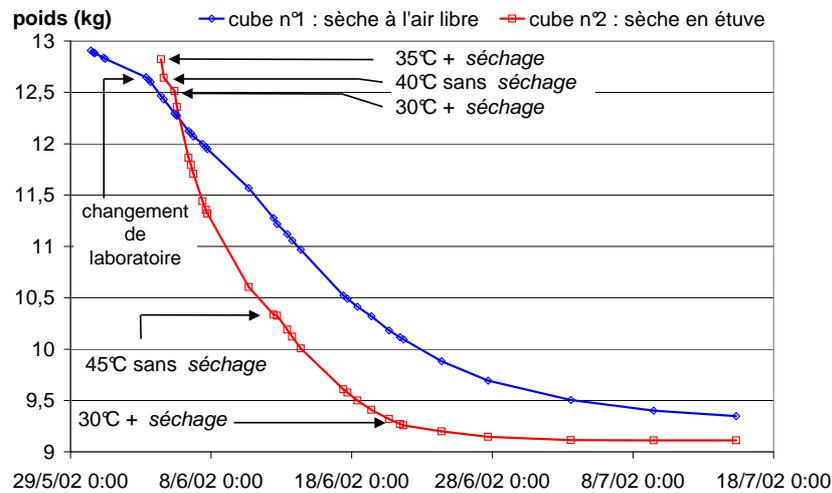


FIG. 4.23 – Courbes de séchage des deux cubes de plâtre

crête à crête et 5.1 cm d’amplitude), de longueur 53.1 cm –soit trois crêtes– et de largeur 40.3 cm. La hauteur des parois latérales est de 15.1 cm.

Pour implanter les thermocouples dans la maquette, la méthode du coulage dans la masse est choisie (voir le choix de la méthode d’implantation en annexe F.2). Les sondes de température vont être fixées le long de la paroi du moule pendant le temps du coulage du plâtre. Elles vont être fixées par deux ou par trois avec des bagues. Enfin, pour que les thermocouples affleurent à la surface de la maquette et qu’ils soient placés précisément, ceux-ci vont être fixés avec de petite quantités de plâtre presque pris, avant de couler le reste du plâtre en plusieurs fois. Les fils des thermocouples sont placés parallèlement à l’axe des crêtes, de sorte à demeurer le plus possible parallèles aux lignes de courant.

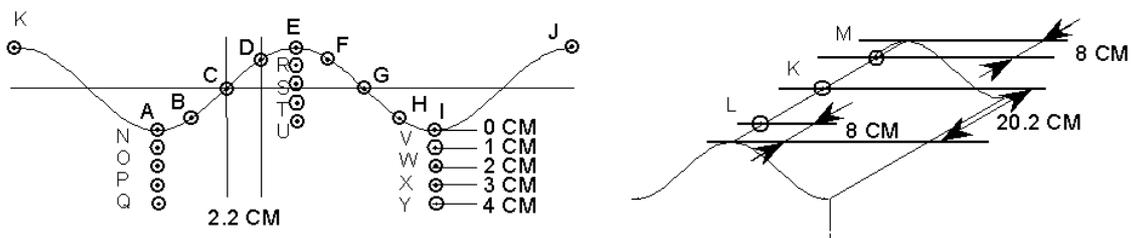


FIG. 4.24 – Emplacement des thermocouples dans la maquette

La centrale d’acquisition des températures, décrite en annexe G.2, nous limite à 32 sondes. L’emplacement des thermocouples est représenté sur la figure 4.24. On veut principalement instrumenter la surface de la crête centrale (points A à I). De plus, en vue d’une banque de mesure de températures non seulement surfaciques mais aussi volumiques, et pour mieux appréhender les phénomènes en jeu sous la surface, on veut également instrumenter la maquette en profondeur (points N à Y, séparés de 1 cm), à la verticale des points *a priori* remarquables : les points A, E et I, soit les deux sillons et la crête centrale.

À des fins de contrôle des effets de bord, deux thermocouples vont être placés sur les sommets des deux autres crêtes (points J et K). Pour la même raison, deux sondes sont également placées le long d'une crête (points L et M). Enfin, une dernière sonde est placée à la verticale du point E, à la surface de la face inférieure de la maquette (point Z), c'est-à-dire en son centre. Cette mesure peut être utile à des fins de comparaison avec les résultats de simulations du code MISTRAL.

Les thermocouples sont placés dans le moule, puis le plâtre est coulé en plusieurs fois. La fabrication pas à pas de la maquette est décrite en annexe F.3.

Au bout de 24 heures, la maquette est démoulée (figure F.6) puis placée dans l'étuve, à 45°C avec le processus de *séchage*, pendant 20 jours, jusqu'à séchage complet.

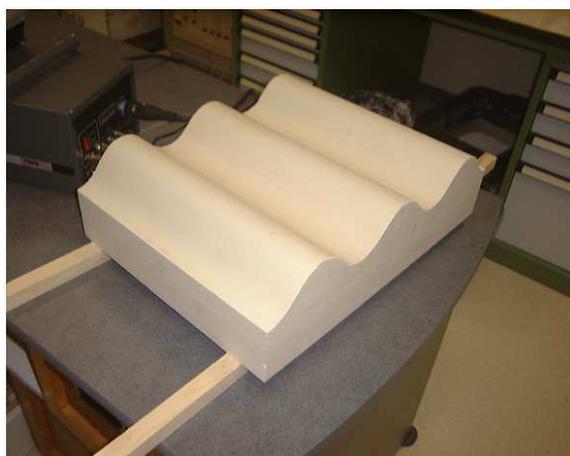


FIG. 4.25 – Maquette finale instrumentée et démoulée



FIG. 4.26 – Maquette finale peinte et isolée, et placée en extérieur pour les mesures

Le séchage complet de la maquette a été vérifié par pesage. Après que celui-ci a été terminé, la maquette a été peinte, avec de la peinture noire mate Julien[©]. L'émissivité de cette peinture, recouvrant un échantillon du plâtre Lafarge[©] Prestia a été mesurée en laboratoire à l'ONERA Toulouse [SBC98]. Ses caractéristiques sont rapportées sur les figures 4.27 et 4.28. Dans le spectre visible, de 0.4 à 0.8 μm , elle est à peu près constante, à 0.95, soit la valeur utilisée durant le dimensionnement de la maquette.

Pour satisfaire au mieux aux conditions souhaitées d'isolation des faces latérales de la maquette, un isolant a été collé sur celles-ci. Le matériau utilisé est un isolant issu de l'industrie du bâtiment, d'épaisseur 8 cm. La maquette, instrumentée, peinte et isolée, est représentée sur la figure 4.26.

4.3 Dispositif expérimental

Afin de réaliser des mesures de températures à la surface et en profondeur de la maquette, des thermocouples de type K ont été placés à l'intérieur de celle-ci, comme décrit dans la section précédente. Le dispositif expérimental souhaité comporte la maquette, isolée et instrumentée et posée sur des tréteaux, la centrale d'acquisition des températures, la station météorologique, et la caméra infrarouge.

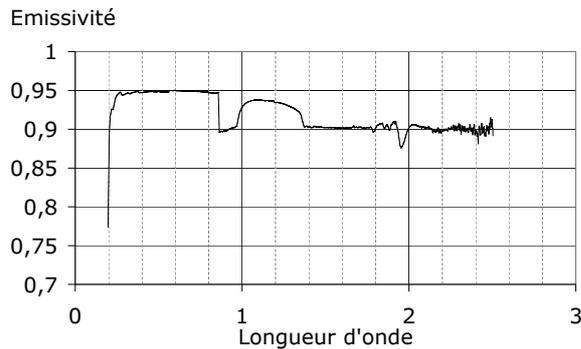


FIG. 4.27 – Émissivité mesurée de la peinture noire mate Julien[®] peinte sur un échantillon de plâtre Lafarge[®] Prestia, entre 0.2 et 2.5 μm

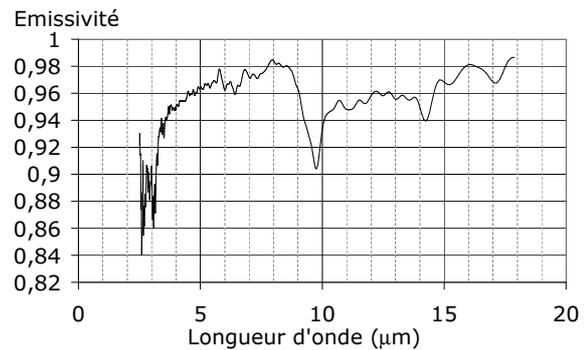


FIG. 4.28 – Émissivité mesurée de la peinture noire mate Julien[®] peinte sur un échantillon de plâtre Lafarge[®] Prestia, entre 4 et 18 μm

La chaîne de mesures est constituée des éléments présentés en annexe G. La station météorologique doit permettre l'enregistrement de la température et de l'humidité de l'air, de la vitesse et de la direction du vent, ainsi que du rayonnement solaire global reçu. La caméra infrarouge n'est pas utilisée à des fins de mesures quantitatives de température de surface. Son utilisation est ponctuelle à des fins de contrôle de l'homogénéité des températures de surface.

L'emplacement de l'expérimentation ne permet pas de disposer d'électricité, il faut donc trouver un moyen de rendre tout le dispositif autonome. La station météorologique dispose déjà d'une alimentation autonome grâce à son panneau solaire. Cependant, elle ne stocke que les moyennes horaires. Afin d'accéder aux données instantanées et de les stocker, un PC portable, dont l'autonomie n'est que de deux heures, doit être relié à la station météorologique.

La centrale d'acquisition des températures stocke les mesures à la fois dans sa mémoire interne et dans une carte mémoire amovible. Elle peut être alimentée soit en 220 V soit en courant continu 12 V. Pour rendre le dispositif autonome, un panneau solaire, d'une surface de 0.5m^2 alimente une batterie à décharge lente, qui à son tour alimente à la fois le PC et la centrale d'acquisition.

La caméra infrarouge ne nécessite pas d'être présente en permanence sur le lieu de mesure ; son alimentation n'a par conséquent pas à être autonome. Elle est alimentée grâce à un groupe électrogène. Le dispositif de mesure final est illustré sur la figure 4.29.

Pour des raisons pratiques, la campagne expérimentale doit se dérouler sur la Base Aérienne 701, à Salon-de-Provence. Du point de vue météorologique, ce site convient parfaitement. En effet, il faut, pour une bonne exploitation ultérieure des mesures, que les campagnes se déroulent sur plusieurs jours consécutifs de météo bonne (i.e. ensoleillé et sans vent) et stable. Après concertation avec les responsables sécurité de la Base, l'emplacement choisi pour les expérimentations est un endroit plat, très dégagé, avec très peu de végétation au sol. Cet emplacement se situe plus précisément en bout de la piste planeur, à côté de la mire pour satellites. Afin de ne pas gêner le trafic aérien de la Base, les mesures doivent se dérouler entre mi-août et fin septembre. Les sections suivantes présentent l'analyse d'erreur en température, puis les résultats obtenus lors des différentes campagnes de mesure.



FIG. 4.29 – Dispositif de mesure. Tous les instruments (panneau solaire, station météorologique, caméra infrarouge, station d’acquisition, batterie) sont placés au nord de la maquette, afin de ne pas créer d’ombrage

4.4 Analyse de l’erreur en température

Cette section est consacrée à l’analyse d’erreur lors des mesures de température en surface de la maquette. L’analyse d’erreur en température va nous permettre de quantifier l’incertitude de mesure relative aux mesures de températures réalisées durant la campagne expérimentale, dont les résultats sont exposés en section 4.5. Cette analyse est constituée de trois parties. La première est dédiée à l’établissement d’une incertitude relative. Les effets de bord sont ensuite quantifiés. Enfin, un dernier paragraphe étudie la répétitivité du motif, à travers les mesures réalisées aux sommets des trois crêtes et dans les deux sillons.

4.4.1 Bilan d’erreur

Nous présentons dans ce paragraphe l’ensemble des postes d’erreur sur la mesure de température de la chaîne de mesures. Nous allons ensuite essayer d’estimer l’incertitude globale de nos mesures de températures.

Selon la chaîne de mesure de notre dispositif expérimental, les postes d’erreur potentiels recensés sont les suivants :

1. précision des thermocouples ;
2. précision de la station d’acquisition des températures ;
3. étalonnage des thermocouples ;

4. dérive temporelle de l'étalonnage des thermocouples ;
5. placement des thermocouples dans la maquette ;
6. inhomogénéité de la maquette (bulles d'air, différence de densité).

Nous essayons dans la suite d'estimer *raisonnablement* l'incertitude de chacun de ces points. Pour ces estimations, les conventions sont les suivantes. Notons σ l'écart-type entre la valeur mesurée et la valeur vraie. Une incertitude donnée sous la forme $\pm \delta T$ correspond à $\delta T = 2\sigma$, où 2σ correspond à un intervalle de confiance de 95% –c'est-à-dire qu'il existe une probabilité de 95% pour que la valeur mesurée se trouve dans la fenêtre de mesure spécifiée. Dans la suite on notera σ_i et δT_i respectivement l'écart-type et l'incertitude engendrés par le poste d'erreur i .

4.4.1.1 Précision des thermocouples

Les thermocouples implantés dans la maquette sont de type K (voir annexe G.1). D'après les différents fabricants, ceux-ci ont une précision $\delta T_{prec\ th}$ de $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ou $\pm 0.75\%$ de la température en $^\circ\text{C}$. Les températures mesurées en surface lors de la campagne expérimentale ont été au maximum de 55°C . Cette température conduirait à une incertitude maximale de : $55 \times 0.75\% = 0.4125^\circ\text{C}$.

En retenant le cas le plus défavorable, cela conduit à considérer une incertitude $\delta T_{prec\ th} = 0.4125^\circ\text{C}$, soit un écart-type arrondi à $\sigma_{prec\ th} = 0.21^\circ\text{C}$.

4.4.1.2 Précision de la station d'acquisition

La station d'acquisition (voir annexe G.2) enregistre les températures par *digits* de 0.1°C ; nous ne pouvons donc pas espérer une précision plus grande que $\delta T_{prec\ stat\ acq} = \pm 0.1^\circ\text{C}$. Par conséquent, $\sigma_{prec\ stat\ acq} = 0.05^\circ\text{C}$.

4.4.1.3 Étalonnage des thermocouples

L'étalonnage des sondes a été réalisé en laboratoire (voir annexe G.1.2). La température de référence utilisée est celle d'une sonde au platine associée à la station d'acquisition. L'incertitude associée est de $\delta T_{etalonn\ th} = \pm 0.01^\circ\text{C}$ soit un écart-type $\sigma_{etalonn\ th} = 0.005^\circ\text{C}$.

4.4.1.4 Dérive temporelle des thermocouples

L'étalonnage des thermocouples a eu lieu deux jours avant l'implantation des sondes dans la maquette. Par conséquent, une dérive temporelle de mesure est possible. Celle-ci n'est néanmoins pas quantifiable, puisque les thermocouples sont coulés dans la maquette. La seule manière de quantifier l'incertitude due à la dérive temporelle des thermocouples serait par conséquent de briser la maquette. Nous considérons donc dans la suite que la dérive temporelle des thermocouples n'entraîne pas d'erreur de mesure. Donc $\sigma_{derive\ temps} = 0^\circ\text{C}$.

4.4.1.5 Placement des thermocouples dans la maquette

La méthode d'implantation des sondes (voir annexe F.2) peut provoquer une incertitude sur le placement des sondes de température par rapport à l'emplacement prévu. Pour les thermocouples affleurant à la surface, ce décalage est estimé à ± 0.01 cm. En effet, lors de la réalisation de la maquette, les thermocouples ont été placés en contact avec le moule avant d'être fixés avec une petite quantité de plâtre (voir annexes F.2 et F.3). En conséquence du contact entre la sonde et le moule, il existe un très faible risque de décalage spatial pour les sondes de surface.

Pour les thermocouples situés en profondeur, l'incertitude spatiale est estimée à ± 0.1 cm.

Afin d'estimer l'erreur en température provoquée par ces décalages, une analyse au premier ordre est réalisée. Pour cela, une formulation analytique de la température est utilisée. Supposons qu'à toutes les profondeurs la température varie comme une fonction harmonique du temps autour d'une valeur moyenne (voir chapitre 4 de [BBD⁺]). Soit T_{moy} la température moyenne dans le sol durant une période de 24 heures. T_{moy} est supposée être la même quelle que soit la profondeur. L'origine temporelle est choisie telle qu'à $t = 0$ la surface soit à la température moyenne T_{moy} . Ainsi la température à la surface s'écrit :

$$T(0, t) = T_{moy} + T_{amp} \cdot \sin \omega t \quad (4.1)$$

où T_{amp} est l'amplitude à la surface et $\omega = 2\pi/t$ la fréquence. Pour une période de 24h, $\omega = 2\pi/86400 = 7.27 \times 10^{-5} \text{sec}^{-1}$.

À une profondeur z quelconque, la température s'écrit :

$$T(z, t) = T_{moy} + T_{amp} \exp\left(-\frac{z}{D}\right) \sin\left(\omega t - \frac{z}{D}\right) \quad (4.2)$$

où

$$D = \sqrt{\frac{2\rho}{\kappa C_P \omega}}$$

La recherche d'erreur est appliquée à la journée du 1er octobre, pour lesquels $T_{moy} = 21.935^\circ\text{C}$ et $T_{amp} = 16.885^\circ\text{C}$. Les propriétés thermiques sont celles du plâtre de la maquette, soit une masse volumique de 1139kg/m^3 , une conductivité thermique de $0.58 \text{W/m}\cdot\text{K}$ et une capacité calorifique de $1.072 \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$. Dans la présente analyse, les propriétés thermiques, ainsi que T_{moy} et T_{amp} , sont considérées comme idéales, en ce sens qu'elles n'ont pas d'incertitude associée.

Le calcul de l'évolution de la température pour des profondeurs de 0 et 0.01cm avec la formulation de l'équation 4.2 amène un écart de température maximal sur 24h entre ces deux profondeurs de $\delta T_{\text{decalage surface}} = 0.02^\circ\text{C}$. En profondeur, au-dessous de la crête centrale et des deux sillons, la première sonde se trouve à une profondeur de 1 cm. L'erreur de positionnement est estimée à 0.1 cm autour de la position idéale. Le même calcul que précédemment est par conséquent réalisé pour des profondeurs de 0.9 cm, 1 cm et 1.1 cm. Les écarts de température maximaux sur un cycle de 24h obtenus pour ces écarts sont de 0.19 K.

À la surface, l'incertitude globale de température à la surface à prendre en compte est $\sigma_{\text{decal surf}} = 0.01\text{K}$.

4.4.1.6 Inhomogénéité de la maquette

Le dernier poste d'erreur est lié à la réalisation de la maquette, et plus particulièrement au placement des sondes de température dans le moule lors du coulage du plâtre. En effet, les images enregistrées avec la caméra infrarouge (voir annexe G.4) lors des campagnes de mesure ont mis en évidence des gradients de température autour de certains thermocouples à certaines heures, correspondant à des périodes où l'éclairement solaire n'était pas constant (passages nuageux). Ces variations de température restent difficilement justifiables. Elles pourraient être dues à des différences de caractéristiques thermiques du plâtre coulé, aboutissant à des différences d'inertie thermique. En effet, le plâtre a été coulé d'abord autour des sondes afin de les fixer précisément dans le moule, puis le reste du moule a été rempli (voir procédure complète en annexes F.2 et F.3).

Bien que les images infrarouges acquises n'aient pas été étalonnées avec un corps noir externe, une analyse au premier ordre nous a permis d'estimer l'incertitude de température provoquée par la présence des thermocouples sur l'enregistrement du 2 octobre 2002 à 16h. Pour cette analyse,

l'hypothèse est faite d'une réponse spectrale idéale de la caméra infrarouge sur la fenêtre 8-12 μm . La réponse de la caméra peut donc être considérée comme linéaire en fonction de la longueur d'onde.

Nous disposons uniquement de l'image en niveaux de gris (figure 4.30). La perturbation due à la présence des thermocouples sur la crête de gauche (thermocouples L, K, et M, voir figure 4.24) est mise en évidence par l'extraction d'une bande verticale de 8 pixels de large. L'évolution des niveaux de gris (ou niveaux de numérisation) sur cette bande en fonction de l'indice du pixel de la ligne est représentée sur la figure 4.31. Chaque valeur par ligne est la moyenne des 8 pixels qui la composent. L'histogramme ainsi obtenu permet aisément de repérer les trois thermocouples, correspondant à des niveaux plus faibles (zones plus foncées sur la figure 4.30). En effet, les chutes de températures dans les zones des thermocouples sont clairement visibles, autour des indices de ligne 56, 120 et 190, correspondant respectivement aux niveaux de numérisation de 97, 110.6, et 130. Dans l'hypothèse où les trois thermocouples L, K, et M mesurent la température vraie, on peut associer à ces trois niveaux de numérisation les températures mesurées, soit respectivement $T_L = 28.68^\circ\text{C}$, $T_K = 29.28^\circ\text{C}$, et $T_M = 29.46^\circ\text{C}$.

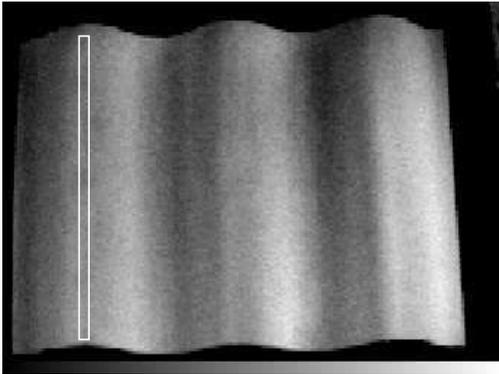


FIG. 4.30 – Image infrarouge en bande II de la surface de la maquette le 2 octobre 2002 à 16h, et sélection de la zone d'intérêt

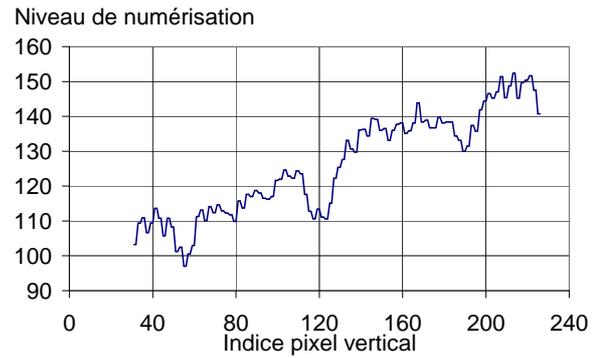


FIG. 4.31 – Histogramme de la bande des trois crêtes – moyenne horizontale sur 8 pixels

La luminance du corps noir à la température T et à la longueur d'onde λ s'écrit, selon la loi de Planck :

$$L_{CN}^0 = \frac{2 h c_0^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{h c_0}{k \lambda T}\right) - 1} \quad (4.3)$$

où h est la constante de Planck, c_0 la vitesse de propagation du rayonnement électromagnétique dans le vide, et k la constante de Boltzmann.

Après intégration sur tout l'hémisphère (soit $2\pi\text{sr}$) et dans la bande spectrale 8-12 μm , la luminance du corps noir L est tracée sur la figure 4.32, entre 26°C et 32°C . Dans la bande 8-12 μm , l'expression 4.3 peut être approchée par la relation linéaire suivante :

$$T = 0.495 \times L - 32.999 \quad (4.4)$$

où T est exprimée en $^\circ\text{C}$ et L en $\text{W}/\text{m}^2\text{sr}$. Le coefficient de régression linéaire de cette droite est : $R = 0.9999$; on peut donc considérer que l'hypothèse de linéarité de la température en fonction de la luminance dans la bande 8-12 μm entre 26°C et 32°C est respectée.

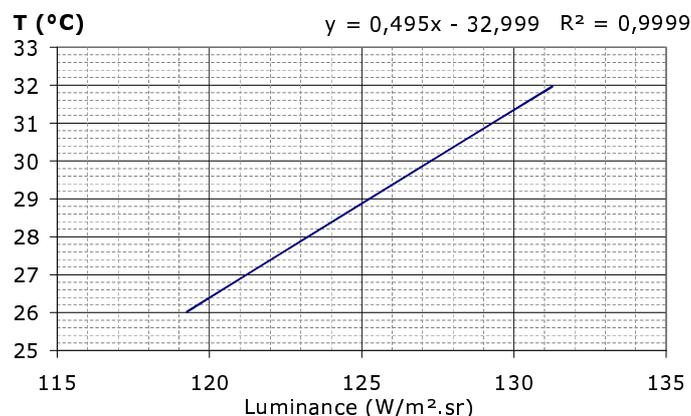


FIG. 4.32 – Température en fonction de la luminance du corps noir dans la bande II (8-12 μm) entre 26°C et 32°C, et linéarisation

Supposons enfin que le niveau de numérisation N dépend linéairement de la luminance L . Dans cette hypothèse, les deux thermocouples extrêmes permettent d'identifier les coefficients de la fonction affine, et on obtient alors la relation :

$$N = 20.866 \times L - 2505.4 \quad (4.5)$$

Les équations 4.4 et 4.5 nous permettent alors d'obtenir la loi de dépendance entre la température T et le niveau de numérisation N :

$$T = 23.7 \times 10^{-3}N + 26.379 \quad (4.6)$$

En supprimant, sur la figure 4.31, les points correspondant à la présence des thermocouples, l'évolution du niveau de numérisation N en fonction de l'indice de ligne I_{ligne} peut être approchée par une relation linéaire (figure 4.33) :

$$N = 0.2382 \times I_{ligne} + 97.854 \quad (4.7)$$

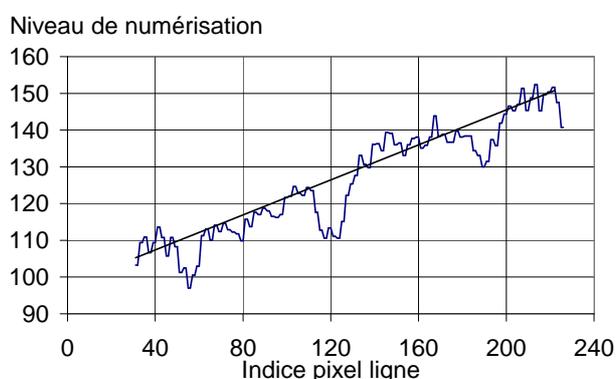


FIG. 4.33 – Histogramme de la zone des thermocouples L, K, et M, et linéarisation sans prise en compte de la perturbation liée à la présence des thermocouples

À partir des équations 4.6 et 4.7 il devient alors possible de traduire en écarts de température δT les variations de niveau de numérisation δN dues à la présence des thermocouples. On obtient ainsi pour les trois thermocouples :

- $\delta T_L = 0.34^\circ\text{C}$;
- $\delta T_K = 0.375^\circ\text{C}$;
- $\delta T_M = 0.31^\circ\text{C}$.

En prenant le cas le plus défavorable et en le majorant, les écarts de température dus aux différences d’homogénéité de la maquette aboutissent à un écart-type de $\sigma_{hom\ maq} = 0.19^\circ\text{C}$.

4.4.1.7 Incertitude globale

Tous les postes d’incertitude en température ont été estimés dans la mesure du possible. L’écart-type global σ_{global} est obtenu par la somme quadratique de tous les écart-types :

$$\sigma_{global} = \sqrt{\sigma_{prec\ th}^2 + \sigma_{prec\ stat\ acq}^2 + \sigma_{etalonn\ th}^2 + \sigma_{derive\ temps}^2 + \sigma_{decal\ surf}^2 + \sigma_{hom\ maq}^2} \quad (4.8)$$

soit :

$$\sigma_{global} = 0.288$$

Considérant un intervalle de confiance de 95% (égal à 2σ), cet écart-type global conduit à une incertitude sur les mesures de $\delta T_{global} = \pm 0.58^\circ\text{C}$.

4.4.2 Incertitude relative

Afin de vérifier la validité du bilan d’erreur précédent, des mesures sont réalisées en laboratoire. La maquette est posée sur des tréteaux puis recouverte d’une caisse en bois de grandes dimensions, placée au-dessus de la maquette de manière symétrique, en vue de limiter l’influence du rayonnement de l’environnement (très asymétrique) sur la maquette. Ce dispositif est placé dans une pièce dans laquelle une climatisation assure la régulation de la température intérieure. Les températures sont enregistrées pendant quatre jours consécutifs afin d’assurer l’équilibre thermique du dispositif.

La figure 4.34 montre la régulation de la température d’air de la pièce, enregistrée par un thermocouple relié à la station d’acquisition. Cette température est assez stable, aux précisions de la station d’acquisition et des thermocouples près. La stabilité de la température en surface, à l’incertitude d’acquisition près —soit 0.1°C , se reproduit sur la figure 4.35, qui représente l’évolution des températures en surface de la maquette. Ces températures sont toujours supérieures à la température de l’air, d’environ 1.5°C . Cet écart de température est certainement dû au confinement de l’air autour de la maquette, provoqué par la présence de la caisse.

Par ailleurs, la figure 4.36, qui représente les mesures de températures lissées sur deux heures, permet deux remarques. Tout d’abord elle permet de constater encore une fois la grande stabilité thermique sur les quatre journées de mesures. En effet, les températures des thermocouples de la maquette varient au maximum de 0.3°C , et ce quel que soit le point de la surface. Cette figure met ensuite en évidence la relation entre la température d’air dans le laboratoire et les températures en surface de la crête. En effet, les évolutions des températures sur tous les points de surface de la maquette sont similaires à l’évolution de la température de l’air. Cette dernière subit toutefois de plus grandes variations de température sur la période de mesures : 0.6°C au maximum. Ici encore, la présence de la caisse au-dessus de la maquette amortit les variations de température.

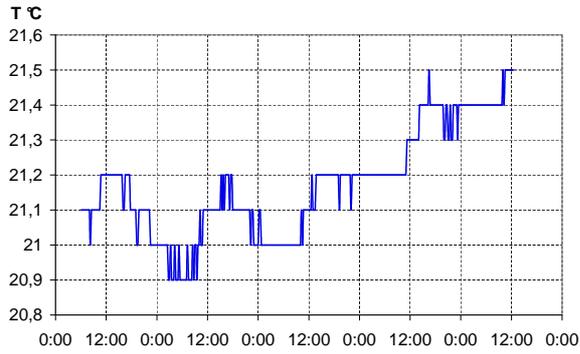


FIG. 4.34 – Température intérieure du laboratoire

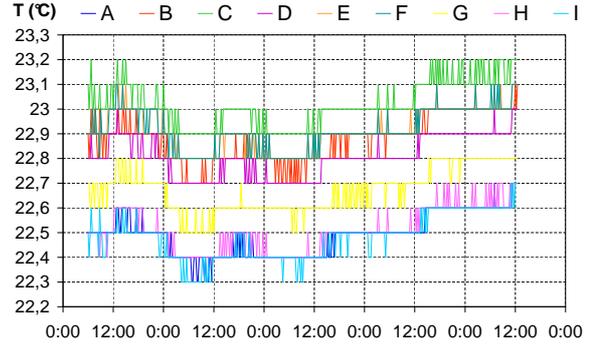


FIG. 4.35 – Températures en surface de la crête centrale de la maquette (voir figure 4.24) lors des mesures en laboratoire

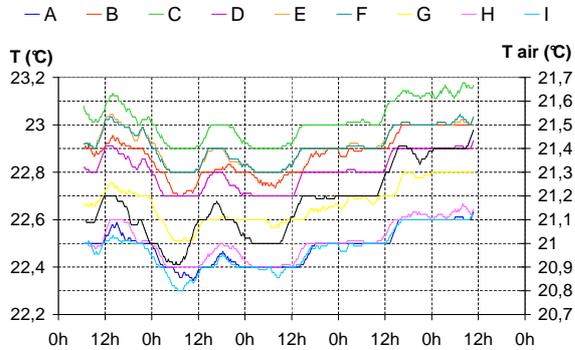


FIG. 4.36 – Températures lissées par moyenne glissante sur deux heures : températures en surface de la maquette (axe de gauche), et température de l'air dans le laboratoire (courbe noire, axe de droite)

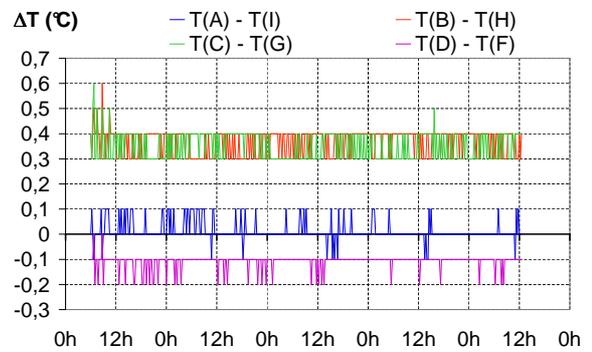


FIG. 4.37 – Différences de températures en surface de la crête centrale de la maquette lors des mesures en laboratoire

Notons T_{POINT} la température de surface mesurée, où $POINT$ désigne le thermocouple par sa lettre, conformément à la figure 4.24. Les points situés sur un même plan horizontal de la maquette doivent théoriquement être à la même température. On devrait avoir les égalités de température suivantes : $T_A = T_I$, $T_B = T_H$, $T_C = T_G$, et $T_D = T_F$. Or les écarts de température entre ces couples de points ne sont pas nuls (figure 4.37).

	$T_A - T_I$	$T_B - T_H$	$T_C - T_G$	$T_D - T_F$
Écart moyen	0.011	0.364	0.350	-0.109

TAB. 4.4 – Écarts moyens de température entre les différents points de la crête de la maquette, lors de mesures réalisées en laboratoire

Les données statistiques de ces écarts de température sont rapportées dans la table 4.4. L'écart moyen le plus élevé est relevé entre les points C et G : il est de 0.35 K. Cet écart est inférieur à l'incertitude globale $\delta T_{global} = \pm 0.58^\circ\text{C}$. Nous pouvons par conséquent considérer que l'erreur relative pour des thermocouples situés sur le même plan horizontal est compatible avec l'incertitude en température de la chaîne de mesure.

4.4.3 Effet thermique de bord

Des comparaisons sont réalisées sur les mesures des thermocouples placés aux points K, L, et M, situés sur la crête Est (voir figure 4.38), en laboratoire. Les différences de température $T_K - T_L$ et $T_K - T_M$ oscillent entre 0 et 0.1 K – correspondant à l’incertitude de mesure de la centrale d’acquisition – sur les quatre jours de mesure (voir les statistiques dans la table 4.5). Cette incertitude est largement inférieure à δT_{global} . Nous pouvons par conséquent considérer que l’isolant présent sur les faces latérales de la maquette remplit son rôle, et qu’il n’existe pas d’effet de bord notable pouvant perturber la mesure de température.

4.4.4 Répétitivité du motif

Nous comparons ici les températures enregistrées aux sommets des trois crêtes (points K, E, et J) et au creux des deux sillons (points A et I) de la maquette. Les mesures exploitées sont les mêmes que dans les paragraphes précédents. La figure 4.39 montre que les écarts de température entre les trois crêtes ne dépassent pas 0.2 K. Par ailleurs, les écarts les moins importants sont enregistrés entre les deux sillons, et l’écart moyen le plus élevé (table 4.5) est de 0.12 K entre les points E et K. Ces écarts sont inférieurs à l’incertitude globale δT_{global} établie au paragraphe 4.4.1. Nous pouvons par conséquent considérer que la maquette est représentative d’un motif infini dans la direction x , perpendiculaire à l’axe des crêtes.

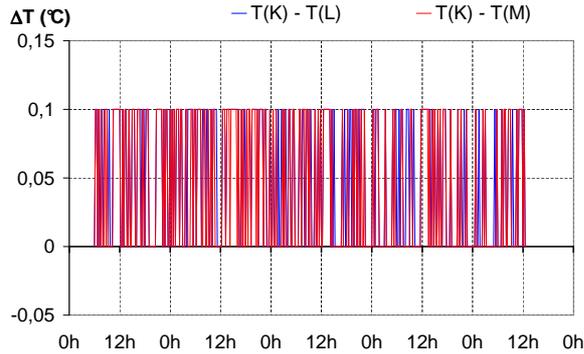


FIG. 4.38 – Différences de températures en surface sur la crête Ouest de la maquette lors des mesures en laboratoire

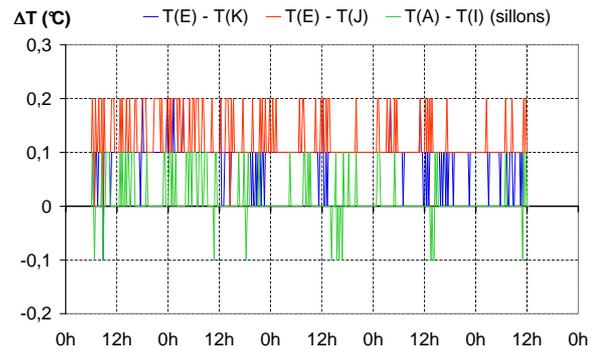


FIG. 4.39 – Différences de températures en surface sur la crête Ouest de la maquette lors des mesures en laboratoire

	$T_E - T_J$	$T_E - T_K$	$T_A - T_I$	$T_K - T_L$	$T_K - T_M$
Écart moyen	0.092	0.120	0.011	0.051	0.041

TAB. 4.5 – Écarts moyens de température entre différents points en surface de la maquette, lors de mesures réalisées en laboratoire

Remarque

Lors des mesures en extérieur, les températures enregistrées aux trois crêtes ne pourront pas être identiques. En effet, les ombrages seront différents selon la position du point et l’instant des mesures : le matin, la crête située à l’Est n’est pas ombrée sur sa face Est, tout comme la face Ouest de la crête située à l’Ouest pendant l’après-midi.

4.4.5 Principales remarques

Cette section nous a permis de réaliser un bilan d'incertitude globale sur les mesures en température pour la campagne expérimentale. Pour cela, l'incertitude de chacun des postes d'erreur a été estimée. L'incertitude résultante est $\delta T_{global} = \pm 0.58^\circ\text{C}$. Ensuite, des mesures en laboratoire pendant quatre journées consécutives ont été réalisées sur la maquette. Trois conclusions ont pu être tirées de ces mesures, par comparaison des incertitudes de mesure en température avec l'incertitude globale. La première conclusion est que l'erreur relative entre les différents thermocouples à la surface de la maquette n'est pas significative. La deuxième est que les effets de bord selon l'axe y sont négligeables. Par conséquent le motif de surface peut être considéré comme infini dans cette direction. Troisièmement, les mesures aux sommets des trois crêtes ont été comparées et ont montré des différences négligeables par rapport à l'incertitude globale, ce qui signifie que le motif de surface peut également être considéré comme infini dans la direction x . Ces deux dernières remarques montrent que le profil sinusoïdal de surface, limité à trois crêtes et à une largeur de 40.3 cm, est représentatif d'un motif infini dans le plan (x, y) .

4.5 Mesures et analyses

Le dimensionnement de la maquette a été effectué à l'aide du code MISTRAL. Ensuite, la maquette a été réalisée, et le dispositif de mesure mis en place. Il s'est agi alors d'effectuer des mesures, pour disposer d'une banque de données, afin de valider ultérieurement un code de calcul de référence.

Cette section présente les deux campagnes de mesure, réalisées sur la Base Aérienne 701 à Salon-de-Provence, entre le 29 août et le 2 octobre 2002. Une première campagne, présentée en annexe H, s'est déroulée sur une journée. Elle a permis d'effectuer des tests de matériel et de mettre en place tous les instruments de mesure du dispositif. Cette section présente d'abord la campagne du 1er octobre 2002, retenue pour la validation ultérieure des modèles de température : c'est la journée qui a bénéficié des conditions météorologiques les plus clémentes. Ensuite, les autres résultats, acquis en septembre et octobre, sont analysés, montrant en particulier l'influence de la couverture nuageuse sur la variabilité de température en surface. Pour les trois campagnes, la cadence de mesure a été de 15 minutes. Cette cadence d'acquisition a été choisie pour que des mesures se déroulant sur trois jours consécutifs puissent être stockées sans problème dans la centrale d'acquisition.

4.5.1 Mesures retenues pour la validation : campagne du 1er octobre 2002

Les conditions météorologiques durant le mois de septembre 2002 sont malheureusement peu propices à nos mesures : il est difficile de trouver deux ou trois journées de beau temps consécutif.

Outre les mesures réalisées en août (voir annexe H), une campagne est menée du 10 septembre 2002 à 15h30 au 12 septembre 2002 à 14h. Durant cette période, les conditions météorologiques ne correspondaient pas exactement à nos attentes, à savoir un ciel clair. Le ciel était voilé, traversé parfois par de gros passages nuageux. Les résultats de cette campagne sont intéressants pour l'analyse de l'influence de la couverture nuageuse sur la température de surface. Ils ne seront néanmoins pas retenus pour la validation ultérieure des modèles, c'est pourquoi leur analyse est présentée en section 4.5.2.2, après la campagne retenue.

Des mesures ont ensuite été réalisées dans une période météorologique plus favorable, du 30 septembre 2002 à 14h au 3 octobre 2002 à 12h. Les figures 4.40 et 4.41 montrent le rayonnement global reçu, ainsi que la température de l'air et la vitesse du vent. Les données météorologiques sont enregistrées instantanément toutes les minutes, et les résultats présentés sont des courbes

lissées par une moyenne glissante sur 15 minutes. L'axe temporel est en heures solaires. La figure 4.40 montre que la journée du 1er octobre est très dégagée, excepté un passage nuageux autour de 11h. En revanche, la journée du 2 octobre est plutôt nuageuse. Pour cette raison, c'est la journée du 1er octobre qui est retenue pour la validation ultérieure de modèles de températures de surface. Les résultats et analyses de la journée du 2 octobre sont rapportés en section 4.5.2.1.

La figure 4.41 montre que la température de l'air varie entre 280 K et 296 K. Elle a diminué d'une dizaine de degrés par rapport aux mesures préparatoires du mois d'août, puisqu'elle variait alors entre 288 K et 306 K. La vitesse maximale du vent est de 3.3 m/s, mais l'écart-type de la vitesse est, sur les deux journées de mesures, inférieur à 1 m/s. Cette valeur est faible, compte tenu de la région dans laquelle s'effectuent les mesures et de la présence fréquente de Mistral. Considérant les données météorologiques enregistrées durant la campagne de mesure d'octobre 2002, la journée du 1er octobre 2002 est retenue comme campagne de mesure principale pour la validation ultérieure des modèles de variabilité de température de surface.

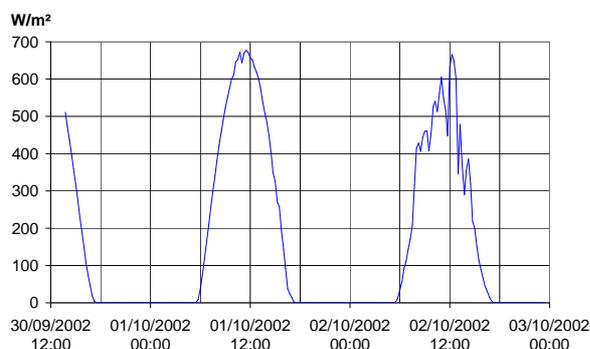


FIG. 4.40 – Rayonnement global mesuré, du 30 septembre au 3 octobre 2002, sur la BA 701 à Salon-de-Provence –moyennes glissantes sur 15 mn

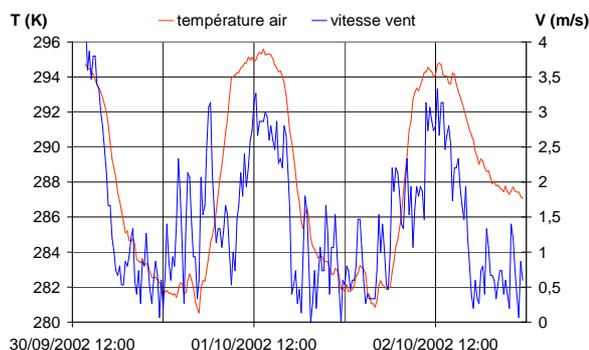


FIG. 4.41 – Température de l'air et vitesse du vent mesurées, du 30 septembre au 3 octobre 2002, sur la BA 701 à Salon-de-Provence – moyennes glissantes sur 15 mn

Remarque : homogénéité de surface

Les figures 4.42 et 4.43 montrent des images infrarouges en bande II de la surface de la maquette à 14h20. Sur ces deux images, la fenêtre de températures est de 20 K. On voit légèrement l'emplacement des thermocouples sur la figure 4.42, cependant les différences de températures sont faibles et on peut considérer que les températures de surface sont homogènes sur toute la surface de la maquette.

La figure 4.44 présente les températures en surface du profil au matin du 1er octobre. Ces températures commencent à augmenter vers 6h sur toute la surface. Cette augmentation est plus importante sur la face Est, en particulier aux points C et D, puisqu'entre 6h et 9h la température au point C augmente de 24 K tandis qu'au point G, situé sur la face Ouest donc à l'ombre, la température augmente seulement de 9 K. Les contrastes maximaux se trouvent à 9h, avec 20 K entre les points D et G. À partir de 9h, les contrastes maximaux diminuent : 13 K à 10h puis 6 K à 11h (figure 4.45) entre D et G. À midi, lorsque le soleil est à son zénith, la température est maximale à la crête, et on a un contraste maximal de 3 K entre le sommet de la crête (point E) et les flancs Est et Ouest (points C et G). À partir de midi, le soleil éclaire toute la face Ouest, et la face Est passe progressivement à l'ombre. Les maxima de températures se trouvent alors

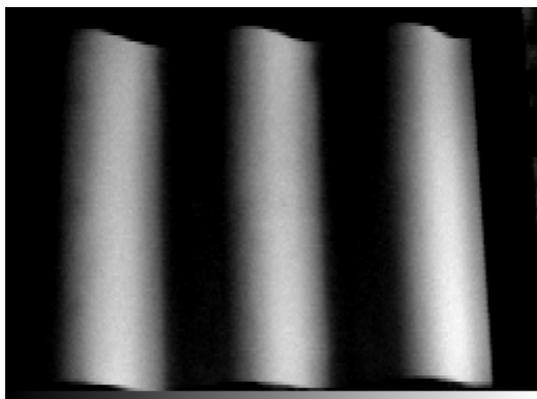


FIG. 4.42 – Image infrarouge de la surface de la maquette –crêtes Est et centrale, le 1er octobre 2002 à 14h20

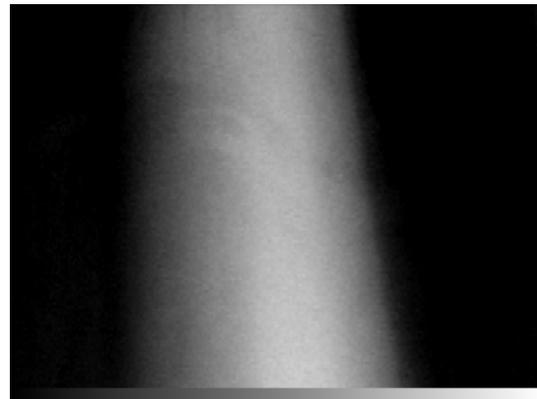


FIG. 4.43 – Image infrarouge de la crête centrale de la maquette : région des thermo-couples, le 1er octobre 2002 à 14h20

sur la face Ouest et les contrastes recommencent à croître : 7 K entre les points F et C à 13h puis 12 K entre les points G et C à 14h. Les minima de température se trouvent sur la face Est, dont la température décroît à partir de 11h. Par ailleurs, les températures aux sillons (points A et I), qui n'ont fait qu'augmenter, commencent à diminuer à partir de 14h. En effet, à partir de cette heure, le rayonnement solaire direct n'atteint plus les sillons.

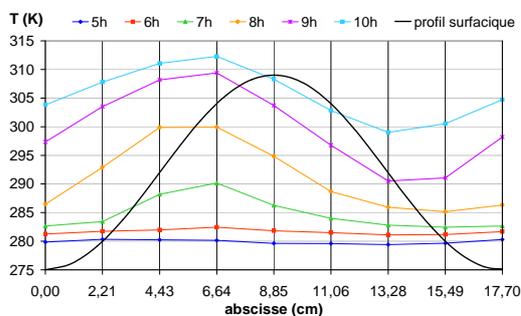


FIG. 4.44 – Températures mesurées en surface de la maquette le 1er octobre 2002, le matin

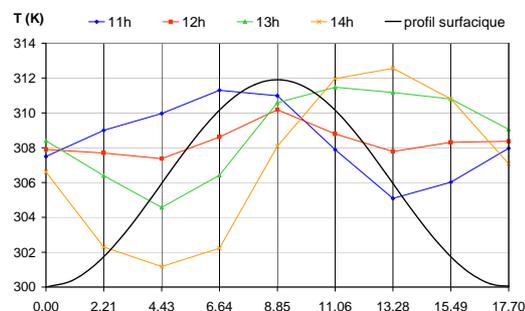


FIG. 4.45 – Températures mesurées en surface de la maquette le 1er octobre 2002, le midi

La figure 4.46 montre les températures en surface du profil le 1er octobre 2002 de 14h à 18h. À partir de 14h, les températures commencent à décroître également sur la face Ouest, avec le déclin du soleil. Les contrastes s'amenuisent progressivement, leur maximum passant de 12 K à 14h à 6 K à 16h entre les points G et C. Puis, à partir de 16h, le soleil se couche et les contrastes s'aplanissent sur tout le profil.

Qualitativement, durant la journée le motif de la surface est reproduit sur l'allure des températures de surface : celles-ci décrivent une pseudo-sinusoïde, dont le maximum se décale selon la direction solaire. L'amplitude de cette courbe pseudo-sinusoïdale est minimale lorsque le soleil est au zénith. L'allure assez régulière de l'évolution des températures en surface de la maquette suggère la possibilité de rapprocher cette évolution par des fonctions mathématiques connues. Cet élément fournit une première piste pour la modélisation de la variabilité spatiale de la

température, du moins pour le cas particulier d'un relief périodique sinusoïdal.

La courbe pseudo-sinusoïdale décrivant l'évolution temporelle des températures de surface pendant la période diurne semble par ailleurs avoir un lien direct avec l'incidence solaire et l'orientation de la surface, autrement dit avec l'angle situé entre la normale à la surface et la direction solaire. Cet élément sera à prendre en compte ultérieurement, lors de l'élaboration de modèles de température de surface.

L'"aplanissement" des contrastes à partir de 16h est bien mis en évidence sur la figure 4.47. On constate même que les températures les plus basses sont enregistrées à la crête à partir de 17h, puis la crête a une température inférieure de 3 K à celle des sillons à 19h et 20h. Ensuite, les températures en surface deviennent inférieures à la température de l'air ; la surface de la maquette se refroidit durant la nuit et les températures s'uniformisent (figure 4.48). Les contrastes crête/sillon restent autour de 1 K entre minuit et 5h. On peut donc considérer, relativement aux incertitudes de mesures, que les contrastes sont quasi nuls en surface pendant la nuit.

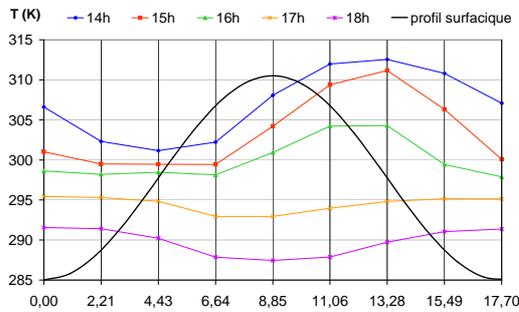


FIG. 4.46 – Températures mesurées en surface de la maquette le 1er octobre 2002, l'après-midi

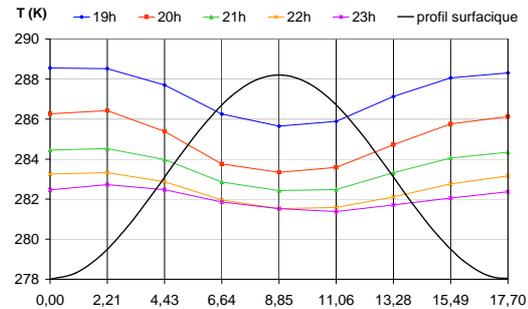


FIG. 4.47 – Températures mesurées en surface de la maquette le 1er octobre 2002, le soir

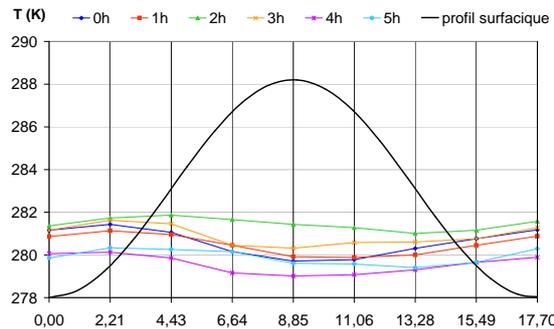


FIG. 4.48 – Températures mesurées en surface de la maquette la nuit du 1er au 2 octobre 2002

La figure 4.49, montrant l'évolution des températures en quatre points de la surface, résume bien toutes les remarques précédentes. En effet, jusqu'à 6h30 les températures aux points C et E (respectivement face Est et crête) sont très semblables, mais à partir de cette heure les températures augmentent davantage sur la face Est. C'est sur cette face, au point C, que les températures sont les plus élevées jusqu'à environ 11h, et à partir de 10h la température en C

commence à décroître alors qu'elle continue d'augmenter pour les autres points de la surface. Jusqu'à 8h, les températures aux points A et G (sillon et face Ouest) sont très similaires, mais à partir de cette heure la température augmente davantage dans le sillon qui, contrairement à la face Ouest, reçoit le rayonnement solaire direct. Entre 11h et 13h, les températures en surface sont assez similaires : lorsque le rayonnement solaire direct atteint tous les points, les contrastes sont faibles. À partir de 13h c'est au point G, sur la face Ouest, que les températures sont les plus élevées, et il en est ainsi jusqu'à 16h30. À 14h30, la température au point G commence à décroître, et cette décroissance est, par rapport aux autres points de surface, très brutale : -18 K entre 14h30 et 17h. À partir de cette même heure, les contrastes diminuent sur toute la surface jusqu'à être proches de 0 K vers 16h30.

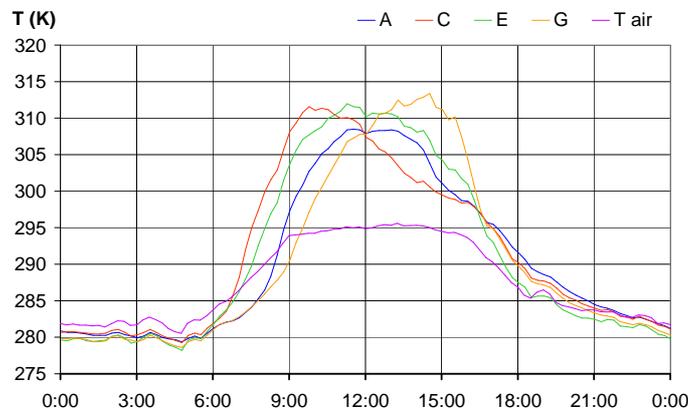


FIG. 4.49 – Températures mesurées en quatre points –A : sillon, C : face Est, E : crête, G : face Ouest– en surface de la maquette le 1er octobre 2002

Autour de 16h30 il s'opère une inversion de ces contrastes : c'est aux sillons que la température devient la plus élevée, et la crête est plus froide que tous les autres points. Ce phénomène persiste en soirée et pendant la nuit. Pendant la nuit, cet écrasement des températures et cette "fuite thermique" peuvent être expliqués par le fait que la température de la maquette se rapproche de la température de l'air, et la convection domine les échanges. De plus, considérant un petit volume autour des points situés aux crêtes et aux sillons, le point E au sommet de la crête a au-dessous de lui beaucoup moins de matière que les autres points et particulièrement les points A et I aux sillons (voir figure 4.50). De plus, le point E "voit" tout l'hémisphère, qui est très froid. Au contraire, le point A n'en voit qu'une partie (les flancs des crêtes limitent l'angle solide), et les flancs des crêtes adjacentes rayonnent vers lui avec une température très supérieure à celle du fond de ciel. Ces arguments expliquent que la température soit plus basse aux crêtes, et que celles-ci soient le siège d'une telle fuite d'énergie.

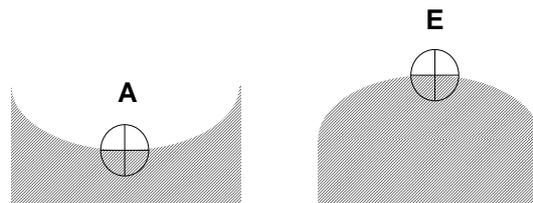


FIG. 4.50 – Volumes autour des points A et E, dans un sillon et au sommet d'une crête

Les maxima de température diffèrent en valeur et en heure selon l'emplacement des points en surface. Les points A et E ont une évolution similaire : même si la température au point A est toujours inférieure à celle au point E (308 K pour le point A et 311 K pour E), ils atteignent leur maximum de température à la même heure, autour de midi. Au contraire, le point C atteint son maximum de température (311.5 K) à 12h, et le point G atteint 313.5 K à 14h30.

Nous pouvons déduire de toutes ces observations une très forte influence du rayonnement solaire direct et de l'orientation des pentes sur les températures de surface pendant la journée. De plus, durant la nuit c'est la convection qui domine les échanges ; celle-ci tend à uniformiser les températures de surface et les contrastes sont quasiment nuls entre minuit et 5h.

4.5.2 Résultats complémentaires : campagnes de septembre et d'octobre 2002

Les figures 4.40 et 4.41 nous ont renseignés sur l'état de la couverture nuageuse. L'analyse des mesures enregistrées le 2 octobre vont pouvoir nous fournir des informations sur l'évolution des températures de surface par temps légèrement couvert. Par ailleurs, l'étude des mesures réalisées durant la campagne de septembre va compléter cette analyse, en apportant des éléments concernant les températures de surface par temps couvert et instable.

4.5.2.1 Mesures du 2 octobre

Les observations de la journée du 2 octobre vont nous permettre d'apprécier l'influence de la couverture nuageuse sur les températures de surface.

Les figures 4.51 et 4.52 montrent des images infrarouges de la maquette, l'une le matin et l'autre en milieu d'après-midi. On voit sur la figure 4.51 que sur la crête Est, à 11h10, les températures sont plus faibles sur la zone des thermocouples K, L, et M : la température en surface n'est pas homogène. La figure 4.53 montre l'éclairement solaire au cours de la journée du 2 octobre 2002. À partir de 8h celui-ci est très fluctuant. Ces fluctuations peuvent expliquer les inhomogénéités de température de surface autour des thermocouples, étudiée lors du bilan d'erreur (section 4.4.1).

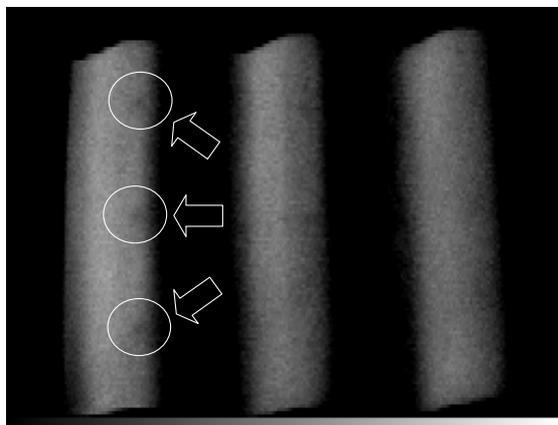


FIG. 4.51 – Image infrarouge de la surface de la maquette le 2 octobre 2002 à 11h10

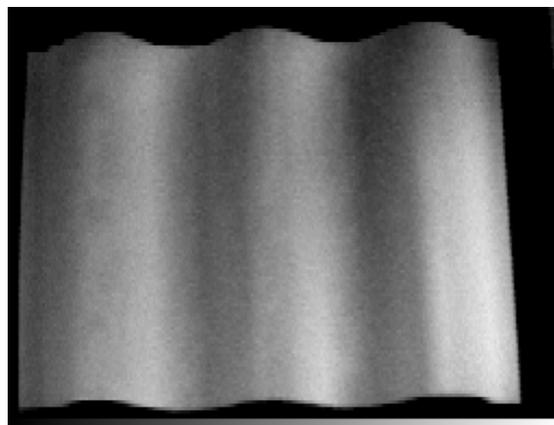


FIG. 4.52 – Image infrarouge de la surface de la maquette le 2 octobre 2002 à 15h50

La figure 4.52 montre une image en luminance de la surface de la maquette à 15h50. Cette fois, les températures de surface apparaissent beaucoup plus homogènes que le matin. L'éclairage solaire autour de cette heure devient plus régulier, atténuant ainsi les inhomogénéités de plâtre en surface autour des thermocouples.

Les figures 4.53 et 4.54 illustrent les conditions météorologiques pour la journée du 2 octobre 2002. Le rayonnement solaire est très instable : le ciel subit des passages nuageux à répétition. La température de l'air est très similaire à celle du 1er octobre, excepté à partir de 16h : le 2 octobre, elle décroît beaucoup moins rapidement et atteint 288 K à minuit, contre seulement 282 K à cette même heure le 1er octobre. Les vitesses de vent sont assez semblables pour les deux journées, donc la convection forcée ne doit *a priori* pas influencer les températures de surface de la maquette.

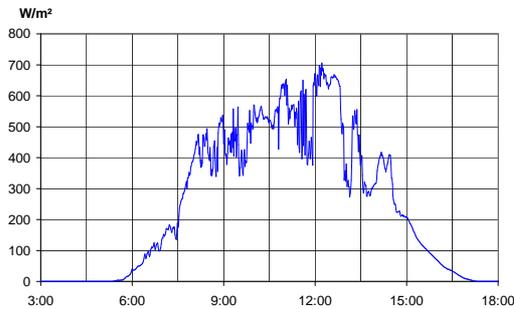


FIG. 4.53 – Rayonnement global mesuré, le 2 octobre 2002, sur la BA 701 à Salon-de-Provence

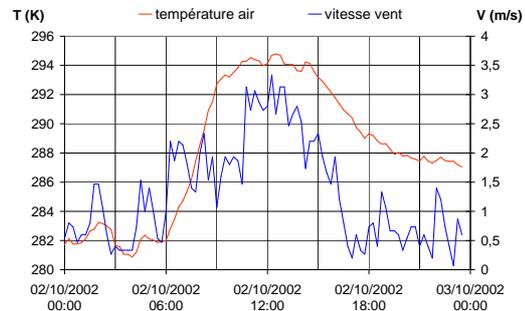


FIG. 4.54 – Température de l'air et vitesse de vent mesurées, le 2 octobre 2002, sur la BA 701 à Salon-de-Provence

La figure 4.55 montre les températures de surface le 2 octobre entre 5h et 10h. La température commence à croître à partir de 7h sur tout le profil, et particulièrement sur la face Est. En effet, entre 5h et 10h les températures augmentent de 25 K au point D situé sur la face Est, et de 18 K au point G, situé au milieu de la face Ouest. Par ailleurs, le contraste maximal est de 10 K entre ces deux points, à 8h. Ces contrastes sont inférieurs à ceux enregistrés le 1er octobre. Ce fait est à mettre en relation avec la courbe du rayonnement solaire, qui est très perturbée entre 8h et 10h. Le rayonnement solaire direct n'atteignant pas en permanence la maquette, la température de cette dernière augmente moins.

La figure 4.56 montre les températures de surface entre 10h et 14h. Malgré le ciel voilé, les maxima de température se déplacent de la face Est vers la face Ouest. Les températures maximales sont inférieures à celles enregistrées la veille, et les contrastes sont beaucoup moins importants : de 5 K à 11h entre les points D et G, ils diminuent à 2 ou 3 K entre 12h et 14h. Durant toute cette période, le rayonnement solaire direct atteignant la maquette est très irrégulier, ce qui peut, encore une fois, expliquer que les températures de surface s'élèvent beaucoup moins que le 1er octobre.

La figure 4.57 illustre les températures de surface de 14h à 18h. Les températures maximales sont sur la face Ouest, mais les contrastes sont toujours faibles : 2,5 K à 15h entre les points C et G. Par rapport aux contrastes de la veille, la température en surface de la maquette apparaît quasiment uniforme. Néanmoins, sur tout le profil les températures diminuent beaucoup moins que la veille aux mêmes heures : entre 14h et 18h, le point G perd 12 K le 2 octobre pour atteindre 291 K, alors que la veille celui-ci perdait 23 K pour arriver à moins de 290 K à 18h.

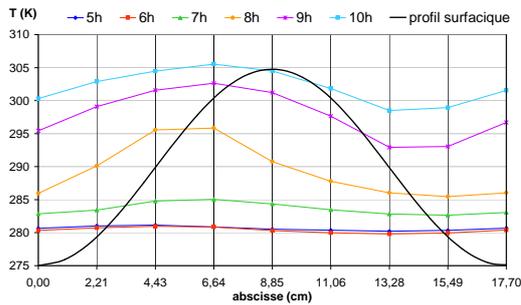


FIG. 4.55 – Températures mesurées en surface de la maquette le 2 octobre 2002, le matin

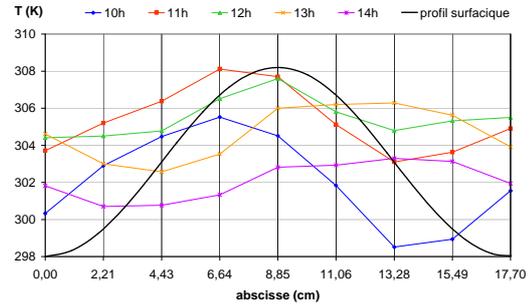


FIG. 4.56 – Températures mesurées en surface de la maquette le 2 octobre 2002, le midi

Entre 19h et 23h, les contrastes sont encore faibles sur le profil (figure 4.58) : entre 1 K et 3 K. C'est à la crête que les températures les plus basses sont enregistrées, illustrant une fois de plus le phénomène de "fuite thermique". Les températures à 19h sont inférieures à celles du 1er octobre, mais par la suite elles diminuent beaucoup moins vite : le 1er octobre la crête perd 5 K en 5 heures, alors que le 2 octobre elle perd seulement 2 K. Pendant ces cinq heures, la température de surface le 2 octobre est en moyenne supérieure de 4 K à celle du 1er octobre. Cette forte différence peut être expliquée par le fait que la température d'air décroît beaucoup moins le 2 octobre entre 17h et minuit. Le rayonnement solaire direct étant absent au cours de cette période, c'est la convection qui domine les échanges d'énergie, par conséquent une température d'air supérieure, plus proche de la température de la maquette, va permettre à la surface de la maquette de garder son énergie et de refroidir moins vite. Ceci justifie ce même comportement pour les températures en surface de la maquette pendant la nuit (figure 4.59) : entre 0h et 5h, les températures de surface sont en moyenne 6 K plus élevées le 2 octobre que la veille.

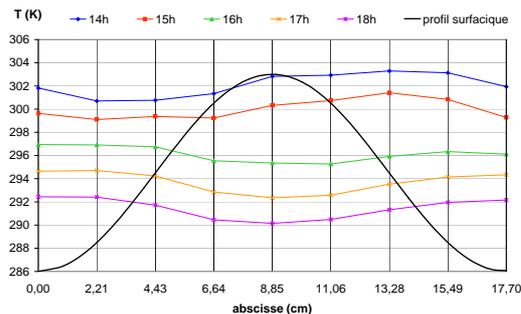


FIG. 4.57 – Températures mesurées en surface de la maquette le 2 octobre 2002, l'après-midi

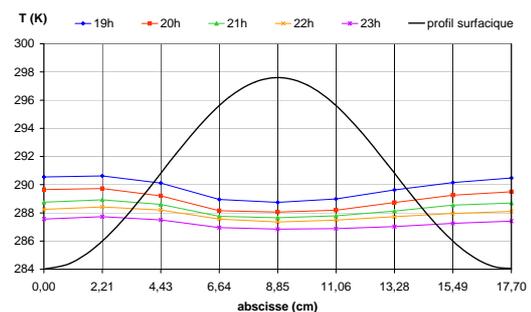


FIG. 4.58 – Températures mesurées en surface de la maquette le 2 octobre 2002, le soir

La figure 4.60 montre l'évolution des températures en quatre points de la surface, le 2 octobre 2002 : le point A dans un sillon, le point C au milieu de la face Est, le point E sur la crête centrale de la maquette, et le point G sur la face Ouest. Cette représentation permet de visualiser les phénomènes en surface au cours du temps. Globalement, ces températures ont le même comportement que pour la journée du 1er octobre : la température s'élève d'abord sur la face Est au point C, et les maxima de température changent de face, passant sur la face Ouest à partir

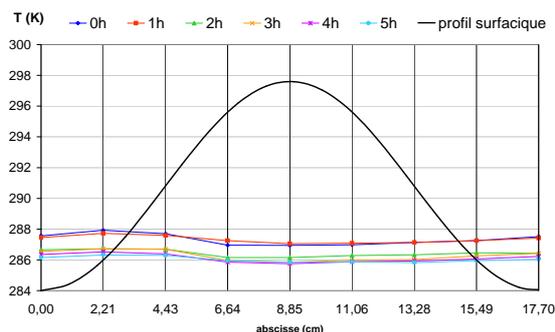


FIG. 4.59 – Températures mesurées en surface de la maquette la nuit du 2 au 3 octobre 2002

de midi. Il y a néanmoins quelques différences : les courbes du 2 octobre sont nettement moins régulières, ces irrégularités étant dues à l'éclairement solaire inconstant, à cause de passages nuageux nombreux et importants. Remarquons également que, contrairement au 1er octobre, le 2 octobre la température au point C devient inférieure à celle du point E à partir de 10h. De plus, l'inversion des contrastes s'effectue plus tôt le 2 octobre : vers 15h15, contre 16h30 le 1er octobre. On peut y voir une influence directe de l'éclairement solaire. Ensuite, les températures au cours du 2 octobre sont en moyenne inférieures jusqu'à 18h, puis deviennent supérieures à celles du 1er octobre. Ceci est dû à la température d'air, qui est, à partir de cette heure, nettement plus importante le 2 octobre que la veille.

Ces mesures confirment une fois encore que pendant la période diurne c'est le rayonnement solaire direct qui gouverne les échanges : lorsque celui-ci diminue, les températures de surface diminuent également, et elles ont tendance à s'uniformiser. Et pendant la nuit, la température de l'air a une influence directe sur les températures de surface de la maquette.

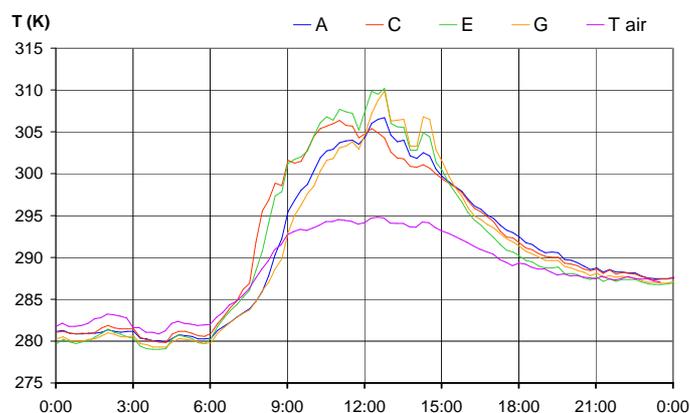


FIG. 4.60 – Températures mesurées en quatre points –A : sillon, C : face Est, E : crête, G : face Ouest– en surface de la maquette le 2 octobre 2002

4.5.2.2 Campagne de mesure de septembre

Les conditions météorologiques durant le mois de septembre 2002 sont peu propices, mais des mesures sont tout de même réalisées du 10 septembre 2002 à 15h30 au 12 septembre 2002 à 14h. La figure 4.61 montre une image infrarouge de la surface de la maquette le 11 septembre 2002 à 12h40. La fenêtre de mesures est de 20 K. Sur la crête Est les zones des thermocouples apparaissent, signe de l'inhomogénéité des températures de surface. La figure 4.62 montre le même phénomène pour le 12 septembre à 7h25. De même, sur la figure 4.63 on voit très nettement apparaître l'emplacement des thermocouples A à E. Mais comme en octobre, ces phénomènes apparaissent toujours pendant une période où l'éclairement solaire est irrégulier (voir figure 4.64). De plus, les différences de températures sont inférieures à l'incertitude de mesure (0.58 K).

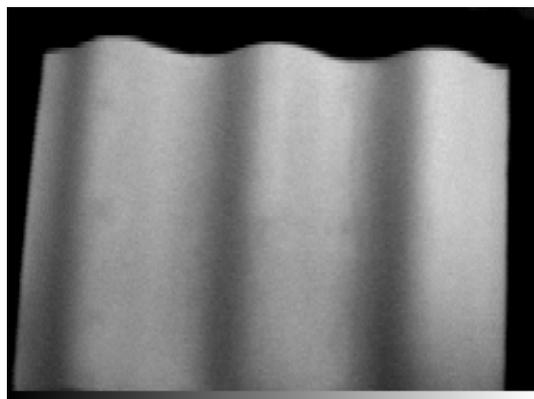


FIG. 4.61 – Image infrarouge de la surface de la maquette le 11 septembre 2002 à 12h40

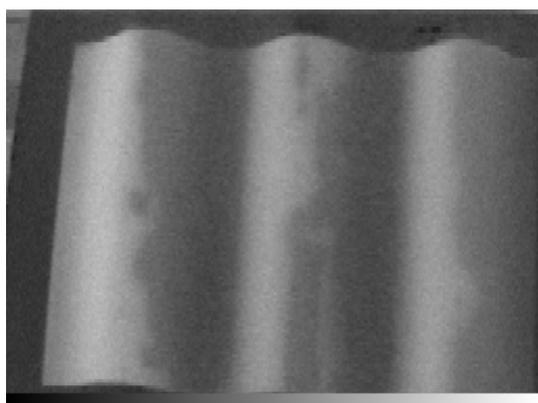


FIG. 4.62 – Image infrarouge de la surface de la maquette le 12 septembre 2002 à 7h25

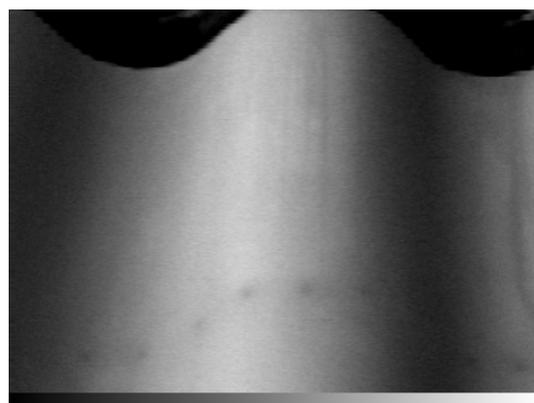


FIG. 4.63 – Image infrarouge de la crête centrale de la maquette : région des thermocouples, le 12 septembre 2002 à 9h10

La météo, pendant la période de mesures, est très variable : le 11 septembre, le soleil prédomine mais le ciel est parfois voilé, troublé par des passages nuageux ; la figure 4.64 représente le rayonnement global au cours de ces deux journées, et illustre bien ces passages nuageux, en particulier autour de 8h, de 12h, et entre 14h et 15h le 11 septembre. La journée du 12 septembre

est vraiment très perturbée par les nuages : entre 6h30 et 8h30 le rayonnement est très fluctuant, puis remonte brusquement vers des valeurs atteintes pour un ciel dégagé. Puis entre 11h et 12h, le ciel est très couvert, et l'éclairement chute de nouveau. À partir de 13h, les valeurs d'éclairement sont très inférieures à celles d'une journée sans nuages. La température d'air (figure 4.65) dans la nuit du 10 au 11 septembre est beaucoup plus élevée que celle enregistrée dans la nuit du 11 au 12 septembre : au plus froid elle atteint 288 K le 11 septembre à 6h, et 283 K seulement, le 12 septembre à 2h (et 285 K à 6h). Quant à la vitesse du vent, elle n'est pas négligeable pendant la journée, atteignant les 7 m/s ; son écart-type est de 2.1 m/s, ce qui est le double de l'écart-type de la vitesse du vent lors des mesures d'octobre. La convection forcée n'est donc pas négligeable.

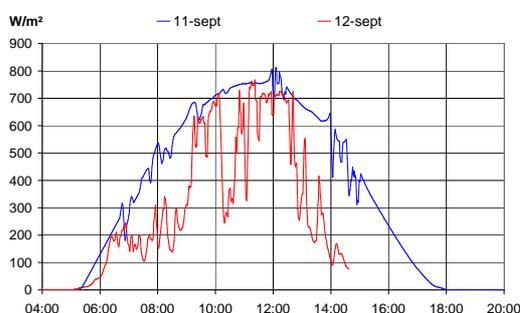


FIG. 4.64 – Rayonnement global mesuré, du 10 au 12 septembre 2002, sur la BA 701 à Salon-de-Provence

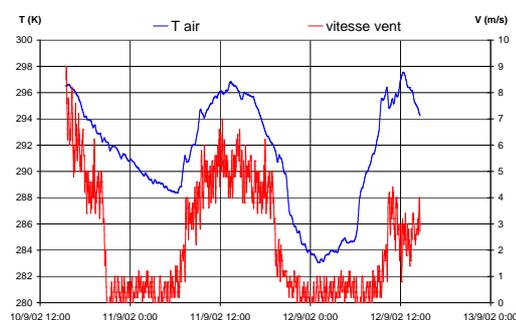


FIG. 4.65 – Température de l'air et vitesse de vent mesurées, du 10 au 12 septembre 2002, sur la BA 701 à Salon-de-Provence

Les températures de surface aux points A, C, E, et G, pendant la période de mesure du 10 au 12 septembre 2002 sont illustrées sur la figure 4.66. Durant la journée, ces températures sont globalement plus élevées le 12 septembre que le 11 septembre, alors que les nuages sont beaucoup plus nombreux (voir l'éclairement sur la figure 4.64). On pouvait donc attendre des températures plus basses, le rayonnement solaire atteignant beaucoup moins la maquette. Mais, en l'absence d'éclairement solaire, c'est la convection qui régit les échanges : sur la figure 4.65 on voit que la température de l'air est légèrement plus élevée le 12 septembre, mais c'est surtout le vent qui est beaucoup plus faible, et qui refroidit donc moins la surface de la maquette. L'écart-type de la vitesse du vent est en effet, pour la journée du 11 septembre, de 2.1 m/s, contre 1.2 m/s le 12 septembre.

Durant la seule journée du 11 septembre, entre 6h55 et 7h25 une chute de l'éclairement solaire entraîne une chute des températures de surface, mais cette chute est différente selon la position en surface : les points A, E, et G sont fortement affectés (figure 4.67) puisque leur température baisse, alors que le point C imprime seulement une légère inflexion : c'est le point C, situé sur la face Est et donc orienté de manière à recevoir le maximum de rayonnement solaire, qui subit le moins cette baisse d'énergie reçue. De la même manière, une baisse importante et une forte irrégularité de l'éclairement solaire entre 12h et 12h35 entraîne des chutes de températures aux points non soumis à l'éclairement direct : les points A et C, tandis que les points E et G sont à peine affectés. Les gros passages nuageux entraînant de fortes variations de l'éclairement solaire entre 14h et 15h se traduisent sur les températures de surface, encore une fois, en faisant diminuer les températures sur tout le profil, et plus particulièrement aux points E et G.

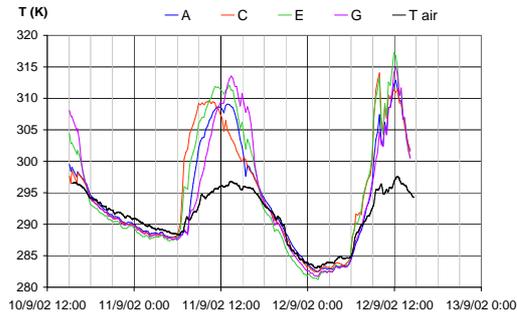


FIG. 4.66 – Températures mesurées en quatre points –A : sillon, C : face Est, E : crête, G : face Ouest– en surface de la maquette du 10 au 12 septembre 2002

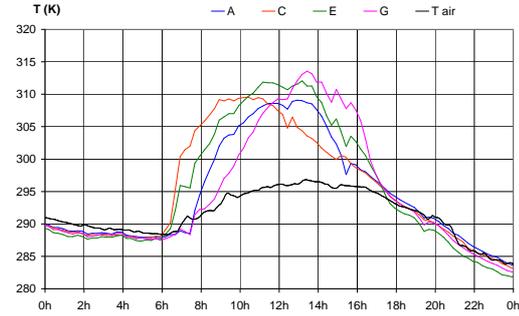


FIG. 4.67 – Températures mesurées en quatre points –A : sillon, C : face Est, E : crête, G : face Ouest– en surface de la maquette le 11 septembre 2002

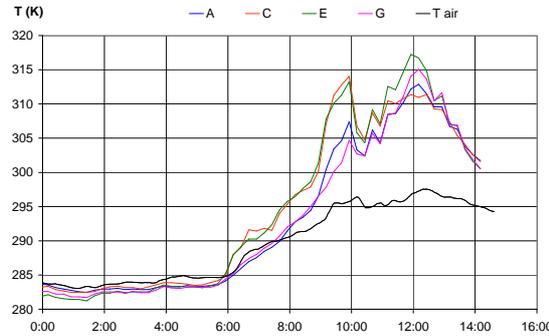


FIG. 4.68 – Températures mesurées en quatre points –A : sillon, C : face Est, E : crête, G : face Ouest– en surface de la maquette le 12 septembre 2002

La figure 4.68 montre les températures en surface de la maquette pour la journée du 12 septembre. À partir du lever du soleil vers 6h, les températures sont groupées par situation solaire : les points C et E, respectivement sur la face Est et à la crête, sont soumis à l'éclairement solaire direct, et leurs températures sont très proches jusqu'à environ 11h. Et de la même façon, les températures des points A et G, situés respectivement dans le sillon et sur la face Ouest et donc à l'ombre le matin, sont très semblables jusqu'à 11h. Remarquons toutefois qu'entre 9h et 10h ces températures groupées se désolidarisent. Le point C a une température supérieure à celle du point E, de même pour le point A par rapport à la température au point G. La température augmente donc plus rapidement lorsque l'angle entre le vecteur solaire et la normale à la surface est faible. Une brusque chute de l'éclairement solaire entre 10h et 11h (voir figure 4.64) entraîne une forte chute des températures sur toute la surface : les points C et E, au soleil, perdent 9 K tandis que les points A et G, à l'ombre, perdent seulement 3 K, dans les 30 premières minutes de cette forte perturbation nuageuse. Enfin, à partir de 13h les températures de surface sont très proches quel que soit le point : les températures s'uniformisent, en conséquence d'une forte couverture nuageuse.

Il se confirme donc que, en cas de perturbations nuageuses, les températures aux points soumis à l'éclairement solaire direct sont moins influencées par les chutes d'éclairement solaire que les points à l'ombre.

4.5.3 Principales conclusions

Les résultats de la campagne expérimentale ont révélé plusieurs éléments. Ils ont tout d'abord confirmé la forte variabilité spatiale de la température de surface, quel que soit le moment de la journée : les contrastes atteignent 18 K entre les faces Est et Ouest par une journée ensoleillée du mois d'octobre, et peuvent dépasser 20 K en août. Les températures augmentent d'abord sur la face Est, soumise à l'éclairement solaire direct, puis à midi il s'opère une inversion des contrastes : les températures maximales se déplacent de la face Est vers la face Ouest, tandis que les températures minimales font le chemin inverse. Ce phénomène de "changement de face" a lieu que le ciel soit dégagé, légèrement voilé, ou nuageux. Les contrastes en surface diminuent progressivement au cours de l'après-midi, pour être minimaux juste avant le coucher du soleil, vers 17h30 : entre 1 K et 2 K.

La température en surface de la maquette possède une forme pseudo-sinusoïdale, dont le maximum se déplace spatialement et temporellement de la face Est vers la face Ouest, suivant le déplacement du maximum d'éclairement solaire. L'amplitude de cette pseudo-sinusoïde varie : elle est maximale autour de 10h et de 16h, et minimale autour de midi, lorsque le soleil est à son zénith et pendant la nuit. Cette évolution permet d'envisager, lors du développement de modèles de température, une représentation mathématique de la température de surface en fonction de l'abscisse et du temps.

La nuit, c'est aux crêtes que la température est la plus basse. Ce phénomène de "fuite thermique" a deux causes. La première est le rapport surface/volume à ce point. En effet, si on considère un petit volume autour de la crête, et le même petit volume autour d'un sillon, on voit qu'ils ont la même surface en contact avec l'atmosphère. Néanmoins, le volume solide sous ces points n'est pas le même : il est beaucoup moins important dans le cas de la crête, ceci expliquant pourquoi ce point a plus de mal à garder son énergie. De plus, les crêtes sont soumises au rayonnement du fond de ciel sur tout l'hémisphère, alors que les sillons sont "protégés" par les flancs adjacents, beaucoup plus chauds que le fond de ciel, et agissent comme un "piège" de rayonnement.

De jour, les échanges thermiques sont régis principalement par le rayonnement solaire. En effet, de jour les contrastes en surface sont très élevés quelle que soit l'heure, alors que ceux-ci sont moindres pendant la nuit. De nuit, en l'absence d'éclairement solaire, c'est la convection qui régite les échanges. Ceci reste vrai lors de passages nuageux. La couverture nuageuse a une influence directe sur les températures de surface : elles diminuent. Ces diminutions de températures sont plus importantes pour les points soumis à l'éclairement solaire direct que pour les points à l'ombre. Ceci entraîne un écrasement des contrastes en présence de nuages. Les températures de surface, dans ce cas, sont très dépendantes de la température de l'air et de la vitesse du vent.

Avant le début des mesures, nous voulions obtenir des mesures de températures de surface pour la maquette élaborée (section 4.2), par temps clair et stable. Mais les conditions météorologiques entre fin août 2002 et début octobre 2002 ne nous ont pas permis de remplir complètement cet objectif. Nous avons obtenu une banque de mesures beaucoup plus diversifiée que ce qui avait été prévu : nous disposons également de mesures avec un ciel voilé et par temps fortement nuageux. Outre la compréhension des phénomènes ayant lieu en surface, ces mesures nous ont donc permis de constituer une banque de mesures pour la validation ultérieure du code MISTRAL.

Chapitre 5

Validation du code MISTRAL

Le chapitre précédent nous a apporté une meilleure compréhension des phénomènes influençant les températures de surface d'un sol avec relief. Nous avons pu quantifier la variabilité spatiale et temporelle des températures de surface pour un sol à profil sinusoïdal. Il a également été possible d'identifier certains des phénomènes qui dominent cette variabilité, comme le rayonnement solaire de jour et la convection de nuit. Outre cela, nous disposons maintenant d'une banque de mesures de températures de surface représentatives d'une géométrie complexe. Néanmoins, ces mesures ne sont valables que dans la configuration de la campagne expérimentale, et ne nous permettent pas de trop grandes extrapolations dans le cas de configurations différentes (autre orientation des crêtes, autres dimensions, autre profil de surface, ...). Il apparaît donc nécessaire de disposer d'un code de simulation tridimensionnel capable de reproduire les phénomènes réels, à la fois pour tester des cas différents du cas expérimental traité dans le chapitre 4 et pour disposer d'une référence, à laquelle il va être possible de comparer des modèles simplifiés de température de surface afin de les valider.

L'objectif de ce chapitre est donc de valider un code de calcul de température de surface pour qu'il devienne notre code de référence. C'est le code MISTRAL, présenté au chapitre 3 et comportant des modèles physiques complets et adaptés au calcul tridimensionnel, qui a été choisi pour cela. Pour établir le code MISTRAL comme code de référence, deux étapes sont nécessaires. En premier lieu, une étude des paramètres numériques (maillage, pas de temps de calcul) va nous permettre d'examiner l'influence de ceux-ci sur les températures de surface, et ainsi choisir les paramètres les plus adaptés à notre cas d'étude. En second lieu, une simulation est menée avec les paramètres numériques choisis. Une comparaison des températures simulées avec les températures mesurées lors de la campagne expérimentale va nous permettre de voir si le code MISTRAL est capable de reproduire fidèlement les températures réelles.

Ce chapitre est ainsi composé de trois parties. Une première présente les outils mathématiques utilisés pour l'analyse des paramètres numériques. La seconde partie de ce chapitre est consacrée à l'étude de l'influence du maillage spatial et du pas de temps de calcul sur les températures de surface. Enfin, la dernière partie de ce chapitre livre une comparaison entre les températures mesurées et celles simulées avec le code MISTRAL.

5.1 Définition des outils mathématiques d'analyse

Cette section présente les définitions des outils mathématiques utilisés pour l'analyse des résultats de températures en surface de l'échantillon-test. La méthode de rééchantillonnage des données météorologiques est d'abord présentée. Les définitions des différentes températures moyennes, spatiales et temporelles, sont ensuite exposées, suivies des définitions des écarts moyens associés à ces températures, en vue de comparer les simulations entre elles.

5.1.1 Rééchantillonnage des données météorologiques

Les données météorologiques instantanées ont été enregistrées pendant la campagne expérimentale toutes les minutes. Ainsi, lors des simulations MISTRAL pour des pas de temps de calcul de 5, 15 et 30 minutes, ces données sont rééchantillonnées, afin de lisser les valeurs tout en conservant les informations des pas de temps précédents.

Ce sont des moyennes glissantes centrées qui sont utilisées. Notons V_i la valeur instantanée (à l'instant i) de la température de l'air ou de la vitesse du vent. Pour un pas de temps de calcul Δt , la valeur $V_n^{\Delta t}$ (température de l'air, vitesse du vent) rééchantillonnée à l'instant t_n est la moyenne :

$$V_n^{\Delta t} = \frac{\sum_{i=n-\Delta t/2}^{n+\Delta t/2} V_i}{\Delta t} \quad (5.1)$$

de sorte que, pour un pas de temps de calcul de 15 minutes, la valeur V_n à l'instant t_n est égale à :

$$V_n^{15} = \frac{\sum_{i=n-7}^{n+7} V_i}{15}$$

5.1.2 Moyennes et écarts

L'objectif est ici de présenter et de définir des grandeurs caractéristiques du résultat d'une simulation. Ces grandeurs caractéristiques, sous forme de moyennes et d'écarts, sont utilisées dans ce chapitre et le suivant pour analyser et comparer les températures simulées avec le code MISTRAL.

Le repère considéré est celui de la figure 5.1. Les indices i (longueur), j (largeur), et k (profondeur) correspondent aux nœuds de calculs respectivement dans les directions x , y , et z du maillage.

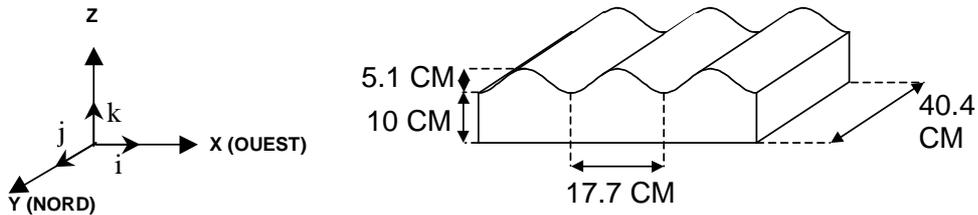


FIG. 5.1 – Géométrie, orientation, et repère de l'échantillon-test pour les simulations MISTRAL

Soient \mathcal{I} l'ensemble des nœuds de calcul dans la direction x du maillage (de 1 à i_{max} par pas de 1), et \mathcal{T} l'ensemble des pas de temps de calcul t (de 0 à t_{max} par pas de Δt).

On note n_i le nombre d'éléments de \mathcal{I} et n_t le nombre d'éléments de l'ensemble \mathcal{T} .

Ainsi, $n_i = i_{max}$, et $(n_t - 1) \times \Delta t = t_{max}$ où Δt peut prendre les valeurs 5, 15, et 30mn. Par conséquent on a l'égalité $n_t = t_{max}$ seulement lorsque $\Delta t = 1mn$.

On appelle température moyenne spatiale la valeur $\overline{T_{profil}}(t)$, calculée de la manière suivante :

$$\overline{T_{profil}}(t) = \frac{\sum_{i \in \mathcal{I}} T_i(t)}{n_i} \quad (5.2)$$

Cette somme spatiale est calculée à la surface sur le profil central. En conséquence, j et k sont fixés. k est sur la courbe de surface, donc $k = k_{max}$. Pour parcourir la surface selon le profil central, $j = j_{max}/2$.

On appelle température moyenne la valeur \overline{T} , calculée de la façon suivante :

$$\overline{T} = \frac{\sum_{(i,t) \in \mathcal{I} \times \mathcal{T}} T_i(t)}{n_i \cdot n_t} \quad (5.3)$$

Pour alléger l'écriture, l'ensemble des couples $(i, t) \in \mathcal{I} \times \mathcal{T}$ sera noté simplement i, t .

La somme temporelle s'effectue sur n_t pas de temps pour 24 heures, de sorte que lorsque le pas de temps est de 15 minutes, $n_t = 97$ pas de temps. La somme spatiale est réalisée comme précédemment, avec i variant de $i = 1$ à i_{max} . \overline{T} correspond donc à la moyenne temporelle et spatiale de la température de surface, sur les n_t pas de temps et les n_i points du profil de surface.

Deux autres températures moyennes sont définies (équations 5.4 et 5.5), qui sont les moyennes des températures respectivement supérieures et inférieures à la température moyenne globale \overline{T} . Ces deux moyennes correspondent aux températures moyennes de jour et de nuit à la surface de l'échantillon.

Afin de les exprimer, il est nécessaire au préalable de définir quatre ensembles :

- \mathcal{I}_{sup} (resp. \mathcal{I}_{inf}) est l'ensemble des points i du profil de surface pour lesquels la température $T_i(t)$ est supérieure (resp. inférieure) à \overline{T} ;
- \mathcal{T}_{sup} (resp. \mathcal{T}_{inf}) est l'ensemble des pas de temps t pour lesquels la température $T_i(t)$ est supérieure (resp. inférieure) à \overline{T} .

De ce fait, les quantités $n_{i\ sup}$ et $n_{i\ inf}$ désignent le nombre de points, et $n_{t\ sup}$ et $n_{t\ inf}$ le nombre de pas de temps, pour lesquels $T_i(t) \geq \overline{T}$ et $T_i(t) \leq \overline{T}$, respectivement.

$$\overline{T_{sup}} = \frac{\sum_{i,t} (T_i(t) \geq \overline{T})}{n_{i\ sup} \cdot n_{t\ sup}} \quad (5.4)$$

$$\overline{T_{inf}} = \frac{\sum_{i,t} (T_i(t) \leq \overline{T})}{n_{i\ inf} \cdot n_{t\ inf}} \quad (5.5)$$

Dans la suite du chapitre, les différentes simulations sont comparées au cas de référence (section 5.2.1). Pour ce cas de référence, le maillage spatial est pris aussi fin que possible, et le pas de temps de calcul est de 1 minute. L'exposant ref correspond à ce cas.

Ce cas de référence et les moyennes définies de l'équation 5.2 à l'équation 5.5 permettent de définir les écarts suivants (équations 5.6 à 5.9) :

$$\Delta \overline{T_{profil}} = \overline{T_{profil}} - \overline{T_{profil}^{ref}} \quad (5.6)$$

$$\Delta \overline{T} = \overline{T} - \overline{T^{ref}} \quad (5.7)$$

$$\Delta \overline{T_{sup}} = \overline{T_{sup}} - \overline{T_{sup}^{ref}} \quad (5.8)$$

$$\Delta \overline{T_{inf}} = \overline{T_{inf}} - \overline{T_{inf}^{ref}} \quad (5.9)$$

Dans le chapitre suivant (chapitre 6), la variabilité spatiale des températures de surface est analysée en fonction des paramètres physiques d'entrée du code MISTRAL. Pour en faciliter l'analyse, trois autres températures moyennes sont définies pour quatre points en surface du profil : les points A, C, E et G, correspondant respectivement à un sillon, au milieu de la face Est, à la crête centrale et au milieu de la face Ouest (voir l'emplacement des thermocouples en figure 5.1). On note $T_A(t)$ la température au point A, et plus généralement $T_{POINT}(t)$ la température au point *POINT*, où *POINT* peut prendre les valeurs A, C, E, ou G.

Les écarts correspondants sont rapportés aux températures moyennes, moyennes supérieures et moyennes inférieures du cas de référence pour chacun de ces quatre points (équations 5.10 à 5.12).

$$\overline{T_{POINT}} = \frac{\sum T_{POINT}(t)}{n_t} \Rightarrow \Delta \overline{T_{POINT}} = (\overline{T_{POINT}} - \overline{T_{POINT}^{ref}}) \quad (5.10)$$

$$\overline{T_{sup,POINT}} = \frac{\sum (T_{POINT}(t) \geq \bar{T})}{n_{t\ sup}} \Rightarrow \Delta \overline{T_{sup,POINT}} = (\overline{T_{sup,POINT}} - \overline{T_{sup,POINT}^{ref}}) \quad (5.11)$$

$$\overline{T_{inf,POINT}} = \frac{\sum (T_{POINT}(t) \leq \bar{T})}{n_{t\ inf}} \Rightarrow \Delta \overline{T_{inf,POINT}} = (\overline{T_{inf,POINT}} - \overline{T_{inf,POINT}^{ref}}) \quad (5.12)$$

5.2 Étude des paramètres numériques

Cette section s'attache à la détermination de la sensibilité du code MISTRAL aux maillages spatial et temporel. Pour cela, des simulations sont menées avec trois pas spatiaux dans chaque direction de l'espace, et avec trois pas de temps de calcul. Ces simulations sont rapportées au cas de référence présenté ci-dessous.

Les différentes simulations vont permettre de déterminer quel pas de temps de calcul et quel maillage nous permettent d'obtenir une bonne convergence en température tout en gardant des temps de calcul totaux raisonnables. On considère qu'une convergence numérique suffisante est atteinte lorsque les écarts à la référence n'excèdent pas 0.1 K, qui est la meilleure précision possible d'un thermocouple de type K.

Pour cette étude des paramètres numériques, on se place dans les mêmes conditions que pour la campagne expérimentale (même géométrie, même matériau, même journée, mêmes conditions météorologiques). Cependant aucune comparaison avec les mesures n'est réalisée pour le moment. La date de calcul des simulations est le 1er octobre, correspondant à la journée de mesures choisie pour la validation. En effet, la date est un paramètre d'entrée du code MISTRAL, permettant le calcul de l'éphéméride.

5.2.1 Cas de référence

Les simulations menées dans la suite de ce chapitre pour l'étude de l'influence des paramètres numériques sont comparées au cas de référence exposé dans ce paragraphe. La géométrie de référence est celle de la maquette présentée dans le chapitre 4 : un échantillon de 53.1 cm de longueur, de 40.3 cm de largeur et de 10 cm d'épaisseur, avec une surface ondulée de forme sinusoïdale. Les ondulations de surface ont une distance crête à crête de 17.7 cm et une amplitude de 5.1 cm ; l'épaisseur de l'objet est de 15.1 cm aux crêtes et de 10 cm aux sillons. Les axes des crêtes (axe y) sont orientés Nord/Sud.

Le maillage géométrique du cas numérique de référence est pris le plus fin possible compte tenu des capacités des ordinateurs et des programmes utilisés. Ainsi, pour le lancer de rayons lors des calculs d'éclaircissements du module DEESSE, INFOVISION limite le nombre de facettes. Il a donc fallu choisir une répartition appropriée des facettes de surface. En conséquence, compte tenu de la complexité de la géométrie de surface, la direction i a été privilégiée. Le maillage est le suivant :

- 193 points dans la longueur (direction x), soit 64 facettes et 65 points par crête ;
- 26 points dans la largeur (direction y) ;
- 29 points dans la profondeur (direction z).

Le pas de temps de calcul est pris égal au pas de temps d'acquisition des données météorologiques, soit une minute.

Les propriétés thermiques du matériau sont prises identiques à celles du plâtre utilisé lors de la campagne expérimentale (chapitre 4). Les paramètres physiques pour ce cas de référence sont les suivantes :

- conductivité $\kappa = 0.58 \text{ W/m}^2$;
- masse volumique $\rho = 1139 \text{ kg/m}^3$;
- capacité calorifique $C_P = 1.072 \text{ kJ/kg.K}$;
- émissivité de surface $\varepsilon = 0.95$.

Les données météorologiques (température de l'air et vitesse du vent) sont identiques aux mesures instantanées enregistrées lors de la campagne expérimentale. Le coefficient de convection est calculé par le code en fonction de la vitesse du vent, conformément aux équations 2.27 et 2.30 (section 2.4.2). La simulation de référence retenue est calculée pour la journée du 1er Octobre 2002.

La sphère d'éclaircissement et le lancer de rayons (module DEESSE, voir section 3.3) ont été calculés au préalable, et ont nécessité 5 jours physiques de temps de calcul (on calcule une sphère d'éclaircissement par minute de temps numérique). Pour les simulations qui suivent, la sphère d'éclaircissement est la même que celle calculée pour le cas de référence, tandis que le lancer de rayon doit être exécuté à chaque changement du maillage.

Le calcul thermique pour le cas de référence a nécessité environ 10 heures de calcul.

5.2.2 Convergence numérique temporelle

On s'attache ici à l'étude de la convergence numérique temporelle du code. L'objectif est de définir la période d'initialisation nécessaire au code, c'est-à-dire de déterminer combien de cycles de 24h sont nécessaires afin que les résultats de température convergent. En effet, il existe en début de simulation une erreur due au champ de température initial. Pour déterminer le temps de convergence nécessaire au code, des calculs sont réalisés sur trois jours simulés, du 29 septembre 2002 à 0h00 au 2 octobre 2002 à 0h00.

Les conditions de simulation sont les suivantes :

- pas de temps de calcul $\Delta t = 30mn$;
- 25 points en i ;
- 26 points en j ;
- 15 points en k ;
- moyennes glissantes centrées sur 30 minutes (correspondant au pas de temps de calcul), pour la température de l'air et la vitesse du vent.

Les calculs se déroulant sur plusieurs cycles de 24h, les données météo du 1er Octobre 2002 sont dupliquées, afin que chaque cycle de 24h soit identique. Les différences de températures à quatre points en surface du profil – les points A, C, E, et G – entre le jour 1 et le jour 2, sont calculées de la manière suivante :

$$\Delta T_{POINT}(t) = T_{POINT \text{ jour } 2} - T_{POINT \text{ jour } 1}$$

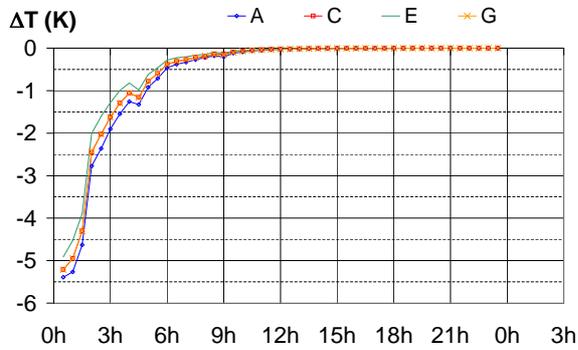


FIG. 5.2 – Convergence numérique temporelle : écarts de température aux points A, C, E, et G entre le jour 1 et le jour 2 de la simulation sur 3 jours de temps simulé

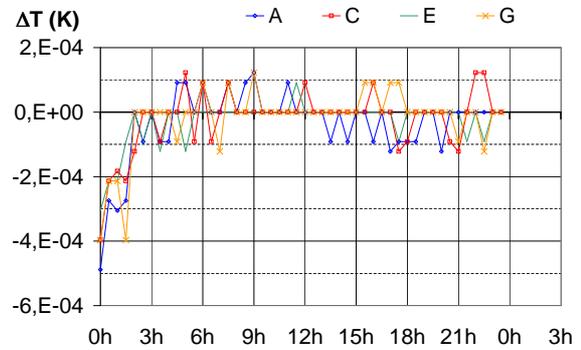


FIG. 5.3 – Convergence numérique temporelle : écarts de température aux points A, C, E, et G entre le jour 2 et le jour 3 de la simulation sur 3 jours de temps simulé

Ces écarts de température sont tracés sur la figure 5.2. À partir de 6h, ils sont inférieurs à l'incertitude globale estimée sur les températures obtenues lors de la campagne expérimentale (0.58 K), et à 13h30 ils sont inférieurs à 0.01 K. La comparaison des températures entre le deuxième et le troisième jour (figure 5.3) montre que les écarts sont très faibles. Pour cette simulation qui s'est déroulée sur 3 jours de temps simulé, une convergence numérique inférieure à 10^{-4} K est atteinte après 24h de simulation.

Des calculs sur deux journées de temps simulé sont donc pleinement suffisants pour obtenir une très bonne convergence numérique des températures en surface. Dans la suite, les calculs vont en conséquence être menés sur deux jours de temps simulé — du 30/09/2002 à 0h au 2/10/2002 à 0h, et les résultats retenus et analysés seront ceux du deuxième jour, soit le 1er Octobre 2002.

5.2.3 Influence du pas de temps de calcul

Cette section est consacrée à l'étude de l'influence du pas de temps de calcul sur la convergence des températures de surface. Trois pas de temps sont testés : 30, 15, et 5 minutes, et sont comparés au cas de référence, pour lequel $\Delta t = 1mn$. Pour ces simulations, en vue de limiter le temps d'exécution du code, le maillage retenu est constitué de peu de nœuds de calcul : $i = 25$, $j = 26$, $k = 15$.

Les écarts moyens spatiaux de la température de surface $\overline{T_{profil}(t)}$ sont tracés sur la figure 5.4. Plus le pas de temps de calcul diminue, plus les écarts moyens avec le cas de référence diminuent. C'est donc le pas de temps de calcul le plus faible qui donne la meilleure convergence en température. Néanmoins, le calcul de la moyenne pourrait engendrer une compensation des écarts. C'est pourquoi les écarts de températures en quatre points du profil sont étudiés (figures 5.5 à 5.8).

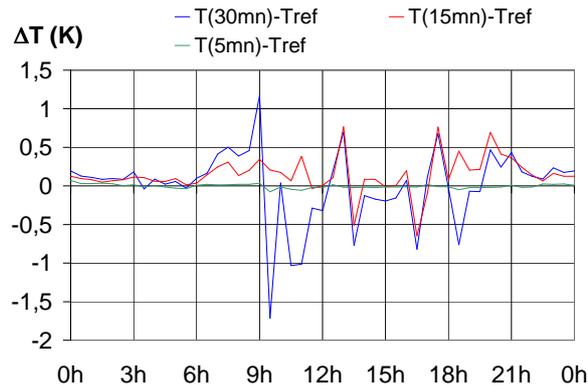


FIG. 5.4 – Influence du pas de temps de calcul : écarts moyens spatiaux entre la température de surface de référence et les températures de surface pour des pas de temps de calcul de 5, 15, et 30 mn

Ces écarts de température sont tracés pour les points A, C, E, et G du profil de surface. Ils confirment que la diminution du pas de temps de calcul réduit les écarts de température avec le cas de référence. Par ailleurs, ces écarts se réduisent de peu entre les pas de temps de calcul de 30 minutes et de 15 minutes, tandis que le gain est beaucoup plus important lorsqu'on passe de 15mn à 5mn : quel que soit le point, l'écart moyen sur les 24h de simulation diminue d'un facteur 10, passant d'environ 10^{-2} K pour un pas de temps de calcul de 15mn à environ 10^{-3} K pour un pas de temps de calcul de 5mn.

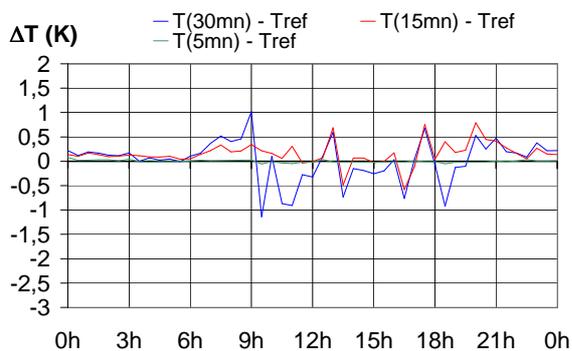


FIG. 5.5 – Pas de temps de calcul : écarts moyens au point A entre les températures de référence et les températures simulées au 1er Octobre 2002, pour des pas de temps de calcul de 5, 15, et 30 minutes rapportées au cas de référence (pas de temps de 1mn)

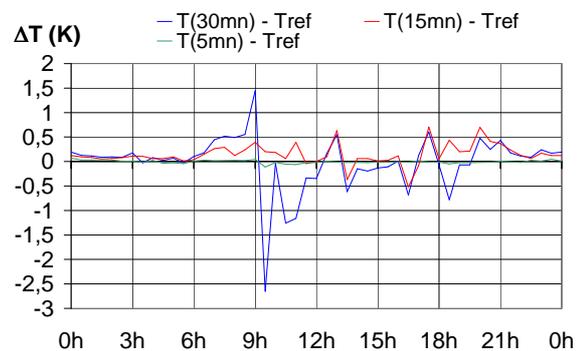


FIG. 5.6 – Pas de temps de calcul : écarts moyens au point C entre les températures de référence et les températures simulées au 1er Octobre 2002, pour des pas de temps de calcul de 5, 15, et 30 minutes rapportées au cas de référence (pas de temps de 1mn)

Remarquons également que, pour un pas de temps de calcul de 30mn, c'est aux points C et E, situés respectivement sur la face Est et au sommet de la crête, que les écarts maximaux sont trouvés : ils sont supérieurs à 2.5 K à 9h30. Pour les points A et G, les écarts à la référence n'excèdent pas 1.1 K. Cela signifie que l'importance de l'erreur en température due au pas de temps de calcul dépend de la position sur la surface de l'échantillon. Afin de s'affranchir de cette dépendance, il faut choisir le pas de temps de calcul permettant d'obtenir des écarts suffisamment faibles, c'est-à-dire inférieurs au critère numérique de convergence (0.1 K). Un pas de temps de 1mn (cas de référence) est très pénalisant en terme de temps de calcul. Un pas de temps de calcul de 5mn confère des écarts en surface de l'ordre de 10^{-3} K. Seuls ces deux pas de temps de calcul répondent au critère de convergence. C'est donc le pas de temps de calcul de 5mn qui est retenu pour la comparaison des simulations MISTRAL aux mesures, car il constitue un bon compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul.

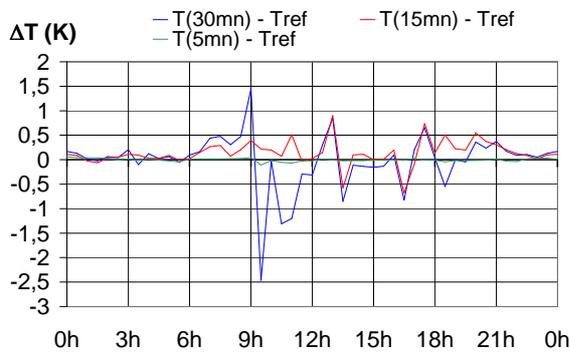


FIG. 5.7 – Pas de temps de calcul : écarts moyens au point E entre les températures de référence et les températures simulées au 1er Octobre 2002, pour des cadences de calcul de 5, 15, et 30 minutes rapportées au cas de référence (cadence de 1mn)

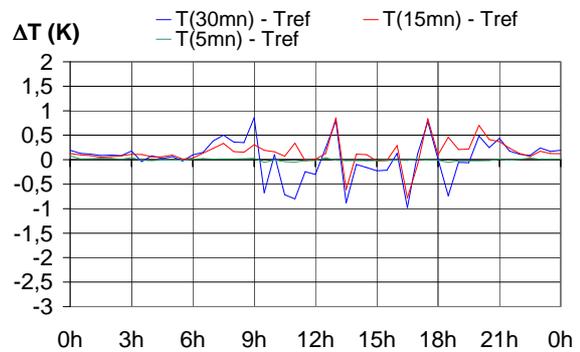


FIG. 5.8 – Pas de temps de calcul : écarts moyens au point G entre les températures de référence et les températures simulées au 1er Octobre 2002, pour des cadences de calcul de 5, 15, et 30 minutes rapportées au cas de référence (cadence de 1mn)

5.2.4 Influence du maillage

Il s'agit ici de quantifier l'influence du maillage, dans les trois directions de l'espace, sur les températures obtenues à la surface. Pour cela, cette étude se décompose en trois étapes, correspondant aux trois directions spatiales dans lesquelles le nombre de points de calcul varie.

En premier lieu, l'influence du nombre de points de calcul dans la direction longitudinale (direction x) est étudiée en quatre cas : 8, 16, 32 et 64 points par période. Ensuite, l'influence du nombre de points dans la direction transversale (direction y) est explorée, avec trois calculs : 26, 51 et 101 points. Enfin, le maillage dans la profondeur (direction z) est étudié avec deux répartitions, l'une linéaire et l'autre selon une suite géométrique. Pour ces deux cas, des calculs sont menés avec 8, 15, et 29 points de calcul. Pour ces simulations, en vue de limiter le temps d'exécution du code, le pas de temps de calcul est de 15 minutes.

Remarque préliminaire : critère de Fourier

Le critère de Fourier est un critère de convergence numérique (équation 3.13). L'utilisation du code MISTRAL montre qu'il est important de ne pas avoir d'écarts trop importants entre les critères de Fourier dans les trois directions. En effet, nous avons réalisé des tests qui ont montré qu'au-delà d'un facteur d'environ 10 entre deux critères de Fourier les calculs divergent (voir tableau 5.1). Cette divergence pourrait être due à la linéarisation des pertes radiatives. Par

ailleurs, la résolution numérique en schéma implicite est inconditionnellement stable, mais elle peut aboutir à des oscillations pour des critères de Fourier élevés.

Dans la suite des tests, le nombre de nœuds de calcul dans la direction y est pris égal à 25 au minimum, afin de s'affranchir de tout problème de divergence des calculs.

$n_i = 25$ $Fo_i = 13.267$				
$n_k = 15$ $Fo_k = 7.956$				
n_j	Fo_j	Fo_i/Fo_j	Fo_k/Fo_j	résultat calcul
19	0.802	16.542	9.920	×
20	0.893	14.857	8.909	×
21	0.990	13.401	8.036	OK
22	1.091	12.160	7.292	OK
25	1.425	9.310	5.583	OK
30	2.081	6.375	3.823	OK
38	3.388	3.916	2.348	OK

TAB. 5.1 – Évolution du critère de Fourier selon j pour un nombre de nœuds de calcul variable dans la direction j , pour un pas de temps de calcul de 15 minutes

5.2.4.1 Maillage en i

L'étude de l'influence du maillage sur les températures de surface débute par la direction longitudinale x . Trois maillages sont testés : 8, 16, et 32 facettes par crête, soit pour trois crêtes 25, 49 (figure 5.9), et 97 points au total sur la longueur de l'échantillon. Ils sont ensuite comparés au cas de référence, qui comprend 193 nœuds de calcul dans cette direction.

La figure 5.10 montre les écarts moyens ($(\overline{T} - \overline{T^{ref}})$, voir équation 5.3), sur tout le profil, durant la journée du 1er Octobre 2002. Les écarts sont d'allure très similaire pour $i = 25$ et $i = 49$, qui varient de 0.9 K à 18h à -1.8 K autour de 9h. Pour $i = 97$, ces écarts sont considérablement réduits : ils n'excèdent jamais 0.04K. On obtient donc une très bonne convergence en températures de surface pour le cas où $i = 97$, largement inférieure au critère de convergence fixé (0.1 K). C'est donc la valeur à retenir pour le maillage dans la direction x .



FIG. 5.9 – Maillage en surface dans la direction x : 49 nœuds de calcul

5.2.4.2 Maillage en j

Dans cette section, l'influence du maillage dans la direction orthogonale aux axes des dunes, c'est-à-dire selon y , est testée. Le nombre de points en i est fixé à 8 par période, donc 24 facettes, et à 15 points en k . Le nombre de points en j varie : 26, 51 et 101 points. Conformément à la remarque précédente, le nombre de points en j est fixé au minimum à 25. Le cas de référence (section 5.2.1) utilise seulement 25 nœuds en j . En effet il a fallu limiter le nombre de facettes surfaciques, et la direction privilégiée a été la longueur de l'échantillon (direction i). Dans cette section, le nombre de nœuds en i est beaucoup moins important, si bien qu'il nous est alors

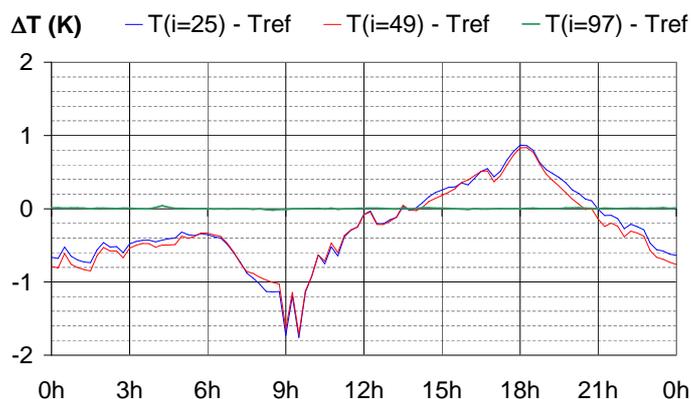


FIG. 5.10 – Maillage en i : écarts moyens sur tout le profil entre la température de référence et les températures calculées avec 24, 48 et 96 points dans la direction x et un pas de temps de calcul de 15mn – simulations le 1er Octobre 2002

possible d'augmenter les nœuds en j . Pour cela, les écarts de température dans cette section ne sont pas rapportés au cas de référence mais au cas où le nombre de points en j est maximal, soit 101. Ce cas constitue, pour cette section uniquement, le cas de référence. Il est noté T^{101} .

Les écarts moyens ($\bar{T} - \overline{T^{101}}$) pour les cas $j = 26$ et $j = 51$ (voir équation 5.3), sont tracés sur la figure 5.11. Quel que soit le nombre de nœuds de calcul dans la direction j , les écarts constatés sont faibles : 0.08 K au maximum, donc inférieurs au critère numérique de convergence. Ce résultat n'est pas étonnant dans la mesure où, les faces latérales de l'échantillon étant isolées, les effets thermiques de bord sont très limités. On peut alors considérer que les transferts de chaleur s'effectuent en deux dimensions dans un plan (x, z) .

On retient en conséquence qu'un calcul avec $j_{max} = 26$ nœuds dans la direction y est suffisant pour assurer une bonne précision des températures simulées.

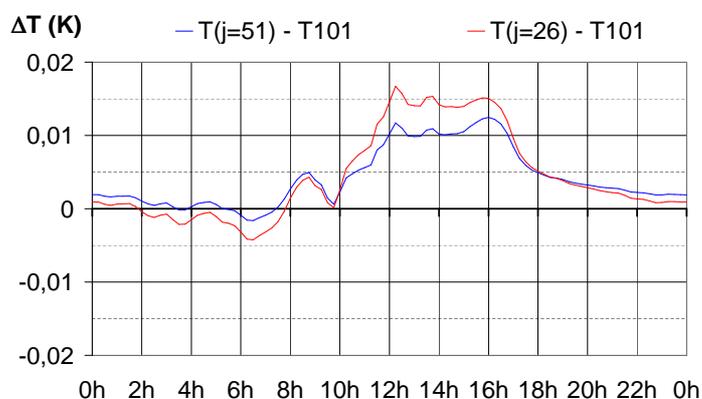


FIG. 5.11 – Maillage en j : écarts moyens spatiaux entre la température calculée avec 101 points et les températures calculées avec 26 et 51 points – simulation avec un pas de temps de calcul de 15mn le 1er Octobre 2002

5.2.4.3 Maillage en k

Afin de quantifier l'influence du nombre de nœuds de calcul dans la direction z , deux répartitions de ces nœuds sont testées : une répartition linéaire, et une répartition selon une suite géométrique (voir section 3.6.1).

Répartition linéaire Pour la répartition linéaire des nœuds en z , deux cas sont étudiés : 8, et 15 points; dans les deux autres directions, le maillage fixé à 25 nœuds en i et 26 en j . Les comparaisons s'effectuent avec le calcul de référence, pour lequel la répartition est linéaire et $k = 29$.

La figure 5.12 montre les écarts moyens à la température de référence, pendant la journée du 01/10/2002. Pour un nombre de points faible ($k = 8$) les écarts maximaux atteignent 0.12 K, tandis qu'ils atteignent seulement 0.04 K lorsque $k = 15$. C'est donc cette dernière valeur qui doit être retenue, puisqu'elle seule est inférieure au critère numérique de convergence.

Répartition géométrique Pour la répartition des points de calcul en k selon une suite géométrique, trois cas sont testés et comparés au cas de référence ($k = 29$, répartition linéaire). Le nombre de points dans la direction z et l'épaisseur de la première maille sont :

- $k = 12$, 1mm ;
- $k = 15$, 0.5mm ;
- $k = 29$, 0.5mm.

Lorsque $k = 12$, les écarts n'excèdent pas 0.04K (figure 5.13); pour $k = 15$ ceux-ci sont très proches de la référence (au maximum 5.10^{-3} K de différence) et ils sont quasiment nuls (de l'ordre de 10^{-5} K) pour $k = 29$. Quel que soit le maillage choisi, le critère de convergence est donc respecté; le choix se porte par conséquent vers le nombre de nœuds de calcul minimal, soit $k = 12$.

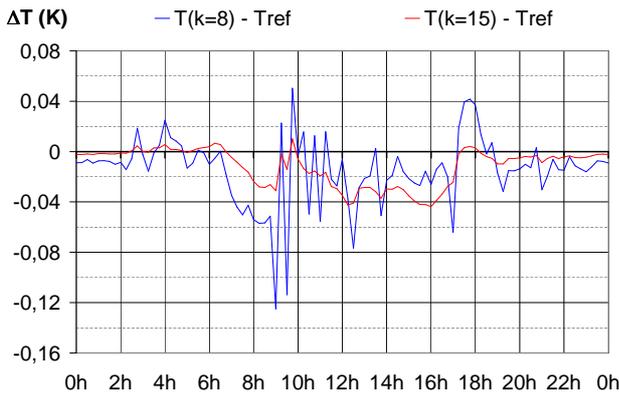


FIG. 5.12 – Maillage en k : écarts de température moyens sur tout le profil, entre la température de référence (calcul avec $k=29$) et les températures simulées avec 8 et 15 points répartis linéairement en k – pas de temps de calcul de 15mn, simulation le 1er Octobre 2002

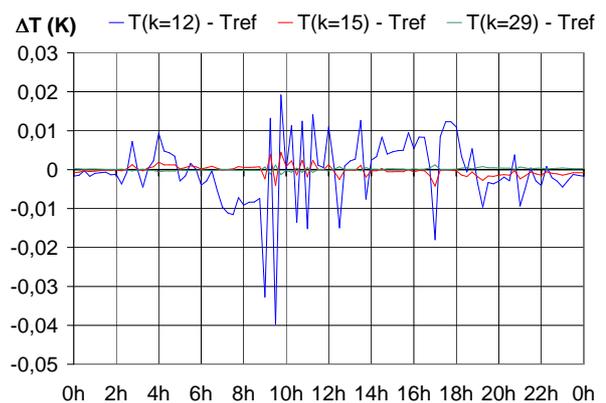


FIG. 5.13 – Maillage en k : écarts de température moyens sur tout le profil, entre la température de référence (calcul avec $k=29$) et les températures simulées avec 12 et 15 points répartis selon une suite géométrique en k – pas de temps de calcul de 15mn, simulation le 1er Octobre 2002

Les résultats pour différents nombres de nœuds de calcul et deux répartitions de ces nœuds dans la direction z nous ont montré qu’une discrétisation plus fine au voisinage de la surface diminue le nombre de mailles de calcul nécessaire à la convergence numérique. Cette diminution reste néanmoins assez faible. C’est pourquoi, pour la simplicité de la modélisation, il est choisi de retenir pour la direction z 15 nœuds de calcul répartis linéairement.

5.2.5 Choix des paramètres numériques

La section 5.2.2 a mis en évidence qu’un calcul sur deux cycles de 24h est suffisant pour obtenir une bonne convergence numérique temporelle en retenant les résultats de la deuxième journée de temps simulé.

La section 5.2.3 a ensuite révélé que seuls les pas de temps de 5mn et 1mn apportent une précision suffisante sur les résultats en température. Un pas de temps de calcul est donc le meilleur compromis entre précision et temps d’exécution du code. Par ailleurs, l’étude de l’influence du maillage dans les trois directions sur les températures de surface (section 5.2.4) a permis de montrer que c’est le nombre de nœuds de calcul dans la direction i qui influence le plus les températures de surface. De plus, le nombre de points dans la direction j a peu d’influence sur les températures en surface, ceci étant dû aux conditions aux limites adiabatiques imposées sur les faces latérales de l’échantillon-test. L’étude numérique menée sur le nombre de nœuds dans la direction k , quant à elle, a montré qu’à partir de 15 nœuds la convergence numérique est suffisante, quelle que soit la répartition des mailles (linéaire ou selon une suite géométrique).

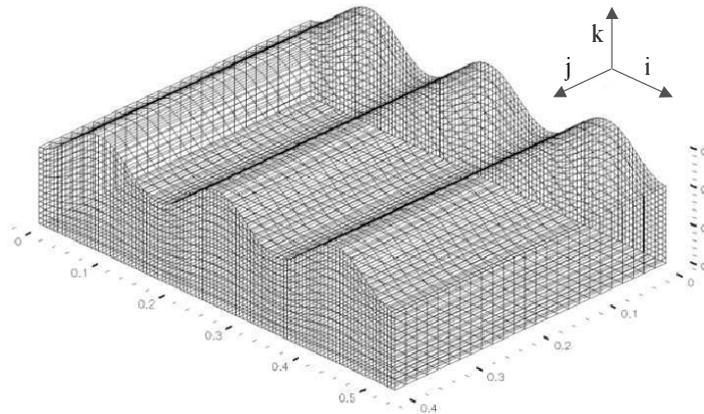


FIG. 5.14 – Maillage retenu pour les comparaisons entre MISTRAL et les résultats expérimentaux : 97 points en i , 26 points en j et 15 points en k

L’étude des paramètres numériques a en outre montré que le pas de temps de calcul a plus d’influence sur les températures de surface que le maillage dans le sens longitudinal. Pour cette raison, le pas de temps choisi est de 5 minutes, ce choix étant un bon compromis entre précision en température et temps de calcul.

Au vu de toutes ces remarques, les paramètres numériques retenus pour procéder à la comparaison entre simulations et mesures sont les suivants :

- calculs sur 2 jours de temps simulé, avec prise en considération du second jour uniquement, pour la convergence numérique temporelle ;
- pas de temps de calcul de 5 minutes ;

- maillage retenu :
 - sens longitudinal i : 97 points ;
 - sens transversal j : 26 points ;
 - profondeur k : 15 points, en répartition linéaire.

Le maillage retenu est illustré sur la figure 5.14. Une simulation en vue de la comparaison avec l'expérience peut maintenant être réalisée, avec les paramètres numériques fixés dans ce paragraphe.

5.3 Comparaisons aux mesures

Les paramètres numériques optimaux sont à présent déterminés. Il s'agit maintenant de comparer les résultats simulés par MISTRAL aux résultats expérimentaux exposés au chapitre 4. Pour cela, les conditions de simulation sont d'abord résumées. Ensuite, les écarts entre les températures mesurées et les températures simulées sont analysés.

5.3.1 Initialisation des données numériques de simulation

Pour la simulation MISTRAL, la géométrie de l'échantillon est celle de la maquette du dispositif expérimental. Les dimensions et l'orientation de l'échantillon sont celles de la figure 5.1. Les faces latérales sont adiabatiques, et les propriétés thermiques sont celles du plâtre constituant la maquette, soit :

- conductivité : 0.58 W/m^2 ;
- capacité calorifique : 1.072 kJ/kg.K ;
- masse volumique : 1139 kg/m^3 .

Concernant l'émissivité de surface, celle-ci a été mesurée pour un échantillon de plâtre recouvert de la même peinture noire que la maquette. La courbe de cette mesure est rappelée sur la figure 5.15. Dans la simulation MISTRAL, l'utilisation des données spectrales directionnelles aboutissant à des résultats erronés en température, l'émissivité moyenne sur la bande de mesure ($0.2\text{-}18\mu\text{m}$) du plâtre peint est utilisée, soit $\varepsilon = 0.913$.

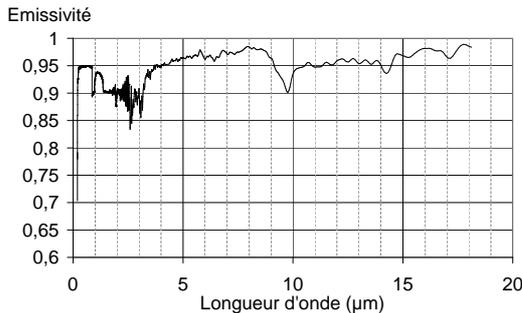


FIG. 5.15 – Émissivité spectrale de la peinture noire mesurée en incidence normale sur le plâtre de la maquette, entre 0.2 et $18 \mu\text{m}$

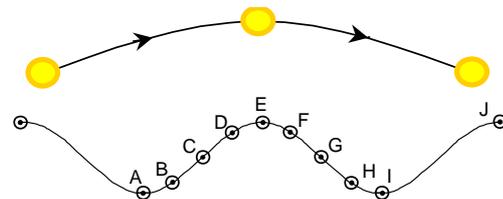


FIG. 5.16 – Emplacement des thermocouples à la surface de la maquette

Conformément aux choix de la section précédente, le calcul est réalisé avec un pas de temps de calcul de 5 minutes, du 30 Septembre 2002 à 0h00 au 2 Octobre 2002 à 0h00, soit sur deux journées de temps simulé. Ce calcul se déroule sur deux jours pour satisfaire au critère de

convergence numérique temporelle. Seuls les résultats de la deuxième journée sont retenus. Les données météorologiques d'entrée (température d'air et vitesse du vent) sont égales aux mesures du 1er Octobre 2002 rééchantillonnées (section 5.1.1) puis dupliquées, afin que la simulation se déroule avec deux cycles de 24h identiques.

La sphère d'éclairement utilisée est celle calculée précédemment dans la section 5.2.1, avec un pas de temps de calcul d'une minute, à l'aide du code MODTRAN. La résolution numérique s'effectue en 3D, en schéma implicite.

5.3.2 Comparaisons mesures/simulations

Les mesures considérées sont celles réalisées dans le cadre de la campagne expérimentale (chapitre 4), durant la journée du 1er Octobre 2002. C'est en effet pour cette journée que les conditions météorologiques ont été les plus stables et se rapprochent du cas idéal de la simulation numérique, pour laquelle le ciel ne comporte à aucun instant des perturbations nuageuses.

Ces mesures sont comparées aux températures issues de la simulation dont les conditions sont résumées ci-dessus (section 5.3.1).

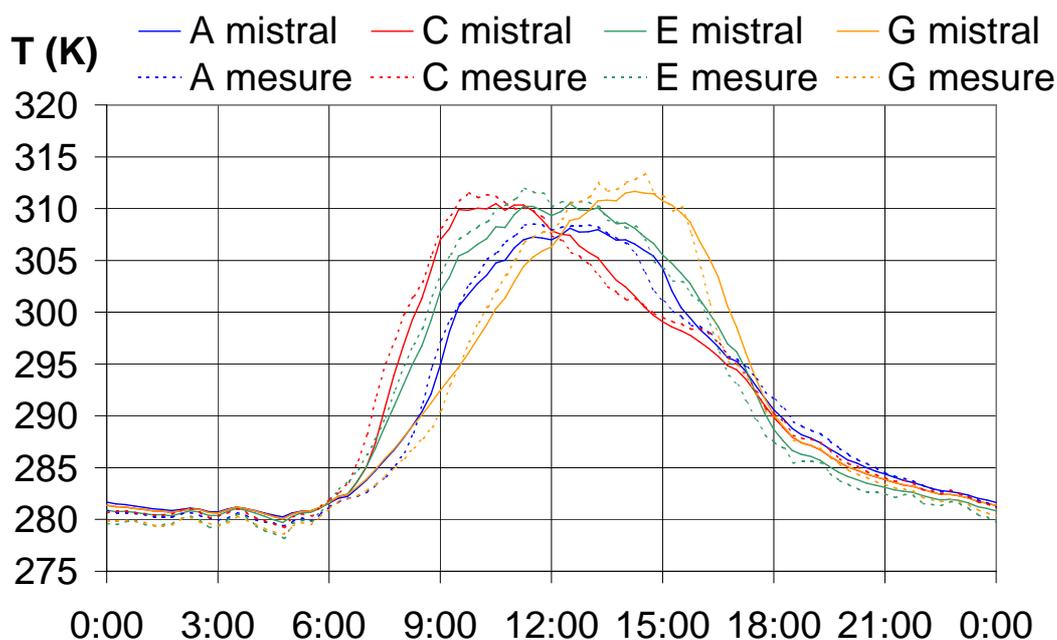


FIG. 5.17 – Températures en quatre points de la surface de la maquette : comparaison entre la simulation MISTRAL et les mesures

La figure 5.17 montre les températures en surface de la maquette en quatre points : les points A, C, E, et G (voir figure 5.16). Globalement, pendant la période diurne, les températures mesurées sont légèrement supérieures aux températures simulées. De plus, les températures mesurées commencent à décroître plus tôt que les températures simulées. Néanmoins, le comportement constaté lors de la campagne de mesure est bien reproduit sur les simulations MISTRAL. En effet, on observe bien le déplacement des températures maximales de la face Est (point C) vers la face Ouest (point G) au cours de la journée. De plus, entre 18h et 6h, la température au sommet de la crête (point E) est plus faible que sur le reste du profil ; le phénomène de fuite thermique à

ce point est donc bien reproduit par le code, même si celui-ci fournit des températures légèrement plus élevées que les températures mesurées pendant la nuit.

Plusieurs raisons peuvent être avancées afin de justifier les écarts globaux entre les températures simulées et mesurées. En effet, c'est une émissivité moyenne qui a été utilisée, et non une émissivité spectrale directionnelle. Une autre raison à ces écarts globaux pourrait être trouvée dans la différence entre le rayonnement solaire global calculé par MODTRAN et le rayonnement réel. Le rayonnement mesuré lors de la campagne expérimentale est comparé au rayonnement calculé par MODTRAN pour un sol horizontal dans les mêmes conditions sur la figure 5.18.

Le rayonnement solaire global calculé par MODTRAN est en moyenne inférieur de 7% à celui mesuré, ce qui peut expliquer des températures simulées plus basses que celles mesurées. De plus, il existe un décalage temporel du lever du soleil d'environ 20 minutes entre le flux MODTRAN et le flux mesuré : dans le cas simulé l'aube a lieu plus tard.

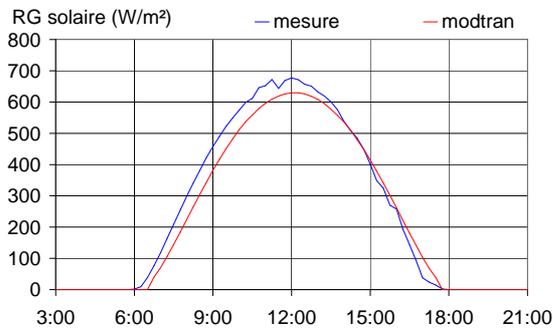


FIG. 5.18 – Rayonnement solaire global sur un sol plat horizontal : comparaison entre les mesures et les résultats MODTRAN — journée du 1er octobre 2002

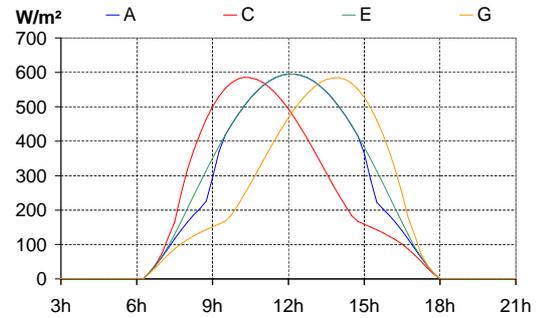


FIG. 5.19 – Flux solaire global reçu aux points A, C, E, et G du profil : calculs MODTRAN — journée du 1er octobre 2002

Les figures 5.20 à 5.23 montrent les températures simulées et mesurées, ainsi que l'écart $T(mistral) - T(mesure)$ entre ces deux températures, pour les points A, C, E, et G du profil de surface. Les écarts au point A (figure 5.20) présentent des valeurs extrêmes autour de 9h et de 15h (respectivement -2.6 K et 3.5 K). Le point A, situé au creux d'un sillon, est ombré par les faces environnantes en début et en fin de journée. Les écarts élevés autour de ces heures correspondent au changement d'exposition au soleil. En effet, autour de 9h le point A passe de l'ombre au soleil, et vers 15h il passe du soleil à l'ombre. Ces passages sont bien visibles sur la figure 5.19 : la courbe du flux solaire global se rétrécit autour de 8h30 et 15h30. Un décalage temporel des courbes de flux solaire entre les mesures et les simulations signifie qu'on considère des vecteurs solaires différents. Par conséquent, ces passages entre ombre et soleil interviennent à des heures différentes, ce qui explique les écarts importants dans la zone temporelle du changement d'exposition.

Au point C, les écarts de température simulation/mesure sont tout à fait acceptables en moyenne. Néanmoins, ce point présente un écart de température important autour de 7h30 : -4.4 K, et un autre pic, moins important, autour de 14h. L'heure d'apparition du second pic peut être rapprochée de la courbe 5.19 : à cet instant, la courbe de flux solaire reçu présente un point d'inflexion, dû au fait que le rayonnement solaire direct n'atteint plus le point C. Sur cette même courbe de flux reçus, on peut voir pour le point C un changement de pente autour

de 7h30. Le fort écart de température enregistré à ce moment peut être expliqué ici encore par le décalage temporel des courbes de flux solaire : le passage de l'ombre au soleil n'a pas lieu à la même heure pour la simulation et les mesures.

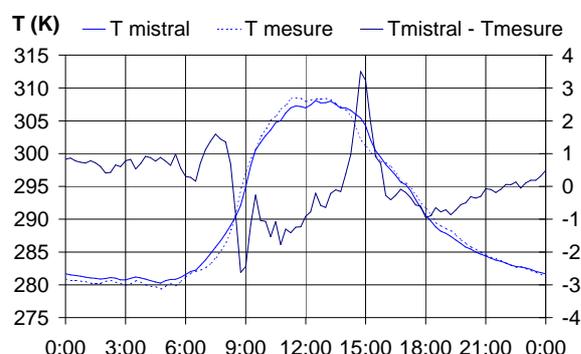


FIG. 5.20 – Températures mesurées et simulées avec MISTRAL et écarts au point A (sillon)– journée du 1er octobre 2002

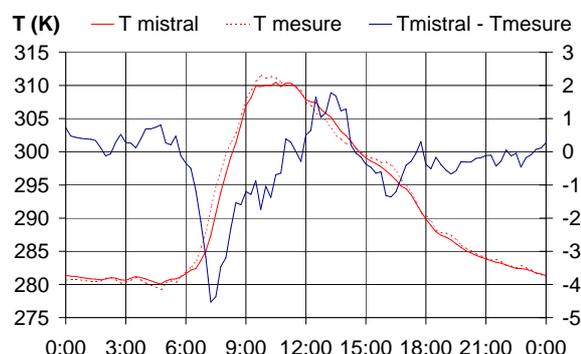


FIG. 5.21 – Températures mesurées et simulées avec MISTRAL et écarts au point C (face Est)– journée du 1er octobre 2002

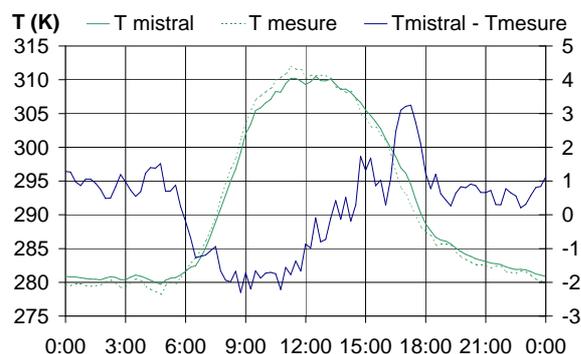


FIG. 5.22 – Températures mesurées et simulées avec MISTRAL et écarts au point E (crête)– journée du 1er octobre 2002

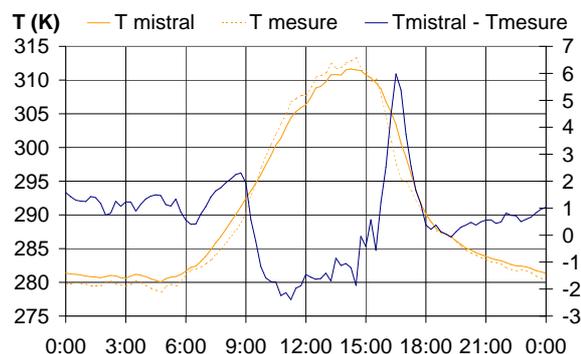


FIG. 5.23 – Températures mesurées et simulées avec MISTRAL et écarts au point G (face Ouest)– journée du 1er octobre 2002

De manière symétrique au point C, le point G, situé sur la face Ouest, présente un écart simulation/mesure d'environ 2 K peu avant 9h. Or vers 9h30 le flux solaire reçu en ce point présente une forte augmentation (figure 5.19), correspondant au moment où le flux solaire direct commence à atteindre le point G. Cette augmentation de flux intervient plus tard dans la simulation MISTRAL que dans le cas réel, ce qui explique de forts écarts de température simulation/mesures autour de 9h. Les écarts au point G présentent un autre pic autour de 16h30 (environ 6 K). Le flux solaire simulé reçu vers 16h30 en ce point comporte une forte pente : la décroissance du flux est très rapide. Cette chute rapide du flux intervenant plus tôt dans la réalité que dans la simulation, il est normal d'obtenir des écarts élevés à cette période de la journée.

Les écarts au point E sont assez uniformes au cours de la journée. Ils présentent néanmoins un maximum de 3 K autour de 17h. Ce maximum pourrait être justifié de la même manière que

les écarts autour de 17h au point G. Mais la décroissance du flux solaire reçu au point E à ce moment étant moins rapide qu'au point G, les écarts engendrés sont moins importants.

Ces résultats démontrent donc bien l'influence de l'erreur d'estimation du flux solaire reçu sur les températures de surface. Par ailleurs, un autre facteur pouvant augmenter les écarts de température entre la simulation MISTRAL et les mesures est que le profil numérique modélisé est une sinusoïde, alors que le profil réel de la maquette n'en est pas précisément une. De plus, la tôle ondulée ayant servi à la réalisation de la maquette n'est pas parfaitement lisse, et présente des défauts de surface. Ces défauts n'engendrent pas d'écarts supérieurs à 1mm entre le profil réel et le profil simulé, mais peuvent néanmoins contribuer à augmenter les écarts mesures/simulations.

La table 5.2 regroupe les valeurs des écarts moyens, pour les 9 points de surface représentés sur la figure 5.16. Ces écarts moyens sont des moyennes temporelles, pour chaque point, des écarts entre les températures simulées et les températures mesurées.

	$\overline{\Delta T_A}$	$\overline{\Delta T_B}$	$\overline{\Delta T_C}$	$\overline{\Delta T_D}$	$\overline{\Delta T_E}$	$\overline{\Delta T_F}$	$\overline{\Delta T_G}$	$\overline{\Delta T_H}$	$\overline{\Delta T_I}$
Écart moyen (K)	0.084	-0.165	-0.310	0.033	0.248	0.539	0.579	0.359	0.002

TAB. 5.2 – Écarts moyens de température sur les points A à I en surface de la maquette, entre les températures simulées (MISTRAL) et les températures mesurées lors de la campagne expérimentale – 1er octobre 2002

Afin de vérifier que le décalage temporel des courbes de flux est une source d'erreur en température pour les simulations MISTRAL, celles-ci sont avancées de 15mn puis comparées de nouveau aux mesures. Ce décalage temporel améliore nettement la correspondance en température entre les simulations et les mesures : les écarts (figures 5.24 et 5.25) sont sensiblement réduits. Le décalage temporel du flux solaire est donc bien un facteur d'erreur prépondérant. Ce décalage correspond approximativement à la non-prise en compte de la longitude. Le calcul d'éphéméride dans MISTRAL est donc à vérifier.

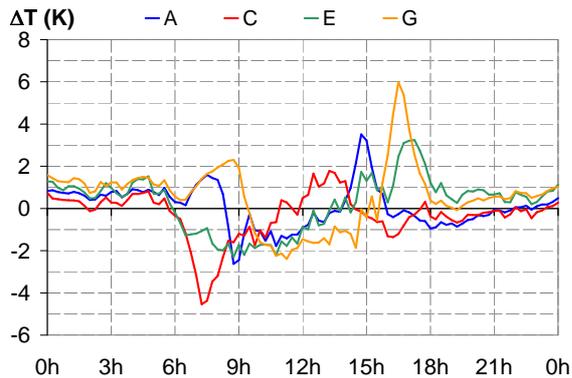


FIG. 5.24 – Écarts de températures entre les simulations MISTRAL et les mesures – journée du 1er octobre 2002

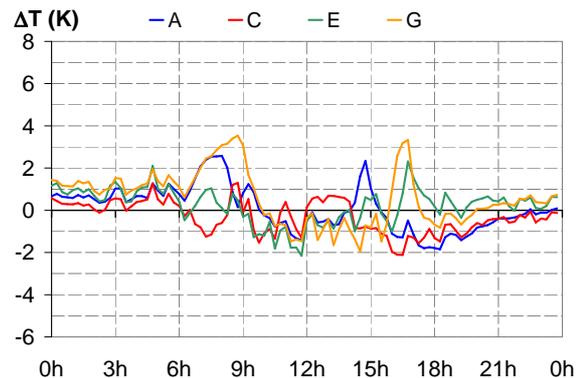


FIG. 5.25 – Écarts de températures entre les simulations MISTRAL et les mesures, après avancement des températures simulées de 15mn – journée du 1er octobre 2002

Les valeurs des écarts moyens, pour les 9 points de surface représentés sur la figure 5.16, sont regroupés sur la table 5.3. Quel que soit le point du profil, l'écart de température moyen sur 24h

est inférieur à l'incertitude globale de mesure $\delta T_{global} = 0.58$ K, établie en section 4.4.1.

	$\overline{\Delta T_A}$	$\overline{\Delta T_B}$	$\overline{\Delta T_C}$	$\overline{\Delta T_D}$	$\overline{\Delta T_E}$	$\overline{\Delta T_F}$	$\overline{\Delta T_G}$	$\overline{\Delta T_H}$	$\overline{\Delta T_I}$
Écart moyen (K)	0.070	-0.168	-0.317	0.024	0.238	0.532	0.574	0.354	-0.003

TAB. 5.3 – Écarts moyens de température sur les points A à I en surface de la maquette, entre les températures simulées (MISTRAL) et les températures mesurées lors de la campagne expérimentale, après avancement de 15mn des températures simulées – 1er octobre 2002

5.4 Synthèse de la validation de MISTRAL

Dans ce chapitre, une étude des paramètres de maillage (spatial et temporel) du code MISTRAL nous a permis de déterminer les paramètres optimaux pour une comparaison des températures simulées avec les températures mesurées. Cette confrontation entre les simulations et les mesures a ensuite été réalisée. Elle a montré que MISTRAL reproduit bien les phénomènes observés lors de la campagne expérimentale : déplacement du maximum de température selon la trajectoire du soleil au cours de la journée, fuite thermique aux sommets des crêtes pendant la nuit.

La comparaison des simulations avec les mesures a également révélé que les températures simulées sont globalement moins élevées que les mesures ; d'autre part, les températures simulées commencent à augmenter plus tard le matin, et entament leur décroissance également plus tard que les températures mesurées. Une comparaison des flux solaires reçus en surface a permis d'identifier deux raisons à ces faits. Premièrement, les flux calculés par MODTRAN sont inférieurs d'environ 7% aux flux mesurés. Deuxièmement, il existe un décalage temporel, au lever du soleil, du flux simulé : le soleil se lève plus tard, et par conséquent les températures sont moins élevées. Ce point est probablement dû à un mauvais calcul de l'éphéméride. Ceci constitue une source d'amélioration potentielle du code. Un décalage amont des températures simulées a bien confirmé l'influence de ce décalage temporel des flux : les écarts simulations/mesures sont réduits en moyenne de 5%.

Malgré les erreurs en température engendrées par cette différence de flux solaires, et après décalage temporel manuel des températures simulées, les écarts moyens temporels, pour tous les points du profil, sont inférieurs à l'incertitude de mesure déterminée lors de la campagne expérimentale – 0.58 K, voir section 4.4.1. De plus, les variations spatiales de la température de surface sont bien reproduites par le code MISTRAL. Dans ces conditions, nous considérons que le code MISTRAL est validé et constitue maintenant notre code de référence.

Chapitre 6

Elaboration de modèles simplifiés de température de surface

L'état de l'art (chapitre 2) a révélé qu'il existe une grande variabilité, spatiale et temporelle, des températures de surface, et que celle-ci s'accroît lorsque les surfaces ne sont pas planes mais présentent des reliefs. Les simulateurs d'images infrarouges ont besoin de résultats précis et réalistes des températures des surfaces de la scène à modéliser, en vue de créer des images en luminance précises et réalistes. En effet, une erreur sur la carte de température peut engendrer une erreur sur la carte des luminances, plus ou moins importante selon la bande spectrale d'intérêt. La variabilité spatiale de la géométrie des scènes est une source importante de variabilité de la température. Or en règle générale, cette variabilité n'est pas prise en compte. Pour des images à résolution moyenne ou basse, des températures uniformes peuvent être satisfaisantes ou suffisantes, mais l'augmentation de la résolution des scènes simulées passe par la modélisation de la variabilité des températures de surface. Au lieu d'utiliser pour cela des codes 3D de mise en œuvre complexe et de temps de calcul souvent longs, notre objectif est de disposer, en fin de compte, de modèles simples de température rendant compte de la variabilité de la température de surface.

La compréhension de cette variabilité est à l'heure actuelle loin d'être totale, et par conséquent très peu de modélisations existent, comme cela a été mis en évidence dans le chapitre 2. La campagne expérimentale que nous avons réalisée, et qui est exposée dans le chapitre 4 de ce travail, nous a permis d'améliorer la connaissance et la compréhension de l'évolution des températures en surface d'une géométrie complexe. Afin de continuer dans ce sens, nous essayons dans ce chapitre de modéliser de manière simple la température de surface pour un relief complexe afin de rendre compte de la variabilité spatiale en température associée à la variabilité géométrique de la surface.

En vue d'améliorer la compréhension des phénomènes à l'origine de cette variabilité, la première étape de notre démarche consiste à voir comment évolue la température de surface en fonction des paramètres thermiques et optiques et des conditions météorologiques. Après avoir appréhendé ces questions, la seconde étape consiste à développer des modèles simples, en prenant comme entrées les phénomènes dominant les variations de température.

Ainsi, une étude paramétrique des variables d'entrée du code MISTRAL — qui a été validé dans le chapitre précédent est d'abord réalisée. Ensuite, cinq approches de modélisation sont proposées, fondées notamment sur le postulat que la température en surface d'un relief peut être décrite comme la composition de seulement deux températures d'un sol plat horizontal, l'un situé à l'ombre et l'autre situé au soleil. Enfin, un bilan des modélisations proposées est réalisé.

6.1 Identification des phénomènes prépondérants

Cette section se consacre à l'identification des paramètres physiques influant le plus sur la variabilité spatiale de la température de surface pour des surfaces non planes. Afin de déterminer les données d'entrée pour les modèles simplifiés de température de surface, le code MISTRAL, qui a été validé dans le chapitre précédent, est utilisé comme code de référence. Une étude paramétrique de ses données d'entrée est réalisée : des variations sont appliquées aux données d'entrée (émissivité, conductivité, capacité calorifique, masse volumique, température d'air, vitesse du vent et coefficient de convection), puis les effets de ces variations sur les températures de surface sont analysées.

Le chapitre précédent nous a permis de valider le code MISTRAL, ce code constitue par conséquent notre référence ; en faisant varier ses paramètres d'entrée, l'influence de chacun d'eux sur la température de surface peut être déterminée. Ensuite, un classement est établi par ordre d'importance et les plus influents pourront être retenus comme paramètres d'entrée des modèles simplifiés de température.

Dans la suite, l'analyse porte d'une part sur les propriétés physiques du matériau, et d'autre part sur les données météorologiques d'entrée. La diffusivité et l'effusivité sont d'abord étudiées. Les effets de variations de l'émissivité de surface sont ensuite analysées. Les données météorologiques étudiées sont la température de l'air, le coefficient de convection (voir chapitre 2) et la vitesse du vent. Ces différents paramètres subissent des variations importantes (de 2% à 50%) et sont rapportés au cas de référence, présenté ci-dessous. À l'issue de cette étude paramétrique, un bilan est réalisé pour mettre en évidence les paramètres les plus influents. La dernière partie de cette section est consacrée à la mise en évidence d'un lien entre les températures de surface, l'angle d'incidence solaire et les flux solaires reçus en surface.

6.1.1 Cas de référence

Les simulations MISTRAL présentes dans ce chapitre sont toutes effectuées sur la même géométrie que précédemment : un échantillon aux dimensions de la maquette, soit une géométrie de surface sinusoïdale, une longueur de 53.1cm et une largeur de 40.3cm, et une hauteur de 10cm au creux des sillons (voir figure 5.1 en section 5.1).

Le maillage choisi pour ces tests est de 48 points en i , 25 en j et 14 en k , avec une répartition linéaire des points dans les trois directions. Ces tests sont réalisés avec un pas de temps de calcul de 5 minutes. Étant donné le grand nombre de simulations nécessaire pour l'étude paramétrique de la présente section, le maillage spatial a été réduit par rapport aux conditions énoncées en section 5.2.5. En revanche, pour garantir la précision des résultats, le pas temporel a été conservé à 5mn.

Les propriétés physiques utilisées sont celles du plâtre de la maquette de la campagne expérimentale :

- conductivité $\kappa = 0.58 \text{ W/m}^2$;
- masse volumique $\rho = 1139 \text{ kg/m}^3$;
- capacité calorifique $C_p = 1.072 \text{ kJ/kg.K}$.

L'émissivité surfacique est prise égale à 0.95. Pour la détermination de la température de l'air, la fonction analytique à deux sinus de l'équation 2.25 (section 2.4.1) est utilisée. Cette température est calculée avec 288.25 K pour moyenne et 7.9K pour amplitude, ces valeurs correspondant aux valeurs relevées lors de la campagne de mesure le 1er octobre 2002. Pour ces simulations, la vitesse du vent est prise nulle.

Afin d'uniformiser l'analyse, les mêmes types de figures sont tracés pour chaque paramètre physique d'entrée. Ce sont les écarts à la moyenne (équation 5.7), et non les températures

absolues, qui sont présentés. La représentation en écarts permet en effet de donner la tendance des variations de température ainsi qu’une représentation plus concise des résultats. Pour chaque paramètre d’entrée testé, les courbes tracées sont les écarts moyens, moyens de jour et moyens de nuit (correspondant aux équations 5.8 et 5.9). De même, ces courbes sont tracées pour plusieurs points en surface du profil : les points A, C, E et G, correspondant respectivement à un sillon, au milieu de la face Est, à la crête centrale et au milieu de la face Ouest (figure 6.1). Les graphes représentent les écarts aux températures moyennes, moyennes de jour et moyennes de nuit pour chacun de ces quatre points (équations 5.10 à 5.12, où *POINT* représente successivement les points A, C, E et G.

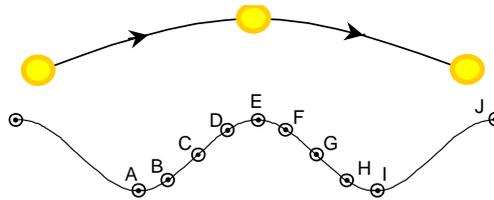


FIG. 6.1 – Localisation des points A, C, E, et G à la surface de l’échantillon, correspondant aux emplacements des thermocouples à la surface de la maquette

6.1.2 Émissivité de surface

Afin d’identifier l’influence de l’émissivité de surface sur la température en surface de la maquette, six valeurs d’émissivité sont testées sur une large gamme (table 6.1). Les températures de surface obtenues pour chacune de ces valeurs d’émissivité sont comparées à celles obtenues avec l’émissivité de référence, qui est de 0.95.

émissivité de référence	+5%	+2%	-2%	-10%	-20%	-50%
0.95	1	0.97	0.93	0.86	0.76	0.48

TAB. 6.1 – Émissivités testées pour l’étude paramétrique du code MISTRAL

La figure 6.2 montre les écarts $\Delta\bar{T}$, $\Delta\overline{T_{sup}}$, $\Delta\overline{T_{inf}}$ pour ces sept valeurs d’émissivité. Lorsque l’émissivité diminue les écarts moyens augmentent, ce qui signifie que les températures de surface augmentent.

La diminution d’émissivité affecte plus particulièrement la température de surface pendant la nuit : $\Delta\overline{T_{inf}}$ passe de -1.1 K (i.e. les températures diminuent en surface) pour $\varepsilon=1$ à +10.2 K pour $\varepsilon=0.48$ (i.e. les températures augmentent en surface). Pendant la journée, les températures de surface sont très peu influencées par les variations d’émissivité, puisque l’écart maximal obtenu, pour $\varepsilon = 0.475$, est de +0.8 K. C’est donc la nuit, sur le flux infrarouge reçu, que l’émissivité de surface influence le plus les températures de surface.

On voit sur la figure 6.3 que la température de surface n’est pas affectée uniformément par les variations de l’émissivité de surface. Pour des émissivités élevées (jusqu’à $\varepsilon = 0.93$), les écarts aux points A, C, E et G ont des valeurs très proches, puisqu’il y a moins de 0.1 K de différence entre ces quatre points. Mais à mesure que l’émissivité diminue, la variabilité spatiale de la température de surface augmente : de 0.5 K entre les points A et E (respectivement sillon et

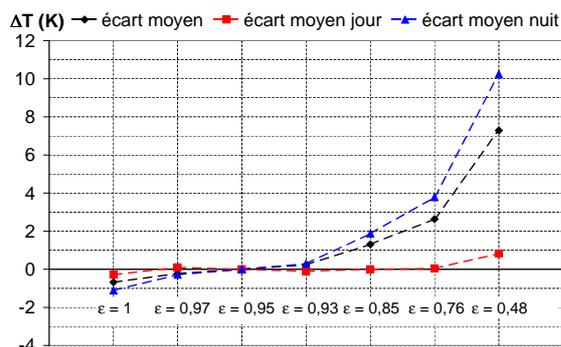


FIG. 6.2 – Émissivité : écarts moyens journaliers, diurnes et nocturnes sur le profil

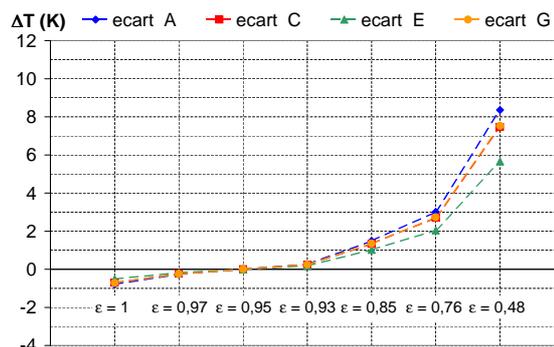


FIG. 6.3 – Émissivité : écarts moyens journaliers pour les points A, C, E et G

crête) pour une émissivité de 0.85 à 2.6 K entre ces deux mêmes points pour une émissivité de 0.48. Le point A est le plus affecté par les variations d'émissivité. La raison est sans doute que, de par son emplacement – au creux d'un sillon – il est soumis au rayonnement du reste de l'échantillon vers lui. Quand l'émissivité de surface varie, le flux rayonné par l'échantillon varie également. Par conséquent, l'environnement du point A change, ce qui contribue à faire varier sa température. De manière symétrique, le point E est placé au sommet d'une crête et est donc toujours soumis au rayonnement d'un environnement invariant, il est par conséquent le moins affecté par les variations d'émissivité.

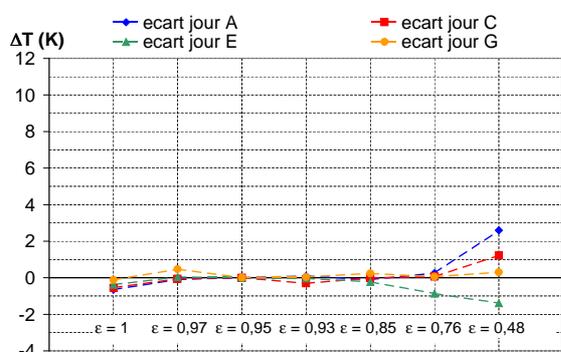


FIG. 6.4 – Émissivité : écarts moyens diurnes pour les points A, C, E et G

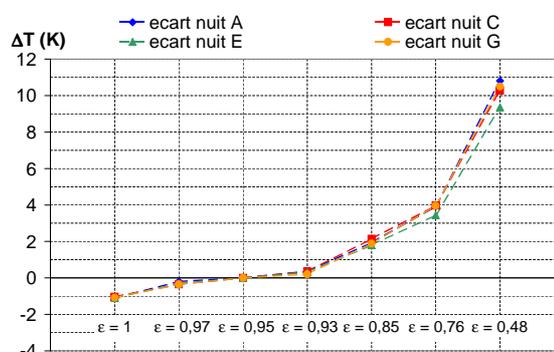


FIG. 6.5 – Émissivité : écarts moyens nocturnes pour les points A, C, E et G

Les figures 6.4 et 6.5 vont nous permettre de discerner les différences de comportement existant entre le jour et la nuit. Comme remarqué sur la figure 6.2, c'est de nuit que la variation d'émissivité affecte le plus les températures de surface. Pendant la journée, c'est seulement pour une émissivité faible ($\epsilon=0.48$) que les écarts spatiaux sont notables. Notons par ailleurs que les températures de surface ne varient pas toutes dans le sens inverse de la variation d'émissivité (figure 6.4). En effet, le point E se distingue : contrairement à tous les autres points de la surface, lorsque l'émissivité diminue, sa température diminue (-0.2 K pour $\epsilon=0.85$ à -1.4 K pour $\epsilon=0.48$). Remarquons également que le point A est le plus sensible de tous à la diminution de l'émissivité : pour une diminution de 50% de l'émissivité ($\epsilon=0.48$) les écarts en ce point sont de +2.6 K.

Ce même phénomène est retrouvé sur la figure 6.5 pour les écarts moyens de nuit $\Delta T_{inf,POINT}$:

à mesure que l'émissivité diminue, les températures de surface augmentent considérablement sur tout le profil, et particulièrement au point A (+10.8 K pour $\varepsilon = 0.48$). De plus, pour de fortes émissivités la variabilité spatiale en température reste faible : les points sont groupés, et les écarts entre leurs températures sont de 0.1 K pour $\varepsilon = 0.85$ et de 0.6 K pour $\varepsilon = 0.76$, entre les points A et E.

On retient en conclusion qu'une diminution de l'émissivité tend à faire augmenter les températures de surface. Ces températures de surface augmentent beaucoup plus nettement la nuit. Par ailleurs, l'émissivité affecte de manière non négligeable la variabilité spatiale des températures de surface durant la journée : on obtient jusqu'à 4 K d'écart entre les points A et E du profil pour une émissivité de 0.48. Cependant, pour de faibles variations d'émissivité – $\pm 2\%$ – ces écarts restent limités (maximum 0.5 K de jour et 0.15 K de nuit).

6.1.3 Constantes thermiques

L'influence des propriétés thermiques (conductivité thermique, capacité calorifique et masse volumique) sur la variabilité spatiale de la température de surface de l'échantillon est ici évaluée, à travers deux grandeurs caractéristiques des transferts thermiques : la diffusivité a , et l'effusivité b :

$$a = \frac{\kappa}{\rho \cdot C_p} \quad (6.1)$$

$$b = \sqrt{\kappa \rho C_p} \quad (6.2)$$

Le code MISTRAL prend en entrée pour les propriétés thermiques deux données : la conductivité thermique κ , et le produit de la masse volumique et de la capacité calorifique $\rho \times C_p$. Aussi des variations sont appliquées à ces deux quantités, qui conduisent aux valeurs de diffusivité et d'effusivité des tables.

6.1.3.1 Diffusivité

La diffusivité prend six valeurs autres que la valeur de référence (table 6.2). L'unité de la diffusivité est le m^2/s .

diffusivité de référence	a -50%	a -40%	a -20%	a -10%	a +20%	a +50%
$4.51 \cdot 10^{-7}$	$2.12 \cdot 10^{-7}$	$2.65 \cdot 10^{-7}$	$3.61 \cdot 10^{-7}$	$3.98 \cdot 10^{-7}$	$5.41 \cdot 10^{-7}$	$6.77 \cdot 10^{-7}$
variable modifiée	$\rho C_p + 100\%$	$\rho C_p + 70\%$	$\kappa + 20\%$	$\rho C_p + 10\%$	$\kappa - 20\%$	$\kappa - 50\%$

TAB. 6.2 – Cas de diffusivités testés pour l'étude paramétrique du code MISTRAL

La figure 6.6 montre les écarts $\Delta \bar{T}$, $\Delta \overline{T_{sup}}$, $\Delta \overline{T_{inf}}$ pour les sept diffusivités testées. On y voit que même pour de fortes variations de diffusivité les écarts moyens $\Delta \bar{T}$ sont peu élevés. Cependant, en regardant les écarts moyens jour et nuit $\Delta \overline{T_{sup}}$ et $\Delta \overline{T_{inf}}$, on voit que si les écarts moyens journaliers sont faibles c'est qu'ils se compensent entre le jour et la nuit. Le plus surprenant sur cette figure est que les variations des écarts ne sont pas du tout monotones. Ce phénomène vient de la manière d'obtenir les différentes diffusivités, c'est-à-dire en faisant varier soit la conductivité thermique κ soit le produit $\rho \cdot C_p$, mais jamais les deux en même temps. Notons que les plus grands écarts, de jour comme de nuit, sont obtenus pour une diminution de

la conductivité, correspondant à $a+50\%$. Pour atteindre des écarts comparables il faut imprimer au produit ρC_p une augmentation de 100%. C'est donc la conductivité thermique qui semble prendre le dessus.

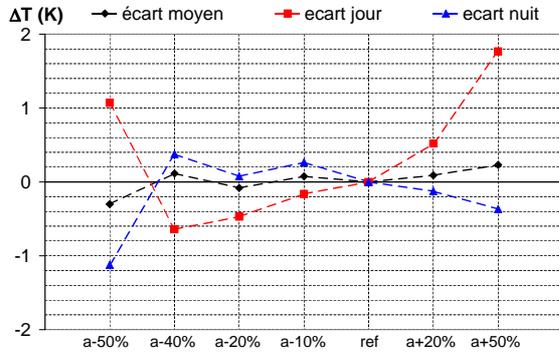


FIG. 6.6 – Diffusivité : écarts moyens journaliers, diurnes et nocturnes sur le profil

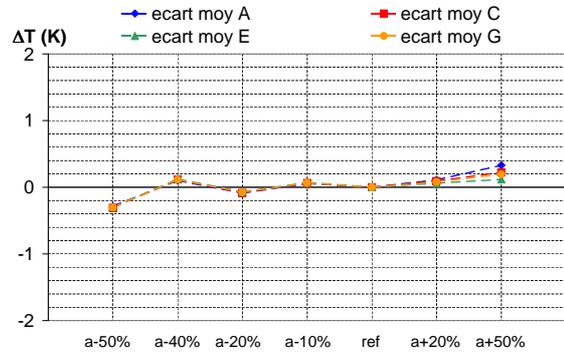


FIG. 6.7 – Diffusivité : écarts moyens journaliers pour les points A, C, E et G

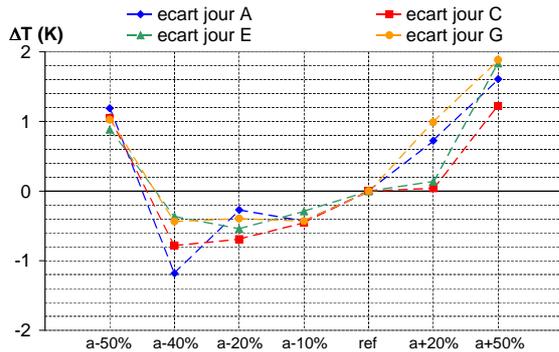


FIG. 6.8 – Diffusivité : écarts moyens diurnes pour les points A, C, E et G

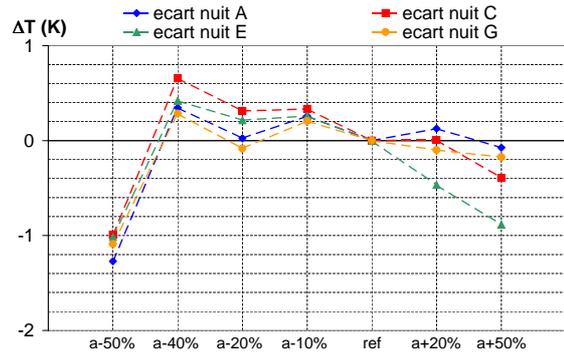


FIG. 6.9 – Diffusivité : écarts moyens nocturnes pour les points A, C, E et G

La diffusivité semble globalement très peu affecter spatialement les températures de surface (figure 6.7) : les écarts les plus importants entre deux points sont de 0.2 K entre A et E, pour une augmentation de la diffusivité de 50%.

De nuit (figure 6.9) les températures sont assez uniformes : les écarts ne sont pas dispersés, sauf pour le dernier cas $a + 50\%$, où ils atteignent 0.8 K entre les points A et E. Néanmoins pour atteindre ces écarts, maximaux pendant la nuit, il faut appliquer une variation très importante à la diffusivité, qui, dans ce cas, correspond à une diminution de 50% de la conductivité. De jour (figure 6.12), la dispersion est plus forte : elle atteint 1 K entre les points C et G pour $a + 20\%$.

La diffusivité thermique caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se diffuse dans le matériau. Des variations très importantes imposées à cette caractéristique du matériau résultent en des variations assez modérées des températures de surface. La variabilité spatiale de ces températures est affectée : on peut avoir jusqu'à 0.7 K entre deux points du profil. La variabilité de la diffusivité n'est donc a priori pas à négliger.

6.1.3.2 Effusivité

L'effusivité prend six valeurs autres que la valeur de référence (table 6.3). L'unité de l'effusivité est le $J/m^2 \text{ } ^\circ C \text{ s}^{1/2}$. L'effusivité thermique caractérise la densité de flux pénétrant dans le milieu.

effusivité						
de référence	$b-10\%$	$b+5\%$	$b+10\%$	$b+20\%$	$b+30\%$	$b+50\%$
772.4	863.6	919.7	946.1	1057.7	1126.4	1259.4
variable modifiée	$\kappa +20\%$	$\rho C_p +10\%$	$\kappa -20\%$	$\kappa -50\%$	$\rho C_p +70\%$	$\rho C_p +100\%$

TAB. 6.3 – Cas d'effusivités testés pour l'étude paramétrique du code MISTRAL

La figure 6.10 montre, comme c'était le cas pour la diffusivité, que les variations des écarts ne sont pas monotones. Comme précédemment cela est dû au mode de variation de l'effusion : pour chaque point on fait varier soit la conductivité κ soit le produit ρC_p . En moyenne l'effusivité semble peu affecter les températures de surface. Les écarts moyens sont assez faibles (inférieurs à 0.5 K en moyenne), mais il y a compensation entre le jour et la nuit. Un point se distingue : celui pour lequel la diffusivité b est augmentée de 20%. Ses écarts sont beaucoup plus importants qu'ailleurs : ils atteignent 1.8 K de jour. Cette effusivité correspond à une diminution de la conductivité thermique de 50%. C'est, encore une fois, la conductivité qui semble dicter le comportement thermique du matériau. On retrouve ce même phénomène sur la figure 6.11 : il n'y a pas de variabilité spatiale pour les écarts moyens, excepté au point $b - 20\%$.

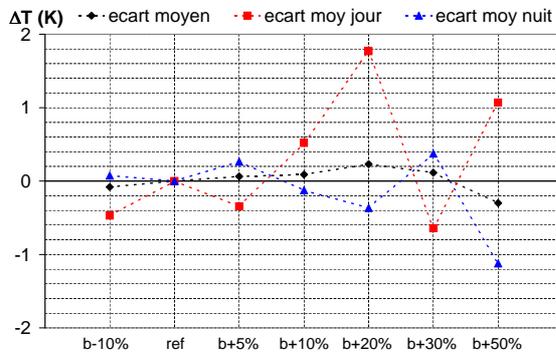


FIG. 6.10 – Effusivité : écarts moyens journaliers, diurnes et nocturnes sur le profil

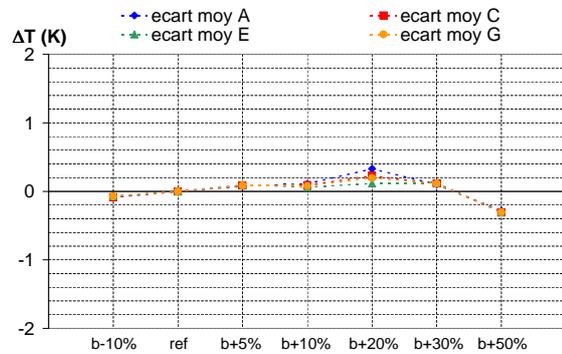


FIG. 6.11 – Effusivité : écarts moyens journaliers pour les points A, C, E et G

De jour, les températures en surface sont assez dispersées : 1 K d'écart entre les points G et C pour $b + 10\%$, 0.6 K entre ces mêmes points pour $b + 20\%$ et 0.8 K entre A et E pour $b + 30\%$. De nuit, les écarts spatiaux de température sont trouvés entre les points A et E pour $b + 10\%$ et $b + 20\%$. Ces cas, communs aux écarts importants trouvés de jour, correspondent à des diminutions importantes de la conductivité thermique. Le point A semble moins affecté par les variations d'effusivité que le point E, en particulier de nuit. Ceci pourrait être dû au fait que, si on considère une colonne autour de ces points (voir figure 4.50 dans le chapitre 4), le point E au sommet de la crête a au-dessous de lui beaucoup moins de matière que les autres points et particulièrement le point A au sillon. Cette situation particulière pourrait amener une sensibilité moindre de ce point aux changements de propriétés thermiques du matériau.

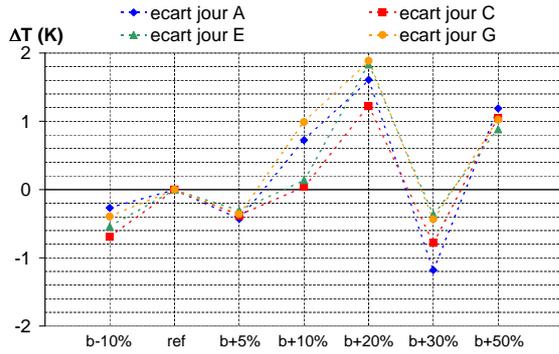


FIG. 6.12 – Effusivité : écarts moyens diurnes pour les points A, C, E et G

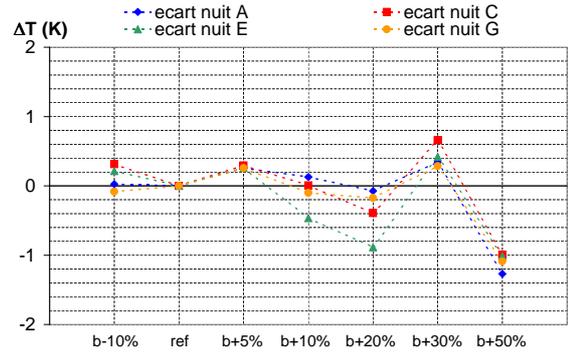


FIG. 6.13 – Effusivité : écarts moyens nocturnes pour les points A, C, E et G

6.1.4 Température de l'air

Nous nous attachons maintenant à caractériser l'influence de variations de la température de l'air sur les températures en surface de l'échantillon. La température de l'air de référence – notée T_{air} – est calculée analytiquement d'après l'équation 2.25 (voir section 2.4.1). Ce modèle analytique calcule la température de l'air au cours d'un cycle de 24h à partir de la connaissance d'une moyenne et d'une amplitude. Notre cas de référence (section 6.1.1) considère une température moyenne de 288.25 K et une amplitude de 7.9 K. Pour étudier l'influence de la température de l'air sur les températures à la surface de l'échantillon, différentes répartitions temporelles de la température d'air sont testées : on fait varier d'abord la température moyenne en gardant une amplitude constante de 7.9 K, puis on fixe la température moyenne à 288.25 K tandis qu'on fait varier l'amplitude. Ce découplage entre moyenne et amplitude de la température de l'air va nous permettre de dissocier l'influence de chacune sur les températures de surface.

6.1.4.1 Moyenne variable et amplitude fixe

Dans un premier temps, on commence par fixer l'amplitude de la température de l'air et en faire varier sa moyenne. Les trois cas testés sont résumés dans la table 6.4.

	référence	-2%	+2%
moyenne de T_{air}	283.25 K	283.25 K	293.25 K
amplitude de T_{air}		7.9 K	

TAB. 6.4 – Cas de températures d'air testés pour l'étude paramétrique du code MISTRAL : moyennes et amplitude introduites dans la fonction analytique de la température d'air

Des variations modérées de la température moyenne (5 K, correspondant à une variation de 1.7%) produisent de fortes différences de températures en surface (figure 6.14) : +1.1 K pour $\overline{T_{air}}=293.25$ K et de -2.8 K pour $\overline{T_{air}}=283.25$ K. Les différences sont légèrement plus élevées de jour que de nuit.

Lorsque la température moyenne de l'air $\overline{T_{air}}$ diminue, les écarts constatés sont plus importants que lorsque celle-ci l'augmente. Ceci est dû au fait que quand $\overline{T_{air}}$ diminue la température de l'air diminue globalement. Et dans ce cas la température de l'air est inférieure à la température de surface de la maquette, le gradient de température maquette/air augmente et par conséquent les pertes d'énergie augmentent.

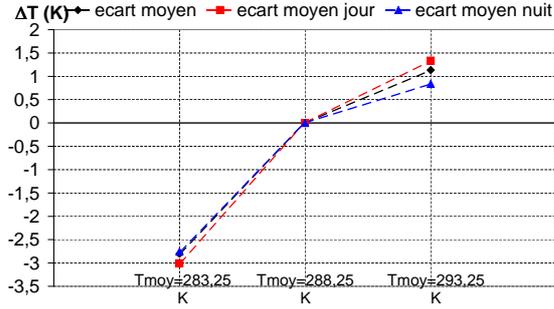


FIG. 6.14 – Température de l’air à amplitude fixe : écarts moyens journaliers, diurnes et nocturnes sur le profil

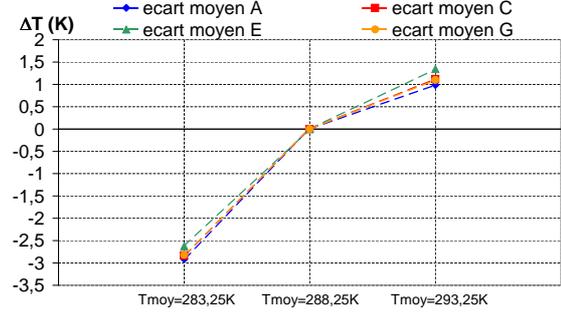


FIG. 6.15 – Température de l’air à amplitude fixe : écarts moyens journaliers pour les points A, C, E et G

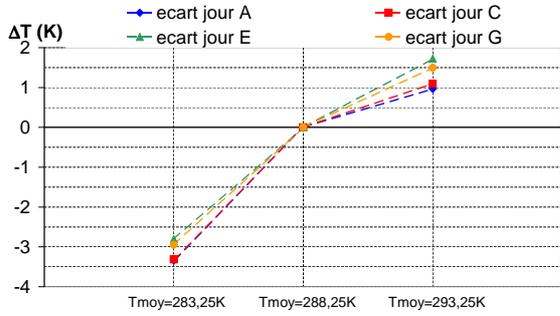


FIG. 6.16 – Température de l’air à amplitude fixe : écarts moyens diurnes pour les points A, C, E et G

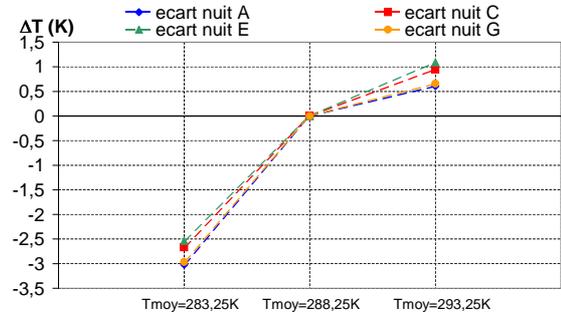


FIG. 6.17 – Température de l’air à amplitude fixe : écarts moyens nocturnes pour les points A, C, E et G

La température de surface n’est pas affectée uniformément par les variations de la température de l’air (figure 6.15) : quand $\overline{T_{air}}$ augmente, les écarts sont placés dans l’ordre suivant :

$$\Delta\overline{T_E} > \Delta\overline{T_C} \simeq \Delta\overline{T_G} > \Delta\overline{T_A}$$

Au contraire, quand $\overline{T_{air}}$ diminue, les écarts sont placés dans l’ordre inverse :

$$\Delta\overline{T_A} > \Delta\overline{T_C} \simeq \Delta\overline{T_G} > \Delta\overline{T_E}$$

C’est donc aux points A et E, correspondant respectivement à un sillon et à une crête, que les écarts sont extrêmes.

Lorsqu’on analyse les écarts diurnes et nocturnes (figures 6.16 et 6.17), on peut remarquer que c’est de jour que les écarts sont les plus importants, atteignant -3.3 K aux points A et C pour une température moyenne d’air de 283.25 K, alors qu’ils sont au maximum de -3 K pendant la nuit aux points A et G.

Les écarts diurnes et nocturnes sont placés dans le même ordre que les écarts moyens journaliers : c’est dans les sillons et sur les crêtes que l’on trouve des singularités. De jour comme de nuit, lorsque $\overline{T_{air}}$ diminue, les écarts les plus importants se trouvent dans les sillons (-3.3 K de jour au point A), et les moins importants se trouvent sur les crêtes (-2.5 K de nuit au point E) ; inversement, lorsque $\overline{T_{air}}$ augmente, les écarts les plus importants sont situés sur les crêtes (+1.7 K de jour au point E) et les moins importants dans les sillons (+0.6 K de nuit au point

A). Les crêtes, étant plus exposées au vent, donc à la convection, que tous les autres points de la surface, elles réagissent plus qu'ailleurs à un changement de température de l'air.

6.1.4.2 Moyenne fixe et amplitude variable

La température moyenne de l'air est maintenant fixée à 288.25 K, et trois amplitudes sont testées (table 6.5).

	référence		
moyenne de T_{air}	288.25 K		
amplitude de T_{air}	0 K	7.9 K	12.9 K

TAB. 6.5 – Cas de températures d'air testés pour l'étude paramétrique du code MISTRAL : moyenne et amplitudes introduites dans la fonction analytique de la température d'air

La figure 6.18 montre les écarts $\Delta\bar{T}$, $\Delta\overline{T_{sup}}$, $\Delta\overline{T_{inf}}$ pour ces trois amplitudes. On peut voir que les variations d'amplitude de la température de l'air produisent de fortes différences de températures en surface : les écarts moyens sont de -1.2 K pour une amplitude nulle de T_{air} et de -0.6 K pour une amplitude de T_{air} égale à 12.9 K.

Deux remarques peuvent être faites en comparaison avec le cas précédent où la température moyenne de l'air variait (amplitude constante) : la première est que les écarts à la référence $\Delta\bar{T}$ sont deux à trois fois moins importants. La deuxième est que, contrairement au cas précédent, les écarts ne varient pas de façon monotone : les températures en surface de la maquette diminuent quel que soit le sens de variation de l'amplitude de la température d'air. En effet, augmenter l'amplitude de la température de l'air revient à augmenter la température de l'air pendant la journée et à la diminuer pendant la nuit. De nuit, cette baisse de la température de l'air va fortement contribuer au refroidissement de la surface (-1.4 K), alors que de jour l'augmentation de la température de l'air n'a que peu d'influence (-0.2 K).

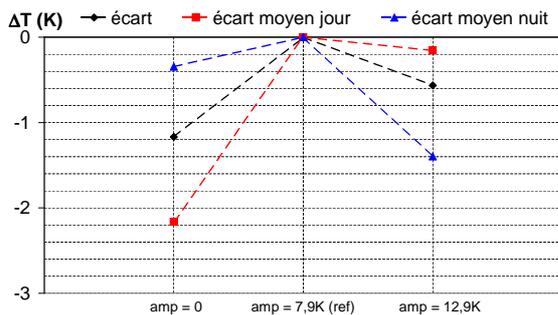


FIG. 6.18 – Température de l'air à moyenne fixe : écarts moyens journaliers, diurnes et nocturnes sur le profil

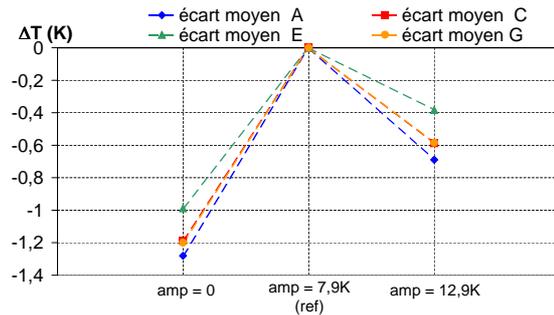


FIG. 6.19 – Température de l'air à moyenne fixe : écarts moyens journaliers pour les points A, C, E et G

Concernant les écarts diurnes $\Delta\overline{T_{sup}}$ et nocturnes $\Delta\overline{T_{inf}}$, notons que ceux-ci sont très différents, contrairement au cas où la température moyenne de l'air varie. Ils sont en effet de -2.2 K de jour et de -0.3 K de nuit pour une amplitude de température d'air nulle, et de -0.2 K de jour et de -1.4 K de nuit pour une amplitude de 12.9 K. Les variations d'amplitude de la température de l'air affectent donc différemment les températures de surface selon leur sens de variation.

Lorsque l'amplitude de T_{air} est nulle, cela revient, par rapport au cas de référence, à diminuer la température de l'air pendant la journée et à l'augmenter pendant la nuit. De jour, les températures de surface sont fortement affectées par la diminution de la température de l'air (-2.2 K), tandis qu'elles le sont beaucoup moins pendant la nuit (-0.3 K).

Sur la figure 6.19 sont tracés les écarts moyens $\overline{\Delta T_{POINT}}$ pour les quatre points A, C, E et G. La température de surface n'est pas affectée uniformément par les variations de la température de l'air, mais que cette non uniformité n'est pas très élevée : pour une température d'air d'amplitude nulle les écarts moyens varient de -1 K à -1.3 K, et lorsque cette amplitude est de 12.9 K les écarts moyens varient de -0.4 K à -0.7 K.

Quand l'amplitude de T_{air} est nulle, les écarts à la température moyenne, pour quatre points de la surface, sont placés dans l'ordre suivant :

$$\overline{\Delta T_A} > \overline{\Delta T_C} \simeq \overline{\Delta T_E} > \overline{\Delta T_G}$$

Quand l'amplitude de T_{air} augmente, les écarts sont placés dans un ordre proche :

$$\overline{\Delta T_A} > \overline{\Delta T_C} \simeq \overline{\Delta T_G} > \overline{\Delta T_E}$$

C'est donc dans les sillons que les variations d'amplitude de la température de l'air ont le plus d'influence.

Les non uniformités de températures en surface se creusent entre les différents points (figure 6.16) : pour une amplitude de T_{air} nulle, les écarts à la référence sont de -2 K au point A (sillon) et de -2.6 K au point G (face Ouest), et pour une amplitude de T_{air} de 12.9 K ces écarts sont de -0.5 K aux points A et C, et de +0.1 K au point E (crête). Notons par ailleurs que c'est au point E, donc à la crête, qu'on trouve le seul écart positif : de jour, pour une amplitude de la température de l'air de 12.9 K. Au point G (face Ouest), une diminution de la température de l'air (amplitude nulle) provoque une très forte diminution de la température de surface. Le point G étant situé sur la face Ouest, il est chauffé d'abord par conduction le matin, puis par le rayonnement solaire l'après-midi : c'est le point dont la température moyenne journalière est la plus élevée. Il est donc naturel qu'une diminution globale de la température de l'air affecte plus ce point que les autres, le gradient de température surface/air étant plus élevé. Une augmentation de la température de l'air, quant à elle, réduit le gradient de température existant entre la surface et l'air ; la température de surface aura donc tendance à augmenter ou à ne pas évoluer.

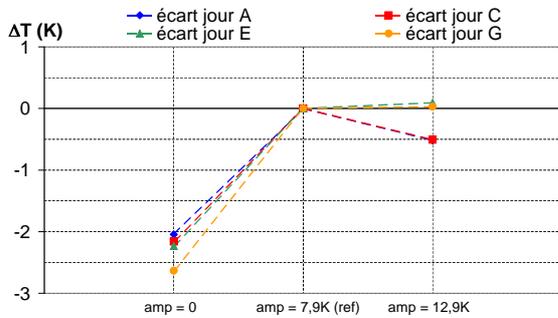


FIG. 6.20 – Température de l'air à moyenne fixe : écarts moyens diurnes pour les points A, C, E et G

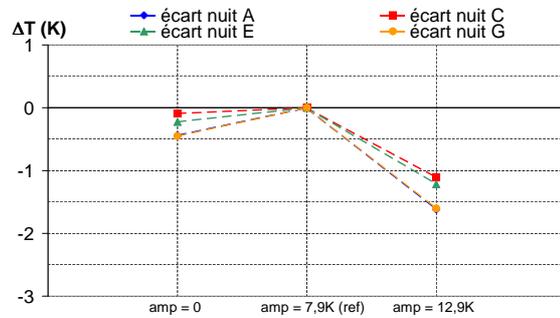


FIG. 6.21 – Température de l'air à moyenne fixe : écarts moyens nocturnes pour les points A, C, E et G

La figure 6.21 montre des non uniformités de température de surface importantes pendant la période nocturne, en particulier pour une augmentation de l'amplitude de la température d'air. Les écarts varient en effet de -0.1 K au point C à -0.5 K au point G pour une amplitude de T_{air} nulle, et de -1.1 K au point C à -1.6 K aux points A et G.

Que ce soit en faisant varier la moyenne ou l'amplitude de la température de l'air, les températures en surface de la maquette sont fortement affectées par ces variations. En effet, un changement de 5 K de la température moyenne de l'air provoque des écarts allant jusqu'à -2.2 K entre différents points de la surface. La température d'air semble donc être un facteur dominant dans la variabilité spatiale de la température de surface.

6.1.5 Vitesse du vent

Quatre vitesses de vent V_{vent} , constantes au cours du temps, sont comparées au cas de référence $V_{vent} = 0$: 0.5, 5, 10, et 20 m/s. La figure 6.22 montre que même une vitesse de vent faible (0.5 m/s) provoque des écarts de température moyens importants (de l'ordre de -2.8 K), puis lorsque la vitesse de vent augmente ces écarts se creusent.

Quelle que soit la vitesse – non nulle – du vent, les écarts $\Delta\bar{T}$ sur tout le profil sont négatifs : la température décroît lorsque la vitesse du vent augmente. Cette décroissance est due à la convection forcée qui augmente d'intensité avec la vitesse du vent.

On voit également une influence du vent beaucoup plus forte pendant le jour que pendant la nuit (figure 6.22) : les écarts moyens de nuit sont au maximum de -2.2 K pour $V_{vent} = 20$ m/s alors que les écarts moyens de jour s'étendent de -5.8 K ($V_{vent} = 0.5$ m/s) à -15.6 K ($V_{vent} = 20$ m/s). Ceci peut se justifier par le fait que de jour la température en surface de la maquette est beaucoup plus importante que le température de l'air. Ce gradient de température étant plus grand de jour que de nuit, la convection provoquée par le vent est plus importante de jour que de nuit.

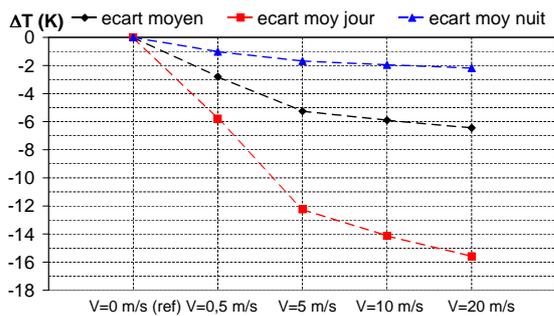


FIG. 6.22 – Vitesse du vent : écarts moyens journaliers, diurnes et nocturnes sur quatre points du profil

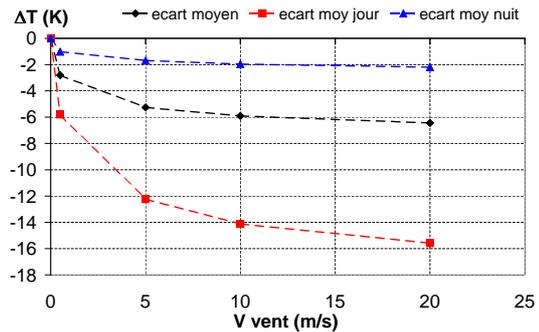


FIG. 6.23 – Écarts moyens journaliers, diurnes et nocturnes en fonction de la vitesse du vent

La figure 6.23 montre ces mêmes écarts, $\Delta\bar{T}$, $\Delta\bar{T}_{sup}$, $\Delta\bar{T}_{inf}$, en fonction de la vitesse du vent. Leur allure est "logarithmique" : ils s'accroissent très rapidement pour des vitesses de vent faibles, puis cette croissance ralentit pour des vitesses de vent plus importantes (à partir de $V_{vent} = 5$ m/s). Ceci est dû à la formulation empirique de convection forcée utilisée dans le code : la vitesse du vent est élevée à une puissance inférieure à 1.

La température de surface n'est pas affectée uniformément par les variations de la vitesse du vent (figure 6.24). De plus, cette non uniformité augmente avec la vitesse du vent : on trouve 0.2 K de différence entre les points A et E pour $V_{vent} = 0.5$ m/s, et 0.7 K entre ces mêmes points pour $V_{vent} = 20$ m/s. C'est par ailleurs au point E que les écarts sont les plus importants. Ce point étant situé sur une crête, il est le plus exposé au vent et donc plus sensible à une augmentation de sa vitesse.

La figure 6.25 montre que de jour les non uniformités de températures en surface se creusent entre les différents points : les écarts les moins importants sont enregistrés au point A, c'est-à-dire dans un sillon (de -5.3 K pour $V_{vent} = 0.5$ m/s à -13.6 K pour $V_{vent} = 20$ m/s) tandis que les écarts les plus importants sont enregistrés au point E, sur une crête (de -6.5 K pour $V_{vent} = 0.5$ m/s à -17.6 K pour $V_{vent} = 20$ m/s). On a donc, entre les points A et E, des écarts de températures allant de 1.3 K pour $V_{vent} = 0.5$ m/s à 4 K pour $V_{vent} = 20$ m/s. Le vent exerce par conséquent une influence non négligeable sur la variabilité de la température de surface pendant la journée.

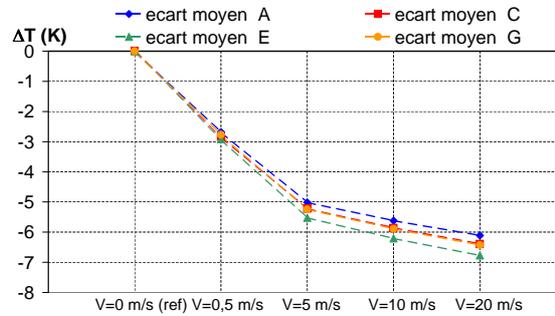


FIG. 6.24 – Vitesse du vent : écarts moyens journaliers, diurnes et nocturnes pour les points A, C, E et G

Les non uniformités de températures de surface sont moins importantes pendant la période nocturne (figure 6.26). Les écarts sont en effet de -2.6 K au maximum, au point A pour une vitesse de vent de 20 m/s, alors que de jour en ce même point l'écart est de -13.6 K. De plus, l'ordre des points est inversé : de nuit, les écarts les moins importants sont enregistrés au point E et les écarts les plus importants sont enregistrés au point A. Par ailleurs, les non uniformités de température en surface se creusent peu avec l'augmentation de la vitesse du vent : on passe de 0.6 K de différence entre les points A et E pour $V_{vent} = 0.5$ m/s à environ 1 K pour $V_{vent} = 20$ m/s.

La convection s'exprime, conformément aux équations 2.27 et 2.30, de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{convection forcée :} \quad & h_f = B \cdot V_{vent}^m \\ & \text{avec } B = f(\beta) \text{ et } m = f(\beta) \end{aligned}$$

$$\text{convection naturelle :} \quad h_n = 1.7 \cdot |T - T_{air}|^{1/3}$$

où β est l'angle situé entre la verticale et la normale à la facette. Cette formulation ne tient donc nullement compte de la localisation spatiale du point. Les différences d'écarts enregistrées aux différents points du profil, notamment A et E dans les sillons et sur les crêtes, sont par conséquent uniquement dues à la différence de températures entre ces points.

Lorsque la vitesse du vent augmente, elle abaisse globalement les températures de surface ; cette diminution de température est très importante pendant la journée (jusqu'à 17.6 K pour

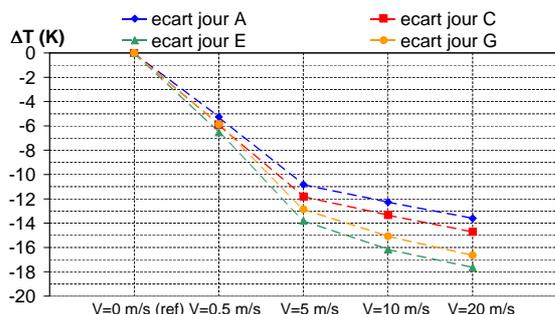


FIG. 6.25 – Vitesse du vent : écarts moyens diurnes pour les points A, C, E et G

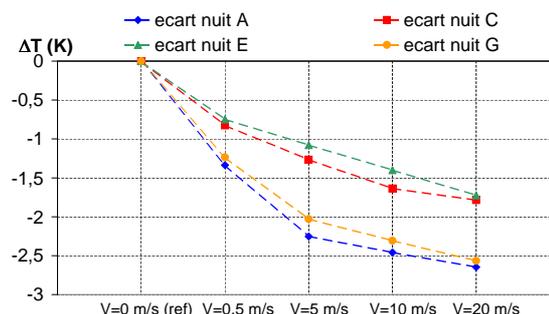


FIG. 6.26 – Vitesse du vent : écarts moyens nocturnes pour les points A, C, E et G

une vitesse de vent de 20 m/s), et elle reste non négligeable pendant la nuit (jusqu'à 2.6 K pour une vitesse de vent de 20 m/s).

L'augmentation de la vitesse du vent affecte de façon significative la variabilité spatiale de la température de surface pendant la journée (entre les points A et E, les écarts de températures passent de 1.3 K pour $V_{vent} = 0.5$ m/s à 4 K pour $V_{vent} = 20$ m/s).

6.1.6 Coefficient de convection

Dans les sections précédentes le coefficient de convection n'était pas constant : il était calculé à chaque pas de temps conformément aux équations 2.27 et 2.30. Dans cette section, afin de procéder à des comparaisons pertinentes, des valeurs constantes de h_{conv} sont comparées, et le calcul pour $h_{conv} = 2$ W/m².K constitue ici le cas de référence. Afin d'identifier l'influence du coefficient de convection de l'air (noté h_{conv}) sur les températures de surface de l'échantillon, quatre valeurs de h_{conv} sont testées (table 6.6).

référence	+150%	+400%	+900%
2 W/m ² .K	5 W/m ² .K	10 W/m ² .K	20 W/m ² .K

TAB. 6.6 – Les différents cas de calcul pour l'étude de l'influence du coefficient de convection sur les températures de surface

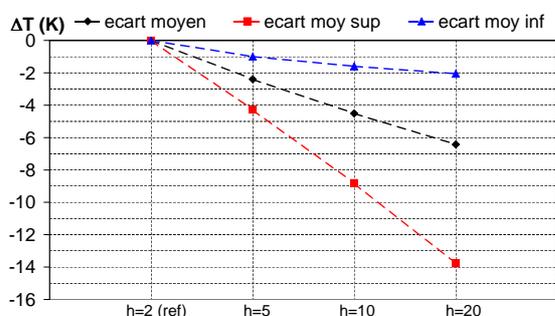


FIG. 6.27 – Coefficient de convection : écarts moyens journaliers, diurnes et nocturnes sur le profil

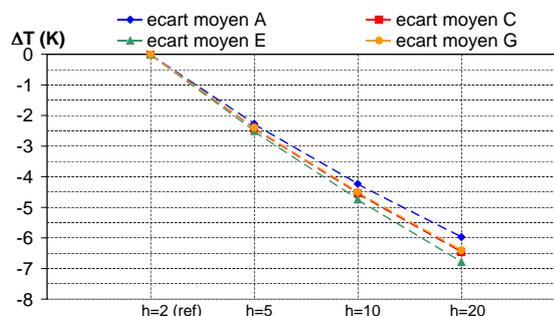


FIG. 6.28 – Coefficient de convection : écarts moyens journaliers aux points A, C, E et G

La figure 6.27 représente les écarts moyens, moyens de jour et moyens de nuit pour les quatre valeurs de h_{conv} testées. Comme on pouvait s'y attendre, plus le coefficient de convection augmente et plus les températures de surface diminuent, quelle que soit la période de la journée. L'augmentation de h_{conv} de 2 à $5 \text{ W/m}^2.K$ diminue les températures moyennes à la surface de plus de 2 K, et à chaque fois qu'on multiplie h_{conv} par un facteur 2, les écarts moyens $\Delta\bar{T}$ augmentent d'environ 2 K : ils passent de -2.4 K à -4.5 K, puis sont de -6.4 K pour $h_{conv}=20 \text{ W/m}^2.K$.

Les chutes de températures de surface sont beaucoup plus importantes de jour que de nuit : les écarts moyens de jour ($\Delta\bar{T}_{sup}$) sont compris entre -4.3 K et -13.8 K pour des coefficients de convection allant de 5 à $20 \text{ W/m}^2.K$ tandis que dans les mêmes conditions, pendant la nuit, les $\Delta\bar{T}_{inf}$ sont compris entre -1 K et -2.1 K. C'est donc sur les températures élevées pendant la journée que le coefficient de convection affecte le plus les températures de surface. En effet, de nuit le gradient de température entre la surface et l'air est moins grand, il est donc normal que la convection ait moins d'impact.

Spatialement, comme pour les variations de la vitesse du vent, la température de surface n'est pas affectée uniformément par les variations du coefficient de convection (figure 6.28), et cette non uniformité augmente avec l'augmentation de h_{conv} : les écarts de température entre les points A et E (respectivement dans un sillon et sur une crête) passent de 0.2 K pour $h_{conv}=5 \text{ W/m}^2.K$ à 0.8 K pour $h_{conv}=20 \text{ W/m}^2.K$. Notons toutefois que ces écarts paraissent faibles si l'on considère que pour obtenir 0.8 K de différence entre deux points du profil il faut augmenter le coefficient de convection d'un facteur 10.

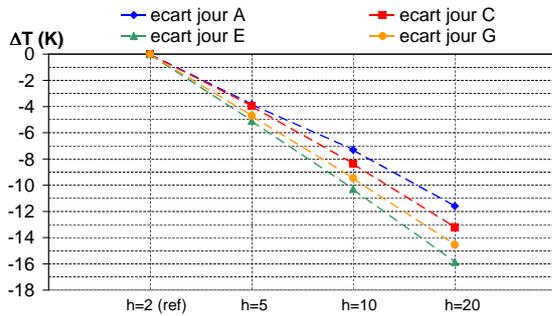


FIG. 6.29 – Coefficient de convection : écarts moyens diurnes pour les points A, C, E et G

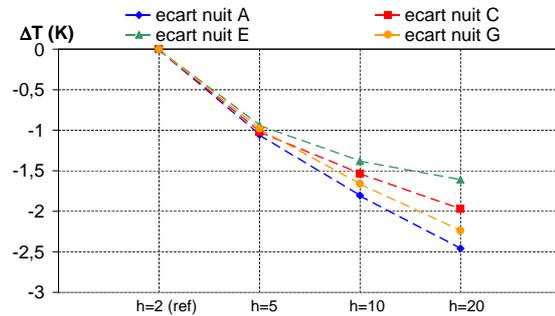


FIG. 6.30 – Coefficient de convection : écarts moyens nocturnes aux points A, C, E et G

La figure 6.29 montre que de jour les non uniformités de températures en surface augmentent entre les différents points lorsque le coefficient de convection augmente : les écarts les moins importants sont enregistrés au point A, c'est-à-dire dans un sillon : ce point passe d'un écart de -3.8 K pour $h_{conv}=5 \text{ W/m}^2.K$ à un écart de -11.6 K pour $h_{conv}=20 \text{ W/m}^2.K$. Au contraire, les écarts les plus importants sont enregistrés au point E, c'est-à-dire au sommet d'une crête : les écarts augmentent de -5.1 K pour $h_{conv}=5 \text{ W/m}^2.K$ à -15.9 K pour $h_{conv}=20 \text{ W/m}^2.K$. On a donc entre les points A et E pour les cas cités des écarts de températures allant de 1.3 K à 4.3 K.

La figure 6.30 montre que, comme de jour, pendant la nuit les non uniformités de températures en surface se creusent entre les différents points lorsque le coefficient de convection augmente : les écarts les plus importants sont enregistrés au point A, c'est-à-dire dans un sillon (de -1.1 K pour $h_{conv}=5 \text{ W/m}^2.K$ à -2.5 K pour $h_{conv}=20 \text{ W/m}^2.K$) tandis que les écarts les moins importants sont enregistrés au point E, sur une crête. Il y a entre les points A et E des écarts de températures allant de 0.2 K pour $h_{conv}=5 \text{ W/m}^2.K$ à 0.9 K pour $h_{conv}=20 \text{ W/m}^2.K$.

Notons que l'ordre des points est inversé entre le jour et la nuit : le point E est le plus influencé de jour et le moins influencé de nuit, et de manière symétrique le point A est le moins influencé de jour et le plus influencé de nuit.

Le point A est situé dans un sillon et le point E sur une crête. Pendant la période diurne, la température à la crête est supérieure à celle du sillon ; les gradients de température entre la surface et l'air sont donc plus importants à la crête, la convection y a par conséquent plus d'influence pendant le jour. Inversement, pendant la nuit la température à la crête est moins importante que celle dans le sillon, les gradients de température entre la surface et l'air sont plus importants dans le sillon, et c'est donc là que la convection a le plus d'influence. Cependant, la variabilité spatiale de la température de surface est moins importante pendant la nuit que pendant la journée (de nuit les gradients de température en surface sont nettement moins importants que de jour).

Le coefficient de convection tend donc à diminuer fortement les températures de surface. Il exerce une influence non négligeable sur la variabilité spatiale de la température de surface quelle que soit la période de la journée. Cette variabilité est toutefois plus importante de jour que de nuit. De plus, pendant la journée ce sont les crêtes qui sont les plus influencées par l'augmentation du coefficient de convection, alors que pendant la nuit ce sont les sillons qui sont les plus influencés.

6.1.7 Paramètres dominant la variabilité spatiale des températures de surface

Les cas de calcul sont résumés dans la table 6.7, dans laquelle chaque case représente un calcul. Le but est ici de déterminer quels paramètres influencent le plus la variabilité spatiale de la température de surface, c'est-à-dire trouver ceux qui creusent le plus les écarts entre les différents points du profil.

Paramètre d'entrée	Cas de référence	Variations					
		0.97 +5%	1 +2%	0.93 -2%	0.85 -10%	0.76 -20%	0.48 -50%
ε	0.95	0.97 +5%	1 +2%	0.93 -2%	0.85 -10%	0.76 -20%	0.48 -50%
a m ² /s	$4.51 \cdot 10^{-7}$	$2.12 \cdot 10^{-7}$ -50%	$2.65 \cdot 10^{-7}$ -40%	$3.61 \cdot 10^{-7}$ -20%	$3.98 \cdot 10^{-7}$ -10%	$5.41 \cdot 10^{-7}$ +20%	$6.77 \cdot 10^{-7}$ +50%
b J/m ² °C s ^{1/2}	772.4	863.6 -10%	919.7 +5%	946.1 +10%	1057.7 +20%	1126.4 +30%	1259.4 +50%
$\overline{T_{air}}$ K	288.25	283.25 -5 K (-2%)	293.25 +5 K (+2%)	$(T_{ampl}=7.9 \text{ K})$			
T_{ampl} K	7.9	0	12.9	$(\overline{T_{air}}=288.25 \text{ K})$			
V_{vent} m/s	0	0.5	5	10	20		
h_{conv}	calcul	2	5	10	20		

TAB. 6.7 – Les différents cas de calcul pour l'étude paramétrique des données physiques d'entrée de MISTRAL. Chaque case désigne un calcul

L'analyse de chaque paramètre ayant été faite dans les sections précédentes, il reste maintenant à ordonner ces paramètres par ordre d'importance. Ce classement va permettre de choisir les phénomènes prépondérants, qui peuvent constituer les variables d'entrée des modèles simplifiés

de variabilité de températures de surface.

Les écarts spatiaux (entre deux points du profil) maximaux sont résumés dans la table 6.8. Ces écarts sont rapportés pour les périodes diurnes et nocturnes, et classés par ordre décroissant. De plus, afin de comparer des "quantités comparables", pour chaque paramètre (émissivité, température de l'air, ...) on considère uniquement de petites variations autour de la référence. Cela correspond à $\pm 2\%$ pour l'émissivité, $\pm 10\%$ pour la diffusivité et l'effusivité, à une vitesse de vent de 0.5 m/s et à un coefficient de convection de $5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Pour la température de l'air, tous les cas testés sont considérés.

Paramètre d'entrée	écart spatial maximal de jour	écart spatial maximal de nuit
vitesse de vent V_{vent}	2 K	0.5 K
coefficient de convection h_{conv}	1.5 K	0.1 K
température d'air : T_{air}	1 K	0.5 K
T_{ampl}	0.5 K	0.5 K
émissivité ε	0.6 K	0 K
diffusivité a	0.4 K	0.2 K
effusivité b	0.2 K	0.2 K

TAB. 6.8 – Classement par ordre croissant des écarts spatiaux maximaux pour de petites variations des paramètres d'entrée de MISTRAL

Le regroupement de ces résultats met en évidence que globalement les écarts spatiaux en surface sont inférieurs de nuit. En effet, les contrastes en surface de la maquette sont très réduits la nuit par rapport à la journée, il est donc naturel que ces contrastes subissent des variations moins importantes. De jour comme de nuit, les paramètres météorologiques liés à la convection naturelle (température de l'air, coefficient de convection) et forcée (vitesse du vent) dominent fortement la variabilité spatiale des températures de surface. En effet c'est une petite variation de la vitesse du vent qui produit les écarts de température en surface les plus élevés, suivi de près par le coefficient de convection. Ces constatations restent vraies de nuit.

De faibles variations d'émissivité (la référence est de 0.95 et les cas référencés ci-dessus correspondent à $\varepsilon = 0.93$ et 0.97) entraînent de écarts spatiaux d'environ 0.6 K de jour. Dans le cas réel, ces variations d'émissivité peuvent être les variations angulaires de l'émissivité. Pour certains milieux, comme l'eau par exemple, l'émissivité est fortement directionnelle. Cette variabilité est donc loin d'être négligeable dans certains cas. Nous nous limitons ici à des surfaces lambertiennes, et par conséquent les variations directionnelles de l'émissivité ne sont pas considérées.

Les variations des propriétés thermiques du matériau (effusivité et diffusivité) s'avèrent être du second ordre par rapport à la convection, tant de jour que de nuit. Celles-ci peuvent engendrer des écarts en surface de 0.4 K pendant la journée, et des écarts moins importants (0.2 K) de nuit. Physiquement, une variation du contenu en eau des sols naturels peut provoquer une variation de l'effusivité et de la diffusivité, ce qui explique les variabilités constatées par [HMG82] entre autres sur des sols plats (section 2.3.1). Notre étude se limitant au cas des matériaux homogènes, les variations dues aux inhomogénéités intrinsèques des milieux ne sont pas considérées pour le moment.

Des facteurs identifiés comme prépondérants lors de l'étude bibliographique n'ont pas pu être étudiés comme les paramètres physiques d'entrée ci-dessus : ce sont le flux de rayonnement solaire et son angle d'incidence. En effet, il n'est pas possible, d'après l'architecture du code MISTRAL, de faire varier ces paramètres. En conséquence, les deux paragraphes qui suivent rapprochent ces deux facteurs des températures de surface pour établir un lien entre eux.

6.1.8 Influence du rayonnement solaire

Il n'est pas possible dans le code MISTRAL de faire varier les flux incidents. Par conséquent cette section ne montre pas, comme précédemment, l'effet de variations du flux sur les températures de surface, mais se contente de mettre en évidence l'influence de ce flux. En effet, lors de la campagne expérimentale, nous avons constaté que la température à la surface de la maquette semblait très liée, pendant la journée, au rayonnement solaire reçu. Pour cette raison, les figures 6.32 à 6.35 montrent, pour les points A, C, E, et G en surface de l'échantillon, l'évolution de la température de surface et celle du rayonnement solaire global (solaire direct + solaire diffus) calculé par MODTRAN.

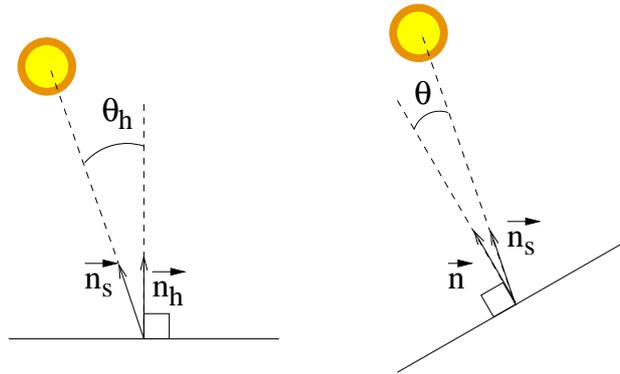


FIG. 6.31 – Définition des angles θ et θ_h

Pour les quatre points du profil le lever et le coucher du soleil sont des heures particulières : au lever du soleil, les températures commencent à augmenter de manière importante. À l'heure du coucher du soleil (autour de 18h ici), les températures de surface comportent un point d'inflexion, et leur diminution se fait plus "douce". De jour le rayonnement solaire atteignant la surface est donc prépondérant dans l'évolution des températures.

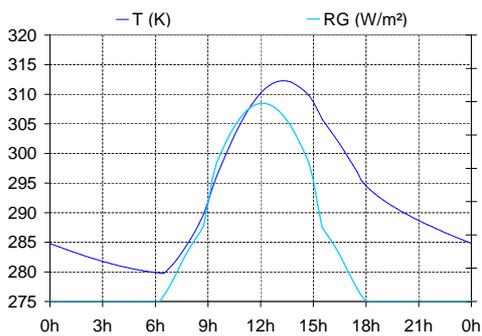


FIG. 6.32 – Température et rayonnement solaire global (solaire direct + solaire diffus) reçu au point A le 1er octobre 2002 — simulations MISTRAL

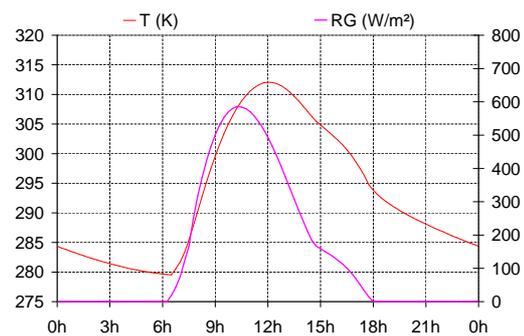


FIG. 6.33 – Température et rayonnement solaire global (solaire direct + solaire diffus) reçu au point C le 1er octobre 2002 — simulations MISTRAL

Pour poursuivre la présente analyse, les données et notations suivantes sont introduites. Soit \vec{n} le vecteur normal à la surface, et \vec{n}_s le vecteur solaire, dirigé du sol vers le soleil. Ces vecteurs nous permettent de définir l'angle θ l'angle entre \vec{n} et \vec{n}_s (voir figure 6.31). Dans le cas d'une surface horizontale, on note \vec{n}_h le vecteur normal, et θ_h l'angle entre \vec{n}_h et \vec{n}_s .

Le point E possède une normale locale verticale \vec{n}_h , assimilable à un sol plat. En ce point, le flux solaire global atteint son maximum à midi, au zénith du soleil. Le point A a également une normale locale verticale, et le flux solaire l'atteignant est donc pareillement maximum à midi. Cependant A est au creux d'un sillon ; par conséquent il est ombré par les flancs des crêtes adjacentes le matin jusqu'à 9h et l'après-midi à partir d'environ 15h. Ce phénomène est visible aussi bien sur la courbe de flux que sur le profil de température (figure 6.32) : la courbe de flux se "rétrécit" à ces heures, et la courbe de température présente un point d'inflexion.

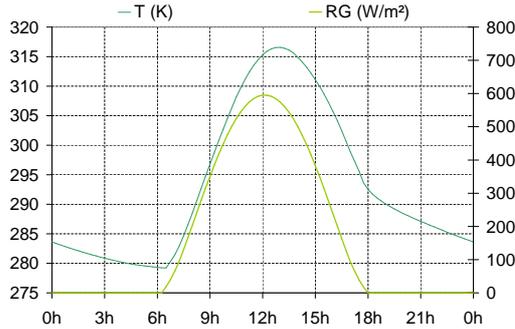


FIG. 6.34 – Température et rayonnement solaire global (solaire direct + solaire diffus) reçu au point E le 1er octobre 2002 — simulations MISTRAL

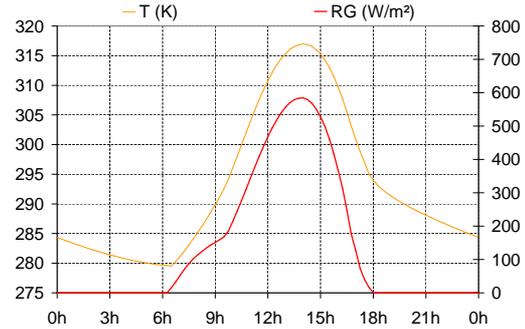


FIG. 6.35 – Température et rayonnement solaire global (solaire direct + solaire diffus) reçu au point G le 1er octobre 2002 — simulations MISTRAL

Pour les points C et G (figures 6.33 et 6.35, le maximum de flux est décalé temporellement : il a lieu à 10h30 pour le point C, et à 13h30 pour le point G. Ces décalages temporels sont dus au fait que l'angle θ entre la normale locale et le vecteur solaire est à son minimum à ces heures : aux points C et G à 10h30 et 13h30 respectivement, le soleil a la même incidence qu'à midi au point E. Notons également que, de la même manière, le maximum de température en ces points se décale temporellement, dans le même sens que les flux.

Ces résultats montrent donc la relation directe existant entre le flux solaire reçu en surface et la température de cette surface. Le décalage temporel du maximum de flux provoque un décalage temporel, dans le même sens, du maximum de température. Ce décalage temporel du flux solaire dépendant de l'orientation de la surface par rapport au soleil (angle θ), le paragraphe suivant tente de lier les variations spatiales de température de surface à cet angle θ .

6.1.9 Rôle de l'incidence solaire

Afin de mettre à jour la relation entre la température de surface en un point de la crête et l'angle d'incidence solaire en ce point, la température $T(x, t)$ calculée par MISTRAL dans les conditions du cas de référence est mise sous la forme suivante :

$$T(x, t) = b(x, t) \cdot T_{sol\ plat}(t) \quad (6.3)$$

où $T_{sol\ plat}(t)$ est la température de surface d'un sol plat horizontal, calculée par MISTRAL dans les mêmes conditions. Ainsi, $b(x, t)$ peut s'écrire :

$$b(x, t) = \frac{T(x, t)}{T_{sol\ plat}(t)} \quad (6.4)$$

La figure 6.36 montre l'évolution de $b(x, t)$ en fonction du temps pour quatre points du profil : les points A, C, E, et G. De nuit, cette fonction est proche de 1 pour tous les points : les contrastes en température ne sont pas très importants. Les points A et E possèdent tous deux la même normale \vec{n}_h , qui est la même que celle d'un sol plat horizontal. Toutefois la fonction $b(x, t)$ en ces deux points n'est pas égale à 1 pendant la journée : les températures en A et E sont différentes de celles d'un sol plat, signe de l'influence du relief environnant sur la température de surface. Par ailleurs, dans le cas du point A, des petites variations de la fonction $b(A, t)$ ont lieu autour de 8h45 et de 15h30, heures entre lesquelles le flux solaire direct atteint le point A (le soleil n'est plus masqué par les flancs des crêtes environnantes).

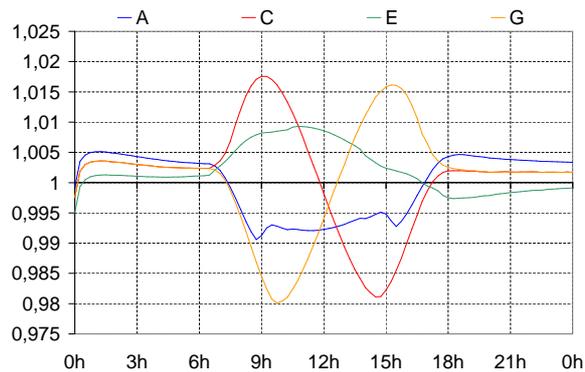


FIG. 6.36 – Fonction $b(x, t)$ pour quatre points de surface du profil

Les fonctions $b(x, t)$ pour les points C et G sont symétriques par rapport au midi solaire : la fonction $b(C, t)$ présente un maximum autour de 9h et un minimum vers 15h, tandis que $b(G, t)$ atteint son minimum autour de 9h et son maximum peu après 15h. Les fonctions $b(x, t)$ sont maintenant tracées avec la fonction $\theta(x, t)$ pour chaque point, afin de mettre à jour une relation entre ces deux fonctions (figures 6.37 à 6.40).

Le lien apparaissant entre la fonction $b(x, t)$ et l'angle $\theta(x, t)$ est évident sur les quatre figures. En effet, dès lors que l'angle θ est inférieur à 90° , c'est-à-dire que le flux solaire direct atteint le point, les valeurs de la fonction $b(x, t)$ varient brusquement. Dans les cas de A et de E (figures 6.37 et 6.39), la fonction $b(x, t)$ atteint son extremum (minimum pour A et maximum pour E) approximativement à l'heure où θ atteint son minimum. L'heure où θ est minimal correspond au moment où le soleil est le plus proche d'une incidence normale. S'il n'y avait pas de décalage du soleil en azimuth, cela reviendrait à un angle nul entre la normale à la surface \vec{n} et le vecteur solaire \vec{n}_s .

Pour le point C (figure 6.38), la fonction $b(C, t)$ est croissante à partir de l'heure du lever du soleil. Elle atteint sa valeur maximale à 9h, heure du minimum de θ , puis décroît jusqu'à 15h, heure à laquelle le soleil n'éclaire plus le point C ($\theta > 90^\circ$). La fonction $b(t)$ (figure 6.39) a un comportement symétrique de celui de $b(C, t)$: à partir du lever du soleil elle décroît jusqu'à ce que θ devienne supérieur à 90° . Elle commence ensuite à croître, jusqu'à 15h, heure où θ est minimal en ce point.

L'instant de changement de sens de variation des fonctions $b(x, t)$ apparaît donc comme intimement lié à l'instant où $\theta(x, t)$ prend des valeurs particulières (heure du minimum, et heures auxquelles le soleil est en incidence rasante). L'angle $\theta(x, t)$ est par conséquent un paramètre dominant dans la variabilité spatiale de la température de surface, et devra être pris en compte en tant que tel lors de la modélisation de cette variabilité.

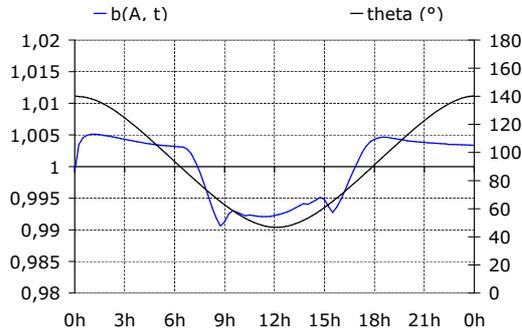


FIG. 6.37 – Fonction $b(x, t)$ et angle d'incidence $\theta(x, t)$ au point A du profil de surface en fonction du temps

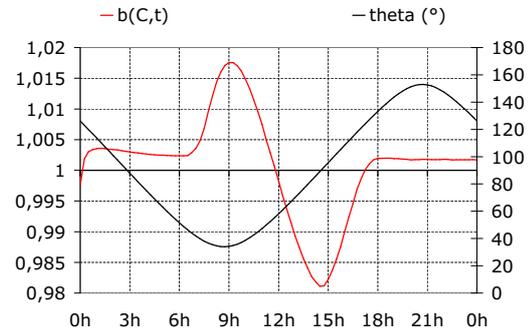


FIG. 6.38 – Fonction $b(x, t)$ et angle d'incidence $\theta(x, t)$ au point C du profil de surface en fonction du temps

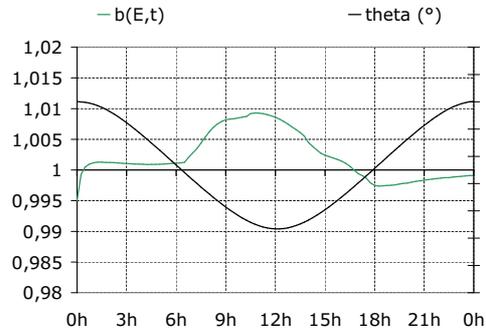


FIG. 6.39 – Fonction $b(x, t)$ et angle d'incidence $\theta(x, t)$ au point E du profil de surface en fonction du temps

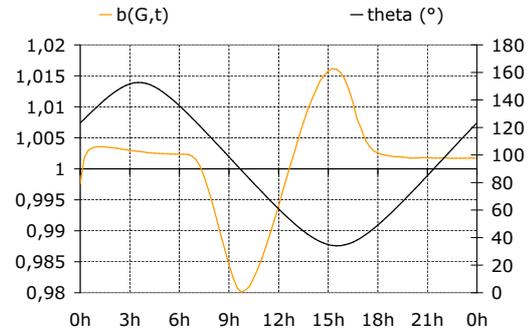


FIG. 6.40 – Fonction $b(x, t)$ et angle d'incidence $\theta(x, t)$ au point G du profil de surface en fonction du temps

6.2 Principe et mise en œuvre directe de la méthode ombre/soleil

L'objectif de ce chapitre est de modéliser de manière plus simple qu'avec un calcul 3D les phénomènes complexes ayant lieu à la surface d'un sol avec relief et conduisant à la variabilité, spatiale et temporelle, de la température de surface. L'étude bibliographique (chapitre 2) et l'étude paramétrique des données physiques d'entrée du code MISTRAL (section 6.1) nous ont permis d'identifier et d'ordonner par ordre d'importance les paramètres influant sur la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface pour un sol non plat.

Trois remarques, fondées sur la littérature, les expérimentations, et l'étude numérique avec le code MISTRAL, nous conduisent à proposer une approche simple pour la modélisation des températures de surface. L'état de l'art concernant la modélisation de la température de surface dans les codes de simulation (section 2.5) a révélé que cette température de surface est la plupart du temps calculée en considérant des échanges de chaleur monodimensionnels, perpendiculaires à la surface. Les résultats de la campagne expérimentale (section 4.5) ont montré que l'heure du maximum de température en un point est directement liée à l'orientation de ce point par rapport au soleil. Enfin, la validation du code MISTRAL a mis à jour en section 5.3 que les passages

d'un point ensoleillé à l'ombre sont critiques, en ce sens que ces changements d'exposition au rayonnement solaire direct induisent un changement de comportement thermique. À partir de ces constats, une approche appelée *méthode ombre/soleil* est développée, à partir d'une température "ombre" et d'une température "soleil". Une comparaison avec des simulations MISTRAL va alors nous permettre voir si cette approche permet de prédire correctement les températures de surface.

Cette section, après avoir rappelé le cas de calcul de référence, expose le principe de la méthode ombre/soleil. Ensuite, trois modélisations de la température de surface sont proposées, fondées sur cette méthode.

6.2.1 Cas de référence

Le code MISTRAL a été validé comme code de référence dans le chapitre précédent. C'est par conséquent lui qui va nous fournir, avec un calcul 3D, les températures $T(x, t)$ à reproduire. La configuration de calcul est la même que celle utilisée dans le chapitre précédent (section 5.3.1), c'est-à-dire :

- profil de surface sinusoïdale, d'amplitude 5.1cm et de distance crête à crête 17.7cm ;
- longueur : 53.1cm (soit trois crêtes), largeur : 40.3cm, hauteur : 10cm aux sillons, et donc 15.1cm aux crêtes ;
- axes des crêtes orientés Nord/Sud ;
- maillage : 97 points dans le sens longitudinal i , 26 points dans le sens transversal j , et 15 points, répartis linéairement, dans la profondeur k ;
- propriétés thermiques et optiques du matériau :
 - conductivité : 0.58 W/m^2 ;
 - capacité calorifique : 1.072 kJ/kg.K ;
 - masse volumique : 1139 kg/m^3 ;
 - émissivité de surface : 0.913.
- température de l'air calculée analytiquement selon l'équation 2.25, avec $T_{air \text{ moy}} = 288.25 \text{ K}$ et $T_{air \text{ ampl}} = 7.9 \text{ K}$ et vitesse du vent constante $V_{vent} = 1.51 \text{ m/s}$ (valeurs tirées des mesures météorologiques du 1er octobre 2002), ou bien utilisation des enregistrements météorologiques du 1er octobre rééchantillonnés sur 5mn ;
- calculs sur 2 jours de temps simulé (du 30 Septembre 2002 à 0h00 au 2 Octobre 2002 à 0h00) par pas de temps de calcul de 5 minutes, avec prise en considération du second jour uniquement (convergence numérique temporelle).

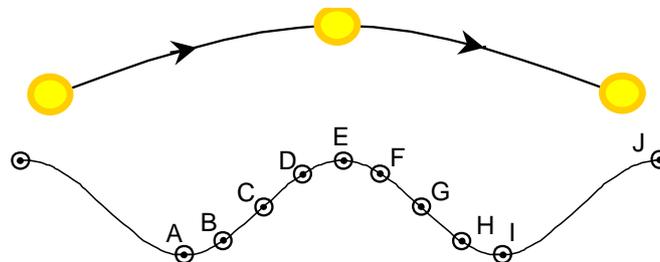


FIG. 6.41 – Position des points d'intérêt sur la crête centrale du motif étudié

Les figures 6.42 et 6.43 montrent les températures ainsi obtenues en quatre points de la surface de la crête centrale, les points A, C, E, et G (figure 6.41).

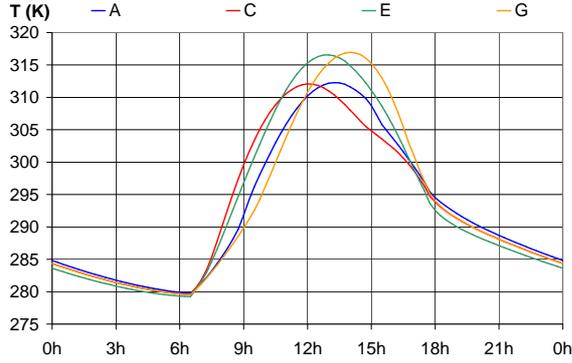


FIG. 6.42 – Températures en quatre points de la surface de la crête, calculées avec MIS-TRAL 3D pour le 1er octobre 2002, avec une température d'air analytique et une température de vent constantes

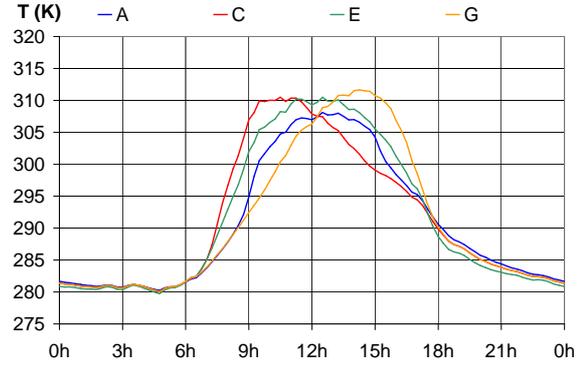


FIG. 6.43 – Températures en quatre points de la surface de la crête, calculées avec MIS-TRAL 3D pour le 1er octobre 2002, avec les conditions météorologiques de la campagne expérimentale

6.2.2 Principe de la méthode

La méthode ombre/soleil repose sur la transposition locale d'un modèle de sol "rugueux" avec relief à un modèle 1D (voir figure 6.44). Elle est fondée sur l'hypothèse que la température de surface T en un point x à l'instant t peut être retrouvée à partir de deux températures de surface $T_{ombre}(t)$ et $T_{soleil}(t)$ calculées pour des sols plats homogènes horizontaux situés respectivement à l'ombre et au soleil.

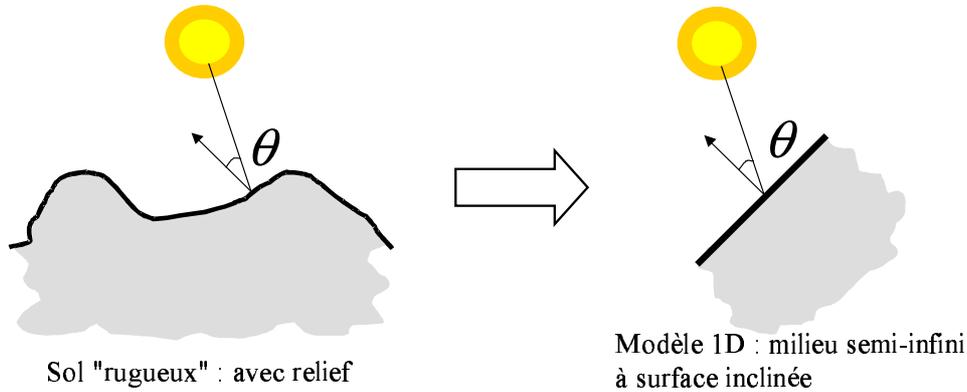


FIG. 6.44 – Transposition locale d'un modèle de sol avec relief à un modèle 1D

La température $T(x, t)$ est ensuite décomposée selon :

$$T(x, t) = T_{ombre}(t) + a(x, t) \cdot (T_{soleil}(t) - T_{ombre}(t)) \quad (6.5)$$

où $a(x, t)$ est la fonction à modéliser pour pouvoir prédire les températures de surface $T(x, t)$. La suite de cette section présente trois méthodes, fondées sur cette décomposition de la température.

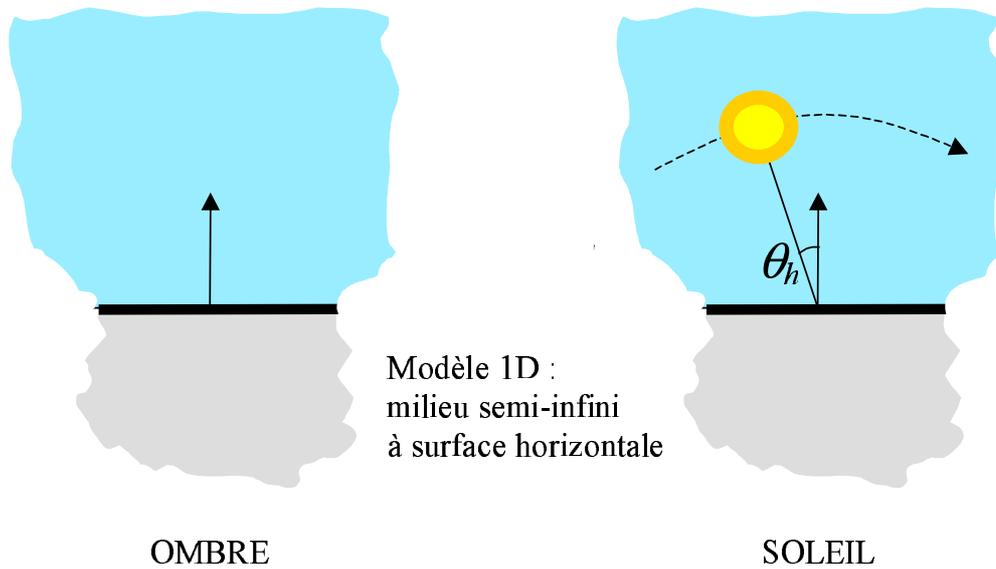


FIG. 6.45 – Définition des cas ombre et soleil

6.2.3 Calcul de $T_{soleil}(t)$ et $T_{ombre}(t)$ par le code MISTRAL

Pour le calcul des températures $T_{soleil}(t)$ et $T_{ombre}(t)$, les dimensions de l'objet et son maillage sont les mêmes que celles du cas de référence exposé en section 6.2.1, ainsi que les conditions météorologiques, thermiques et optiques; le calcul se déroule sur 2 jours simulés, par pas de temps de 15mn. Mais ce calcul s'effectue en 1D sur un sol plat horizontal (figure 6.45). Pour le calcul de $T_{ombre}(t)$ le flux solaire direct est mis à 0; le flux arrivant en surface est donc la somme du flux solaire diffus et du flux de fond de ciel. Pour $T_{soleil}(t)$ le flux arrivant en surface est évidemment la somme de ces trois flux (solaires direct et diffus, et fond de ciel).

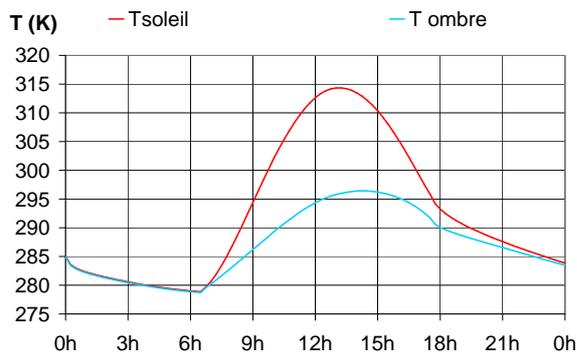


FIG. 6.46 – Températures $T_{soleil}(t)$ et $T_{ombre}(t)$ calculées par MISTRAL en 1D sur un sol plan horizontal pour le 1er octobre 2002 dans les conditions énoncées en section 6.2.3 avec une température d'air calculée analytiquement et une vitesse de vent constante

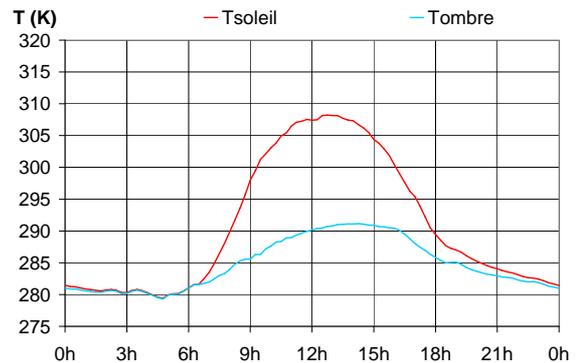


FIG. 6.47 – Températures $T_{soleil}(t)$ et $T_{ombre}(t)$ calculées par MISTRAL en 1D sur un sol plan horizontal pour le 1er octobre 2002 dans les conditions énoncées en section 6.2.3 avec les conditions météorologiques expérimentales

Les températures $T_{soleil}(t)$ et $T_{ombre}(t)$ sont représentées dans deux cas. Dans le premier (figure 6.46), la température d'air est calculée analytiquement et la vitesse de vent est constante (voir section 6.2.1). Dans le second cas (6.47), les conditions météorologiques correspondent aux données mesurées.

6.2.4 Décomposition de la température de surface sous forme binaire

Dans une première approche, la plus basique, la fonction $a(x, t)$ de l'équation 6.5 est considérée comme binaire, selon qu'à l'instant t le point x est situé au soleil ou à l'ombre. Dans ces conditions, $T_1(x, t)$ s'écrit :

$$\begin{aligned} a_1(x, t) = 0 &\Rightarrow T_1(x, t) = T_{ombre}(t) \\ a_1(x, t) = 1 &\Rightarrow T_1(x, t) = T_{soleil}(t) \end{aligned}$$

La fonction binaire $a_1(x, t)$ est calculée en fonction des normales locales \vec{n} , et de celles du vecteur solaire \vec{n}_s , ou plus précisément en fonction des angles θ et θ_h (voir figure 6.31) :

- $a_1(x, t) = 1$ si $\theta_h \in]-\pi/2; \pi/2[$ et $\theta \in]-\pi/2; \pi/2[$ (c'est-à-dire si le soleil est au-dessus de l'horizon et s'il n'est pas "derrière" la surface) ;
- $a_1(x, t) = 0$ sinon.

Les températures en surface d'une crête sont calculées avec ce modèle. Dans ce calcul, les températures aux quatre points considérés basculant de $T_{soleil}(t)$ à $T_{ombre}(t)$, leurs courbes sur la figure 6.48 sont confondues sur une grande portion du graphique.

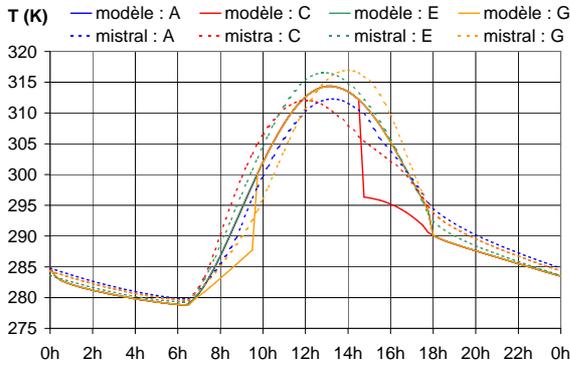


FIG. 6.48 – Températures en surface de la crête calculées avec le modèle ombre/soleil 1 (modèle binaire)

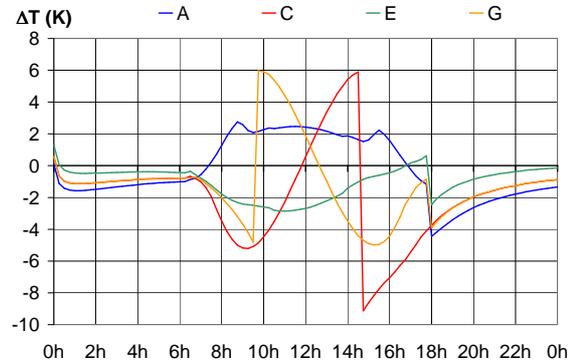


FIG. 6.49 – Écarts de températures en surface de la crête entre le modèle ombre/soleil 1 (modèle binaire) et les températures simulées avec MISTRAL

Dans cette approche, des points ayant la même normale \vec{n} vont avoir la même évolution de température. Ainsi, les points A et E ayant tous deux une normale verticale, leurs températures sont identiques. Il n'est en effet ici pas tenu compte des masquages solaires provoquant des ombres portées, et en conséquence la température au point A se comporte comme si le sol en ce point était horizontal. Par ailleurs, comme cela était prévisible, les températures connaissent de brusques variations au moment où les points changent d'exposition (ombre ou soleil). On voit en effet apparaître clairement l'heure à laquelle le point G passe de l'ombre au soleil : 9h30. De la même manière, le point C passe du soleil à l'ombre à 14h30.

Les écarts représentés figure 6.49 sont les différences entre les températures calculées avec le modèle et les mesures simulées avec MISTRAL dans les conditions du paragraphe 6.2.1.

De jour, les écarts de température sont importants quel que soit le point de surface. Ils sont particulièrement élevés pour les points C et G (respectivement 11 K et 15 K) aux heures où leur température passe brusquement de $T_{soleil}(t)$ à $T_{ombre}(t)$.

Ce modèle très simple permet une approche rudimentaire de la variabilité de la température de surface. Il n'est néanmoins pas suffisant pour reproduire de manière satisfaisante les variations spatiales de température. La fonction $a(x, t)$ doit en conséquence être améliorée.

6.2.5 Modélisation de la fonction $a(x, t)$

D'après l'équation 6.5 (section 6.2.2), la fonction $a(x, t)$ peut s'écrire de la manière suivante, pour les valeurs non nulles du dénominateur :

$$a(x, t) = \frac{T(x, t) - T_{ombre}(t)}{T_{soleil}(t) - T_{ombre}(t)} \quad (6.6)$$

Lors de l'analyse des résultats de la campagne expérimentale (section 4.5), il a été remarqué que, sur le profil sinusoïdal de surface étudié, à un instant t les températures de surface sont spatialement réparties selon une pseudo-sinusoïde dont le maximum se déplace au cours du temps de la face Est vers la face Ouest en suivant le déplacement du soleil. Nous voulons voir ici comment évolue la fonction $a(x, t)$ dans le cas particulier de la géométrie de la maquette, afin de tenter une généralisation à d'autres profils de surface, périodiques ou non. Le principe de ce deuxième modèle est donc de modéliser mathématiquement de manière simple cette fonction (équation 6.6), puis de calculer les températures $T_2(x, t)$ de surface par :

$$T_2(x, t) = T_{soleil}(t) + a_2(x, t) \cdot (T_{soleil}(t) - T_{ombre}(t)) \quad (6.7)$$

Pour cela, la fonction $a(x, t)$ est calculée pour tous les points de la surface d'après l'équation 6.6. La figure 6.41 montre cette fonction entre 6h30 et 18h pour quatre valeurs de x , correspondant aux points A, C, E, et G. Pour chaque point en surface, les courbes de $a(x, t)$ obtenues sont approchées par des polynômes d'ordre 2 notés $a_2(x, t)$ (figure 6.50) :

$$a_2(x, t) = p_2(x)t^2 + p_1(x)t + p_0 \quad (6.8)$$

Les coefficients p_0 , p_1 , et p_2 des polynômes sont regroupés en annexe I.

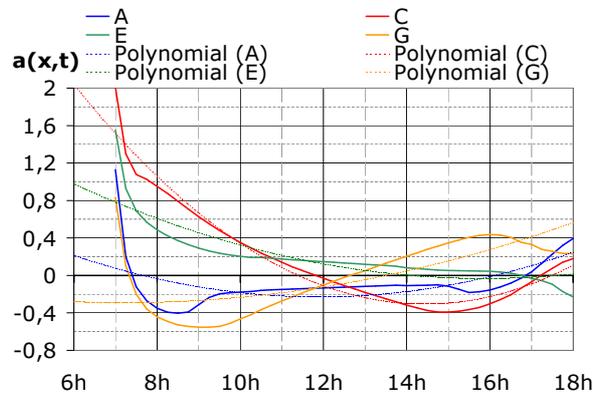


FIG. 6.50 – Fonctions $a_2(x, t)$ et leur approximation par des polynômes d'ordre 2 pour les points A, C, E, et G

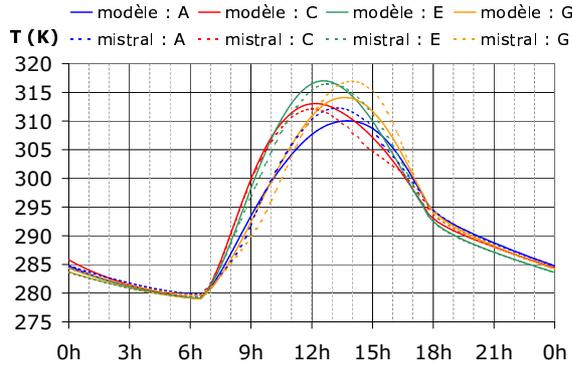


FIG. 6.51 – Températures en surface de la crête calculées avec la méthode ombre/soleil 2 (utilisant la fonction $a_2(x, t)$)

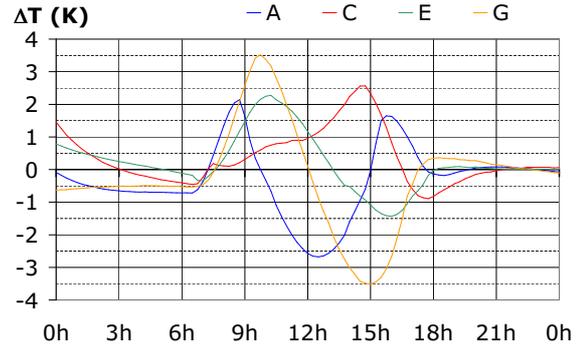


FIG. 6.52 – Écarts de températures en surface de la crête entre la méthode ombre/soleil 2 (utilisant la fonction $a_2(x, t)$) et les températures simulées avec MISTRAL

Les températures obtenues avec ce modèle (figure 6.51) sont d'allure très similaire aux températures de référence : contrairement au modèle précédent, la variabilité spatiale est bien mise en évidence. Les écarts entre le modèle et la température de référence 6.52 sont réduits d'un facteur 2 (on passe d'écarts maximaux d'environ 8 K à des écarts de 4 K).

Ce résultat est prometteur. Mais ce modèle, valable avec cette géométrie uniquement, doit être généralisé. La généralisation de ce modèle consiste à essayer d'identifier des lois de variation des coefficients des polynômes en fonction de l'abscisse du point ou de la pente locale en ce point. La figure 6.53 montre les coefficients p_0 , p_1 et p_2 en fonction de l'abscisse x sur le profil. Ces coefficients décrivent des fonctions proches de sinusoides, mais de périodes et d'amplitudes sans relation évidente avec celles du profil de surface.

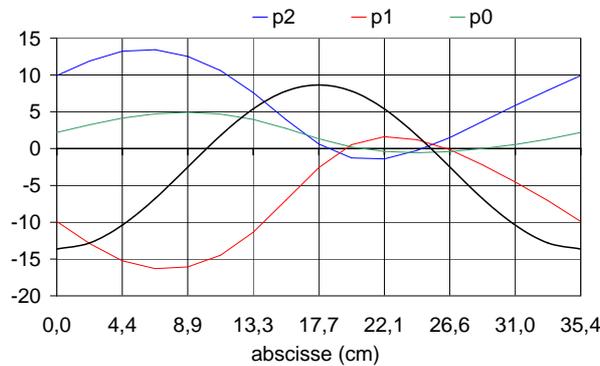


FIG. 6.53 – Evolution des coefficients p_0 , p_1 et p_2 de la fonction $a_2(x, t)$ en fonction de l'abscisse x

En vue d'identifier une relation éventuelle entre les coefficients du polynôme $a_2(x, t)$ au point d'abscisse x et la pente locale en ce point – c'est-à-dire la dérivée \dot{x} de la fonction analytique du profil de surface, les coefficients p_0 , p_1 et p_2 sont tracés sur la figure 6.54 en fonction de la dérivée normée (quotient de la dérivée locale et de la longueur de l'échantillon). La variation de ces coefficients n'est pas linéaire : pour une pente locale \dot{x} donnée il n'y a pas une seule valeur possible pour les coefficients, mais deux, ce qui rend la modélisation impossible.

Une dernière piste consiste à tracer les coefficients p_0 , p_1 et p_2 des polynômes $a_2(x, t)$ en fonction de la dérivée seconde \ddot{x} normée (figure 6.55). Cependant, comme ci-dessus, la variation des coefficients p_0 , p_1 et p_2 n'est pas linéaire.

La connaissance d'un seul de ces deux éléments (dérivée ou dérivée seconde) ne permet pas d'obtenir une valeur unique pour chaque coefficient du polynôme, mais la connaissance des deux éléments à la fois le permet. De plus, cette représentation par polynômes dépend uniquement de la fonction analytique représentant la surface. La connaissance de cette fonction permet le calcul de la dérivée et de la dérivée seconde, et dans le cas idéal aboutit à la détermination des coefficients du polynôme. L'avantage de cette méthode, si elle est généralisable, est qu'elle permet d'obtenir des polynômes différents pour les points A et E. En effet, ces deux points ont la même normale \vec{n}_h , mais ils n'ont pas la même dérivée seconde, ce qui permet de les distinguer.

Toute géométrie de surface de forme sinusoïdale ayant la même orientation que notre configuration doit a priori bien se prêter à cette modélisation par polynômes. Néanmoins, la fonction $a(x, t)$ ainsi modélisée reste en deux dimensions : telle qu'elle est écrite, elle ne comporte pas d'information concernant l'orientation (selon x , ou selon y) du profil. Ainsi, que ce dernier soit orienté Nord/Sud ou Est/Ouest ne modifie en rien les coefficients de $a_2(x, t)$. Pour que cette modélisation puisse être étendue à une orientation quelconque dans le plan (x, y) , il faudrait trouver un moyen d'ajouter cette information.

Il n'existe donc a priori pas de manière simple de déterminer les coefficients p_0 , p_1 et p_2 des polynômes $a_2(x, t)$. Par conséquent, l'idée d'approcher la fonction $a(x, t)$ de l'équation 6.5 par une fonction générale de la forme de $a_2(x, t)$ ne peut pas aboutir sous cette forme. Une dernière tentative de modélisation de la fonction $a(x, t)$ est réalisée dans la section suivante, en y introduisant l'angle θ entre la normale locale et le vecteur solaire.

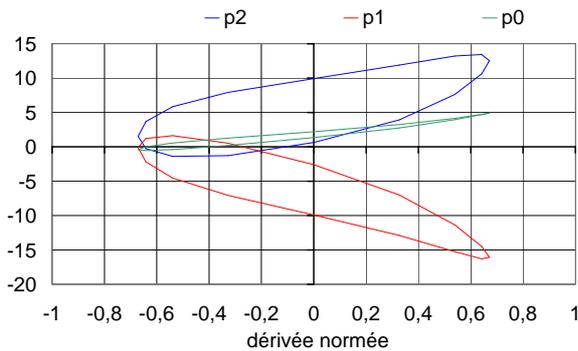


FIG. 6.54 – Evolution des coefficients p_0 , p_1 et p_2 de la fonction $a_2(x, t)$ en fonction de la pente \dot{x} au point d'abscisse x

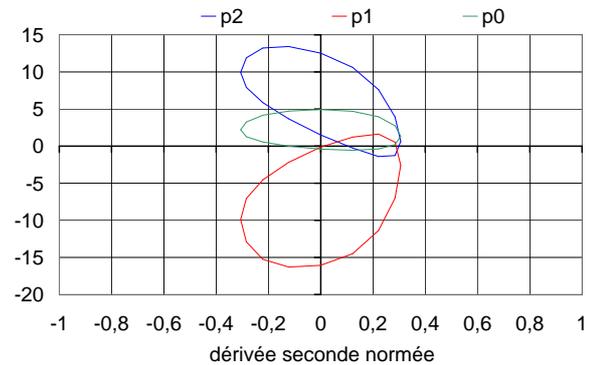


FIG. 6.55 – Evolution des coefficients p_0 , p_1 et p_2 de la fonction $a_2(x, t)$ en fonction de la dérivée de la pente \ddot{x} au point d'abscisse x

Remarque :

La même méthode a été appliquée en exprimant $a_2(x, t)$ sous la forme de polynômes de degré 3. Les conclusions dans ce cas de figure sont les mêmes que pour des polynômes de degré 2, par conséquent les résultats ne sont pas montrés ici. Le lecteur peut néanmoins se référer en annexe I.

6.2.6 Introduction du terme angulaire

Nous avons montré, dans la section 6.1.9, la relation existant entre la température de surface aux différents points de la crête et l'angle θ . Un terme dépendant de cet angle est par conséquent introduit dans la décomposition de la température de surface. Pour ce troisième modèle, la

fonction $a(x, t)$ de l'équation 6.5 est écrite sous la forme :

$$a_3(x, t) = \frac{\max(0, \cos \theta(x, t))}{\max(0, \cos \theta_h(t))} \quad (6.9)$$

La répartition de la température $T_3(x, t)$ sur la surface s'exprime alors par la relation :

$$T_3(x, t) = T_{ombre}(t) + \frac{\max(0, \cos \theta(x, t))}{\max(0, \cos \theta_h(t))} \cdot (T_{soleil}(t) - T_{ombre}(t)) \quad (6.10)$$

L'expression du coefficient $a_3(x, t)$ prend en compte la différence d'orientation entre une surface horizontale (θ_h) et une surface inclinée (θ) par rapport au soleil. Son dénominateur permet de retrouver, pour les sols plats horizontaux, les températures T_{soleil} et T_{ombre} .

Les températures calculées d'après l'équation 6.10 sont tracées sur la figure 6.56 pour les points A, C, E, et G. Elles reproduisent qualitativement le décalage temporel de la température pendant la journée. Dès que le soleil est couché (entre 18h et 6h), toutes les températures sont égales à T_{ombre} , ce qui provoque des "sauts" au moment où la température bascule à cette valeur.

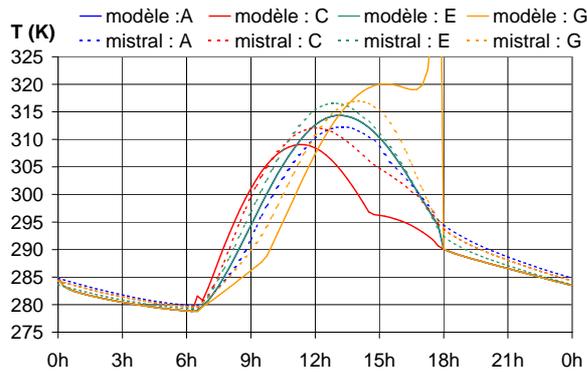


FIG. 6.56 – Températures en surface de la crête calculées avec le modèle ombre/soleil 3 (utilisant l'angle θ entre la normale locale et le vecteur solaire)

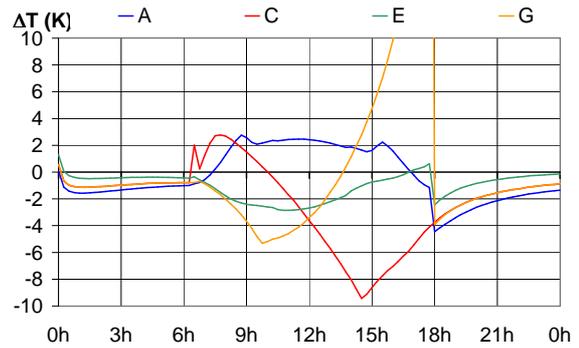


FIG. 6.57 – Écarts de températures en surface de la crête entre la méthode ombre/soleil 3 (utilisant l'angle θ entre la normale locale et le vecteur solaire) et les températures simulées avec MISTRAL

Comme pour le modèle 1, ce modèle obtient des températures identiques pour des points possédant la même normale locale. Il est donc normal que la température au point A soit confondue avec celle du point E. La température au point C augmente plus tôt qu'aux autres points, et commence également à diminuer plus tôt. Mais cette décroissance s'amorce vers 11h, alors qu'elle devrait avoir lieu autour de 12h. La température au point E est trop décalée temporellement le matin ; de plus, elle atteint son maximum (320 K) vers 15h30. Cette température est beaucoup trop élevée, et a lieu 1h30 plus tard que ne le prévoit MISTRAL. Ensuite, autour de 18h la température en E augmente démesurément. Cet "accident" est dû aux valeurs de la fonction $a_3(x, t)$ autour des heures de lever et de coucher du soleil.

En effet, lorsque l'incidence solaire est rasante, c'est-à-dire autour de 6h et de 18h, l'angle θ_h est proche de 90° et le dénominateur $f(\theta_h) = \max(0, \cos \theta_h(t))$ prend des valeurs très proches de 0 (courbe du point E sur la figure 6.58). Au contraire, pour le point C, à 6h, l'angle θ est proche de 45° , tout comme pour le point G avant 18h. Ces forts écarts provoquent des valeurs très élevées de la fonction $a(x, t)$ autour de 6h et 18h (figure 6.59).

À cause des valeurs élevées de $a(E, t)$ avant 18h, la température au point E s'élève beaucoup entre 16h30 et 17h45. Or ce phénomène n'a pas lieu autour du lever de soleil au point C, alors que

$a(C, t)$ admet des valeurs élevées. Ceci est dû au fait que la fonction $a(x, t)$ est multipliée par la différence $T_{soleil} - T_{ombre}$. Cette différence est très faible avant 6h (moins de 0.3 K), et annule de ce fait l'influence des fortes valeurs de $a(C, t)$.

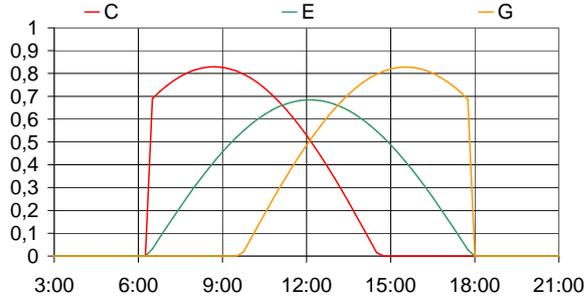


FIG. 6.58 – Evolution de la fonction $f(\theta) = \max(0, \cos \theta(x, t))$ en trois points de surface de la crête

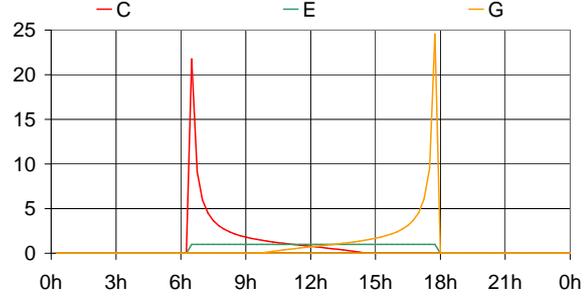


FIG. 6.59 – Evolution de la fonction $a_3(x, t) = \max(0, \cos \theta(x, t)) / \max(0, \cos \theta_h(t))$ en trois points de surface de la crête

Remarque :

Afin de supprimer les très grandes variations de température avant 18h pour les points situés sur la face Ouest de la crête, un facteur F limitant les valeurs de $a_3(x, t)$ est introduit, et la température s'écrit :

$$T_{3b}(x, t) = T_{ombre}(t) + \min(F, a_3(x, t)) \cdot (T_{soleil}(t) - T_{ombre}(t))$$

où $F = 1.5$. Les températures et écarts obtenus dans ce cas sont tracés sur les figures 6.60 et 6.61. L'introduction du *facteur d'écrétage* F limitant les valeurs de $a_3(x, t)$ à 1.5 réduit de manière très significative les écarts au point E : au lieu de dépasser les 20 K autour de 18h, ils sont au maximum de 3 K pendant l'après-midi. Les écarts au point C sont légèrement modifiés le matin. Ils ne sont pas affectés aux points A et E, ce qui est normal puisque la fonction $a_3(A, t)$ est égale à 1 entre le lever et le coucher du soleil .

Même si les écarts de température obtenus de cette manière sont notablement améliorés pour les points orientés à l'Ouest, les écarts pour les points orientés Est ne sont pas réduits. Il reste donc à optimiser le facteur F en fonction de x . Or la valeur utilisée ici n'a pas de signification physique, et à ce jour nous n'avons pas trouvé de relation simple entre $F(x, t)$ et les différents paramètres géométriques et temporels du problème (dérivées première et seconde de la pente, angle θ).

Au vu de ces résultats, l'utilité de l'introduction du terme dépendant de l'angle θ dans l'expression de la température est évidente : elle permet de reproduire le décalage temporel des profils de température. Mais quantitativement, des écarts importants subsistent entre les températures modélisées et la référence. L'introduction d'un *facteur d'écrétage* permet de réduire ces écarts, mais ce facteur n'est pas aisément modélisable. Il semble donc que la solution en température ne puisse s'exprimer simplement par une fonction analytique. Cette voie est par conséquent mise de côté. La section suivante reprend l'expression de la température de l'équation 6.10, et propose une résolution par passage dans le domaine de Fourier.

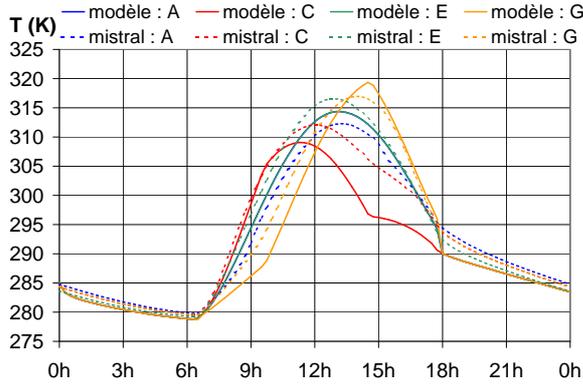


FIG. 6.60 – Températures en surface de la crête calculées avec le modèle ombre/soleil 3 modifié (utilisant l'angle θ entre la normale locale et le vecteur solaire)

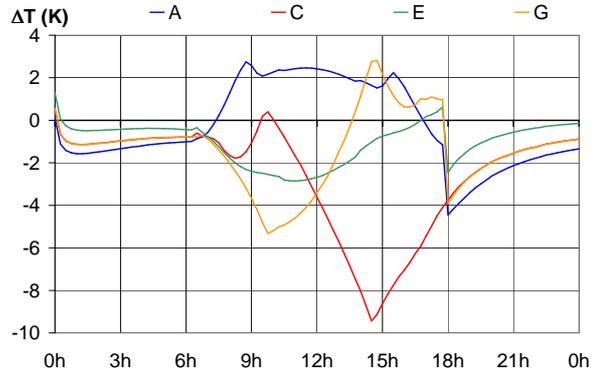


FIG. 6.61 – Écart de températures en surface de la crête entre la méthode ombre/soleil 3 modifié (utilisant l'angle θ entre la normale locale et le vecteur solaire) et les températures simulées avec MISTRAL

6.3 Approche quadripolaire adaptée à la méthode ombre/soleil

Les modélisations de la température $T(x, t)$ exposées dans la section précédente n'ont pas permis de prédire avec suffisamment de précision les températures réelles (correspondant à notre cas de référence, section 6.2.1, calculé par MISTRAL).

Le dernier modèle, présenté en section 6.2.6, est néanmoins arrivé à reproduire le décalage temporel du profil de température grâce à l'introduction d'un terme dépendant de l'orientation de la surface par rapport au soleil. Nous proposons dans cette section une approche, toujours fondée sur le principe de la méthode ombre/soleil (section 6.2.2), et qui consiste donc à estimer le champ de température $T(x, t)$ à partir des deux températures T_{ombre} et T_{soleil} . Cette approche part de l'application de la méthode des quadripôles au cas d'un sol homogène, puis l'adapte à la méthode ombre/soleil. Après la présentation du principe de cette nouvelle approche, son application est comparée aux températures de référence calculées par MISTRAL. Une amélioration de cette méthode est ensuite proposée puis mise en œuvre.

6.3.1 Principe de l'approche quadripolaire

Par analogie au domaine de l'électricité, la conduction dans un matériau en régime stationnaire peut être décrite sous forme de résistance thermique. En régime instationnaire, un milieu conducteur est décrit par la notion de quadripôle thermique, introduite par Carslaw et Jaeger dans [CJ59]. L'annexe J détaille les différentes étapes de cette approche quadripolaire.

Considérons un matériau à M couches d'épaisseurs l_m , d'effusivités b_m et de diffusivités a_m (voir figure 6.62). Ce matériau est soumis à une sollicitation périodique. Le coefficient d'échange à la surface h est supposé constant (linéarisation des pertes radiatives et convectives : $h = h_{ray} + h_{conv}$), et la température de l'air T^{air} variable. Les transferts conductifs sont supposés 1D.

Soit T la température et Φ le flux, et T_n et Φ_n leurs transformées de Fourier à une pulsation ω_n . Alors dans l'espace de Fourier, le vecteur [température flux] à la surface (indice 0) est relié au vecteur [température flux] à la "sortie" (indice s) des M couches du système par :

$$\begin{pmatrix} T_n \\ \Phi_n \end{pmatrix}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ h & 1 \end{pmatrix} \prod_{m=1, M-1} \begin{pmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_n \\ \Phi_n^{cond} \end{pmatrix}_s \quad (6.11)$$

où $\Phi_n = P_n + h T_n^{air}$, et le quadripôle $\begin{pmatrix} A_m & B_m \\ C_m & D_m \end{pmatrix}$ est fonction de b_m , a_m , l_m et ω_n .

Dans le cas d'un sol homogène (une seule couche d'effusivité b), cela conduit à la relation suivante entre la température de surface et le flux à la pulsation ω_n :

$$T_n = \frac{P_n + h T_n^{air}}{L + L \sqrt{\dots}} \quad (6.12)$$

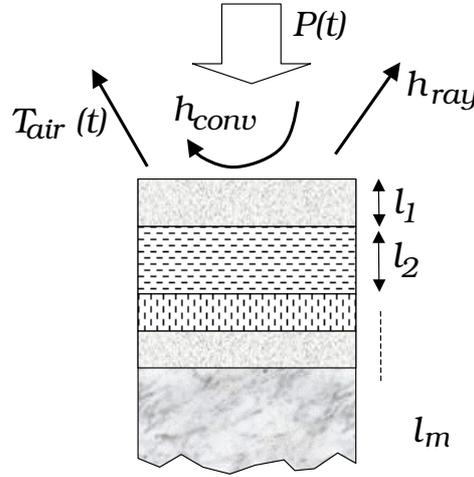


FIG. 6.62 – Configuration du cas multicouche pour la résolution du transfert conductif 1D par approche quadripolaire

6.3.2 Adaptation à la méthode ombre/soleil

L'hypothèse est faite ici que le flux radiatif absorbé a deux origines : un terme directionnel $P_d f(\theta)$, et un terme non-directionnel $P_{hem}(t)$ (*hem* pour "hémisphérique") qui peut dépendre du temps. La transformée de Fourier (TF) de la température de surface à la pulsation ω s'exprime alors par :

$$\bar{T} = \frac{P_d \overline{f(\theta)} + \overline{P_{hem}} + h \overline{T_{air}}}{h + b \sqrt{i \omega}} \quad (6.13)$$

La barre supérieure indique dorénavant la TF. $f(\theta)$ est la fonction de pondération angulaire appliquée au flux radiatif directionnel qui est absorbé localement par la surface non plane. Cette fonction doit évidemment permettre de retrouver $T = T_{soleil}$ dans le cas d'un sol horizontal, et par conséquent être égale à 1 lorsque $\theta = \theta_h$.

La fonction $f(\theta)$ fait intervenir $\max(0, \cos \theta)$; elle doit également intégrer la notion d'occultation par les surfaces voisines. Ces occultations ne peuvent être gérées que par des techniques

de lancer de rayon, qui sont coûteuses en temps de calcul. En conséquence, dans une première approche elles ne sont pas prises en compte.

Pour éviter le produit de convolution dans l'espace de Fourier dû au produit de deux termes dépendant du temps, il faut pouvoir supposer que le flux radiatif directionnel P_d est constant. Il est vrai que l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons solaires dépend du temps, ce qui contribue à atténuer le flux P_d juste après le lever du soleil et juste après son coucher. Dans un premier temps, ce phénomène est négligé.

La source d'énergie non directionnelle P_{hem} peut, quant à elle, être variable au cours de la journée. Elle doit néanmoins être indépendante du point d'analyse sur le terrain "rugueux". Ce flux radiatif absorbé doit notamment être indépendant de la pente locale.

6.3.2.1 Séparation du flux radiatif

Clarifions maintenant la séparation entre les termes $P_d f(\theta)$ et $P_{hem}(t)$, notamment en ce qui concerne l'affectation du flux solaire diffus. La contrainte de la méthode proposée est qu'une partie du flux absorbé localement s'exprime par le produit d'un terme constant P_d et d'une fonction qui ne dépend que de l'angle θ entre la normale et la direction solaire pour un calcul à 12h. Par ailleurs, le complément P_{hem} doit être le même pour tous les points de la surface.

Si le flux solaire diffus est très directionnel, il faut l'intégrer à P_d . Si au contraire il est plutôt isotrope (légère couverture nuageuse), il faudrait plutôt l'intégrer à P_{hem} .

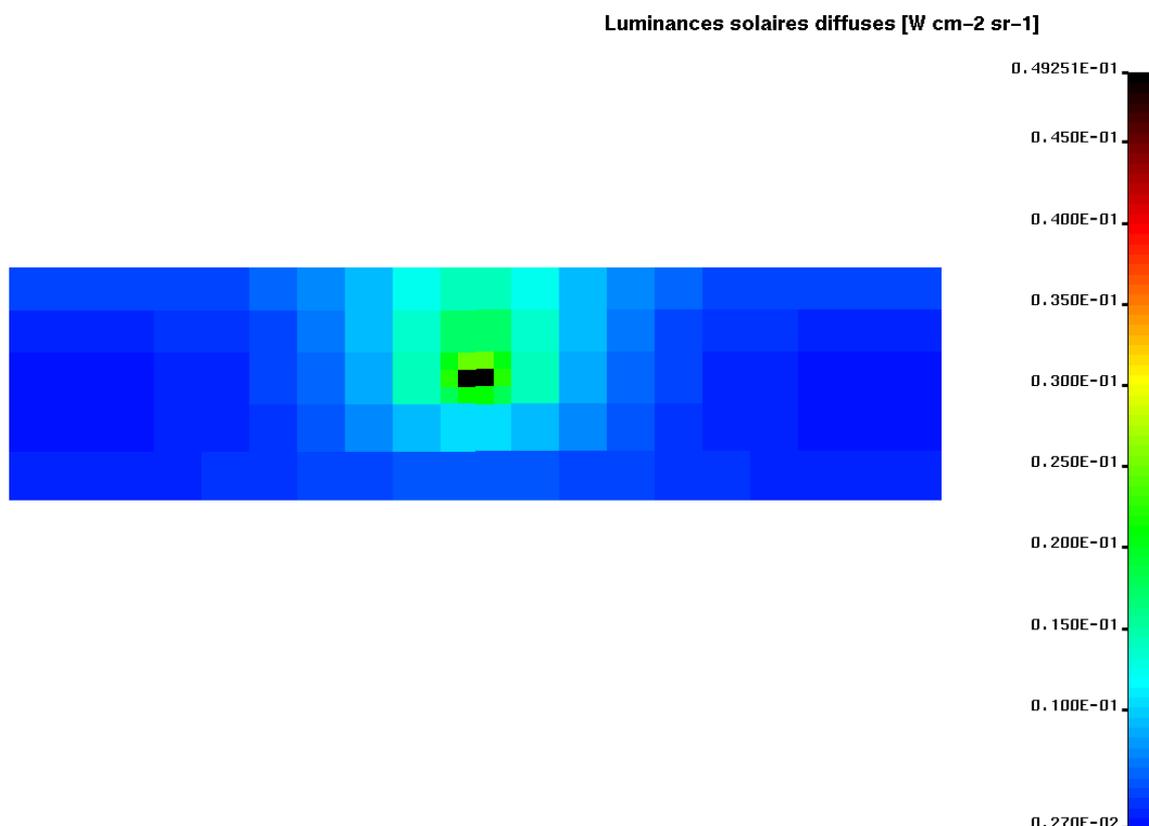


FIG. 6.63 – Hémisphère "déplié" : luminance solaire diffuse à 12h le 1er octobre 2002 – calcul MODTRAN

Une étude ONERA du comportement du code MODTRAN a permis de montrer que par temps clair le flux solaire diffus comporte une forte composante directionnelle (figure 6.63). Le flux solaire diffus issu d'une zone de l'hémisphère hors de la région de la direction solaire est environ dix fois inférieur à celui provenant de la direction solaire à 12h. En conséquence, la part non directionnelle approchée est prise égale à 10% du flux solaire diffus, et les flux P_d et P_{hem} s'obtiennent de la manière suivante :

$$P_d = P_{solaire\ direct} + 0.9 \times P_{solaire\ diffus} \quad (6.14)$$

$$P_{hem} = 0.1 \times P_{solaire\ diffus} + P_{fond\ de\ ciel} \quad (6.15)$$

6.3.2.2 Expression de la température en fonction de $T_{soleil}(t)$ et $T_{ombre}(t)$

On suppose maintenant que les variations en température sur 24h d'un sol plan horizontal exposé au soleil ou placé à l'ombre sont connues. Les températures obtenues sont respectivement $T_{soleil}(t)$ et $T_{ombre}(t)$. L'angle d'incidence de la source directionnelle sur cette surface horizontale est θ_h . On a donc les deux relations :

$$\overline{T_{soleil}(t)} = \frac{P_d \overline{\max(0, \cos \theta_h)} + \overline{P_{hem}} + h \overline{T_{air}}}{h + b\sqrt{i} \omega} \quad (6.16)$$

$$\overline{T_{ombre}(t)} = \frac{\overline{P_{hem}} + h \overline{T_{air}}}{h + b\sqrt{i} \omega} \quad (6.17)$$

La température recherchée \overline{T} peut être exprimée en fonction des TF des deux températures exploitées $\overline{T_{soleil}}$ et $\overline{T_{ombre}}$:

$$\overline{T} = (\overline{T_{soleil}} - \overline{T_{ombre}}) \frac{\overline{\max(0, \cos \theta)}}{\overline{\max(0, \cos \theta_h)}} + \overline{T_{ombre}} \quad (6.18)$$

Finalement :

$$T(t) = TF^{-1} \left\{ (\overline{T_{soleil}} - \overline{T_{ombre}}) \frac{\overline{\max(0, \cos \theta)}}{\overline{\max(0, \cos \theta_h)}} \right\} + T_{ombre}(t) \quad (6.19)$$

En pratique, les hautes fréquences vont devoir être exclues, du moins celles pour lesquelles $\max(0, \cos \theta)$ s'approche trop près de 0 (voir la méthode proposée en section 6.3.4).

La relation 6.18 est le pendant, dans le domaine de Fourier, de la formulation 6.10 dans la section 6.2.6. Le fait de travailler dans le domaine de Fourier permet de prendre en compte implicitement et *rigoureusement* l'effet de diffusion thermique 1D dans le matériau et les déphasages associés qui, autrement, sont plutôt difficiles à appréhender (voir les modélisations "directes" de la température dans la section 6.2).

La relation 6.19 est exacte lorsque les hypothèses de départ sont vérifiées et lorsque la séparabilité du flux absorbé en flux directionnel et flux hémisphérique existe. Dans le cas réel où le coefficient d'échange h n'est pas constant et où la séparabilité de la puissance absorbée en $P_d f(\theta)$ et $P_{hem}(t)$ n'est pas parfaite, cette relation doit néanmoins fournir une bonne approximation de la température réelle. C'est a priori le mieux que l'on puisse faire dans l'hypothèse 1D.

6.3.3 Première application

Des essais de la technique proposée précédemment se sont révélés insatisfaisants. Les courbes de température calculées aux différents points du terrain de profil sinusoïdal sont affectées d'importantes oscillations (figure 6.64), sans relation avec le comportement attendu. L'apparition de cet artefact provient de la division, dans l'équation 6.19, par $\max(0, \cos \theta_h)$. Ce terme s'avère prendre des valeurs très faibles pour les fréquences temporelles élevées. Le contenu fréquentiel de la fonction $\max(0, \cos \theta_h)$ qui a été utilisée est en fait trop pauvre pour l'exploitation recherchée.

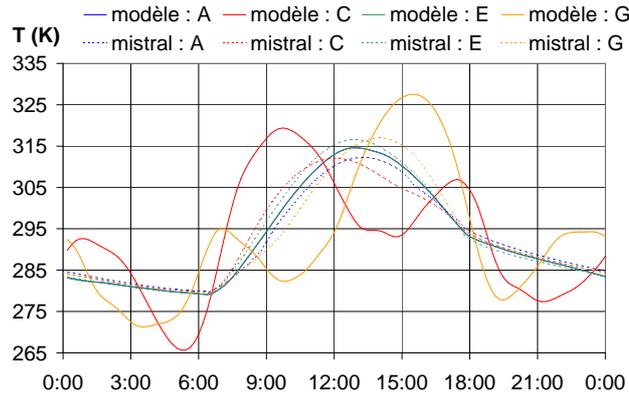


FIG. 6.64 – Températures calculées avec la méthode ombre/soleil II

6.3.4 Amélioration de la méthode ombre/soleil

La méthode ombre/soleil cherche en fait à calculer la température en un point quelconque d'une surface "rugueuse" par une combinaison des deux seules températures T_{soleil} et T_{ombre} . Ces deux températures doivent pouvoir refléter simultanément les effets d'ombrage (effet instantané d'une variation du flux radiatif absorbé) et les effets de diffusion thermique dans le sol (influence sur la dynamique de température d'une variation du flux radiatif absorbé). Certains points du profil sont soumis à des variations brutales du flux absorbé, en particulier le flanc Est (point C) en milieu de matinée et le flanc Ouest (point G) en milieu d'après-midi. Or T_{soleil} traduit les variations de température d'un sol plan induites par une variation du flux qui est relativement "molle" (figure 6.58). De fait, la fonction sinusoïdale tronquée présente un contenu fréquentiel assez pauvre.

6.3.4.1 Principe

Idéalement, il faudrait que la transformée de Fourier $\overline{T_{soleil}}$ permette de renseigner sur la fonction de transfert thermique du sol, c'est-à-dire la réponse du sol pour une sollicitation de flux à n'importe quelle fréquence. Avec cette information, on pourrait reproduire les évolutions aussi bien lentes que rapides de la température des différents points du sol "rugueux". Dans cet objectif, il faut revoir la définition de l'expérience ombre/soleil. Dans cette nouvelle démarche, le flux solaire directionnel doit être brusquement modifié, d'un facteur connu, plusieurs fois dans la journée. Par ces variations brusques du flux absorbé, le comportement thermique du sol aux fréquences élevées peut alors se révéler.

Dans l'esprit où les températures T_{soleil} et T_{ombre} devraient être obtenues expérimentalement, la nouvelle expérience "soleil" pourrait consister à bloquer par intermittence une fraction

du rayonnement solaire directionnel (rayonnement solaire direct plus la part directionnelle du rayonnement diffus). Ceci pourrait être réalisé au moyen d'un masque ajouré laissant passer une fraction du rayonnement incident. En revanche, s'il s'agit d'évaluer les températures T_{soleil} et T_{ombre} numériquement, rien n'interdit a priori de pondérer le flux solaire directionnel par un facteur quelconque, notamment supérieur à 1.

En règle absolue, si les hypothèses suivantes :

- échanges radiatifs et convectifs linéaires ;
- coefficient d'échange constant ;
- flux solaire directionnel constant.

qui ont servi à élaborer les formules ombre/soleil pour le calcul de la température d'un sol rugueux étaient valides, on pourrait, pour "construire" la température T_{soleil} , remplacer $\max(0, \cos \theta_h)$ par une fonction quelconque $g(t)$. Celle-ci pourrait même être non nulle la nuit. Le seul objectif à rechercher serait que le contenu fréquentiel de $g(t)$ soit "riche". L'obtention de T_{soleil} consisterait en fait à appliquer à une surface plane horizontale un flux $P_d g(t)$ où $g(t)$ serait à optimiser.

Néanmoins, les trois hypothèses précédentes ne sont pas satisfaites dans la réalité, et par conséquent on ne peut pas se permettre de pondérer le flux solaire directionnel par une fonction quelconque. La non-linéarité des échanges fait que l'on ne doit pas trop s'écarter des niveaux de température rencontrés dans la réalité ($g(t)$ doit rester de l'ordre de $\max(0, \cos \theta_h)$). Le fait que le flux solaire directionnel P_d évolue avec le temps (il est plus faible tôt le matin et tard dans l'après-midi) incite à ne donner à la fonction $g(t)$ la valeur nulle à aucun temps t , excepté lorsque $\max(0, \cos \theta_h)$ est lui-même nul. En effet, si $g(t)$ est annulée dans un certain intervalle temporel, l'information sur P_d dans cet intervalle est perdue, et le champ de température calculé sera inévitablement erroné. Il est aussi vrai que si P_d évolue avec le temps, le champ de température calculé par la méthode ombre/soleil ne pourra pas être exact car l'hypothèse d'un flux constant est à la base de la formulation développée.

Le paragraphe suivant montre l'application de ces principes, pour laquelle la fonction $g(t)$ prend plusieurs formes.

6.3.4.2 Applications

À l'appui des considérations précédentes, nous cherchons maintenant à optimiser la fonction de pondération $g(t)$ du flux solaire directionnel pour la construction de la température T_{soleil} . Les résultats qui sont présentés par la suite sont fondés sur le protocole suivant : le flux solaire direct est atténué d'un pourcentage pc , par intervalles réguliers de 15mn, 30mn, 1h ou 2h.

Orientation Nord/Sud

Dans une première application, l'orientation Nord/Sud de l'axe des crêtes est conservée. La fonction de la figure 6.65, qui filtre 50% du flux solaire direct par intervalles de 30mn entre le lever et le coucher du soleil, permet d'obtenir la fonction $g_1(t)$ (figure 6.65).

L'évolution de la température d'un sol plan à l'ombre et d'un sol plan au soleil (avec le filtrage intermittent) est rapportée sur la figure 6.67. Le code MISTRAL en 1D a été utilisé pour ces calculs.

Par opposition aux hypothèses qui ont été nécessaires au développement de la formulation ombre/soleil (équations 6.13 à 6.19), des conditions plus proches de la réalité sont prises en compte :

- coefficient d'échange dépendant du temps au lieu d'être constant, car dépendant de la vitesse du vent et de la température locale instantanée (échanges radiatifs et convectifs non linéaires) ;
- flux solaire direct dépendant du temps au lieu d'être constant.

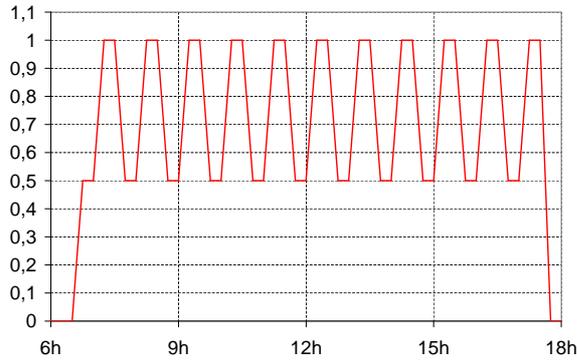


FIG. 6.65 – Fonction de filtre pour le flux solaire direct entre le lever et le coucher du soleil

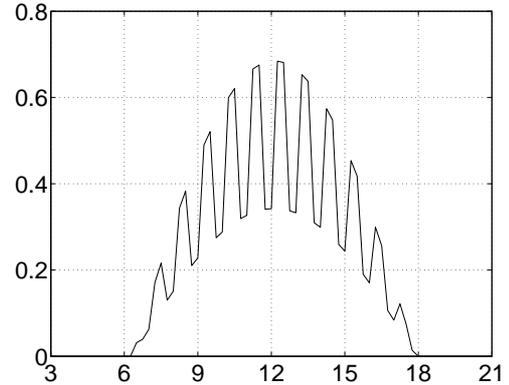


FIG. 6.66 – Fonction de pondération $g_1(t)$: cosinus de l'incidence pour le rayonnement solaire direct sur un sol horizontal

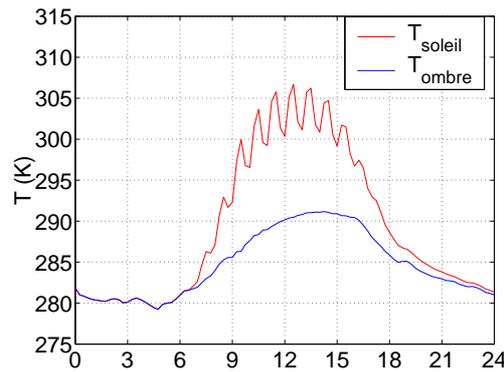


FIG. 6.67 – Température d'un sol horizontal à l'ombre et au soleil avec filtrage de 50% du flux solaire direct par intervalles de 30mn entre le lever et le coucher du soleil

L'application de la relation 6.19 aux différents points du profil sinusoidal fournit les courbes de température de la figure 6.70. Ces températures présentent de fortes oscillations à haute fréquence, notamment entre 9h et 12h pour le point C et entre 21h et 0h pour le point E. Ces oscillations parasites disparaissent dès lors que les hautes fréquences (celles pour lesquelles $\max(0, \cos \theta)$ s'approche trop près de 0) sont exclues. De plus, une étude paramétrique de la fonction de filtrage intermittent du flux solaire direct a été menée, avec quatre pourcentages d'atténuation (20%, 40%, 50% et 70%), appliqués par intervalles réguliers de 15mn, 30mn, 1h ou 2h. Cette étude a montré deux choses. En premier lieu, un pourcentage d'atténuation trop faible (inférieur à 40%) du flux n'empêche pas les oscillations de la solution, et ne permet donc pas de refléter les effets de diffusion thermique dans le sol. En second lieu, l'atténuation du flux solaire par intervalles de 15 ou 30 minutes fait également osciller la solution : il faut au moins des intervalles d'une heure pour pallier ce problème.

En conséquence, le pourcentage de masquage du flux solaire direct est fixé à 50%, entre le lever du soleil et 10h, puis une nouvelle fois entre 13h et 15h. La nouvelle fonction de pondération et les températures T_{soleil} et T_{ombre} correspondantes sont tracées sur les figures 6.68 et 6.69.

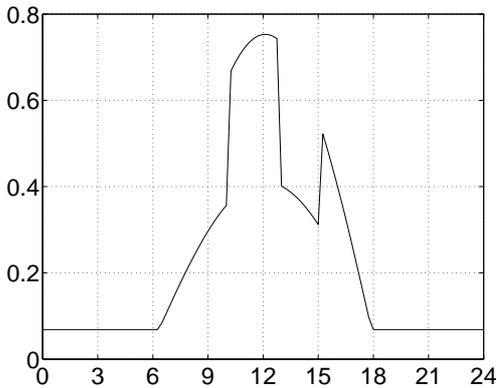


FIG. 6.68 – Fonction de pondération $g_2(t)$: cosinus de l'incidence pour le rayonnement solaire direct sur un sol horizontal

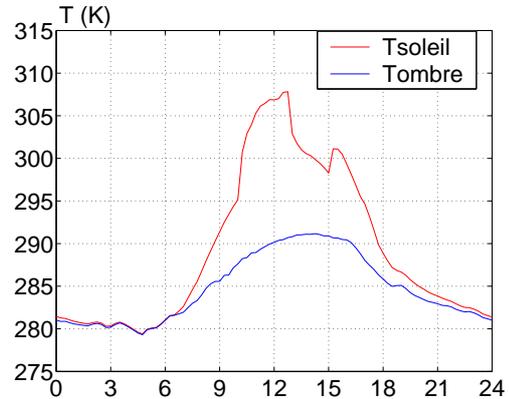


FIG. 6.69 – Température d'un sol horizontal à l'ombre et au soleil avec filtrage de 50% du flux solaire direct entre le lever du soleil et 10h et entre 13h et 15h

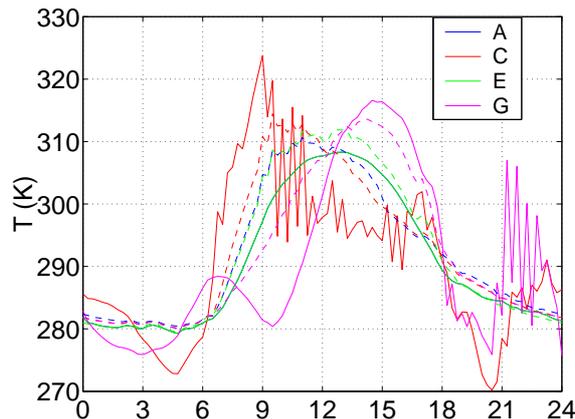


FIG. 6.70 – Températures en quatre points du profil calculées avec le modèle ombre/soleil où le flux solaire direct est filtré, comparées aux températures de référence calculées avec MISTRAL 3D (traits pointillés)

Les températures ainsi calculées sur toute la surface de la crête centrale sont représentées sur la figure 6.71. La température commence à augmenter d'abord sur la face située à l'Est (autour du point C), puis autour de midi cette tendance s'inverse bien, et les températures maximales se trouvent sur la face Ouest (point G).

Les écarts entre le champ de température obtenu par la méthode ombre/soleil et ceux obtenus par le calcul MISTRAL sont rapportés sur la figure 6.78.

L'erreur est inférieure à 6 K en moyenne. Cependant elle atteint des pics à plus de 20 K sur les flancs Est et Ouest en milieu de matinée et d'après-midi. La nouvelle technique ombre/soleil semble assez efficace pour décrire les variations spatiales de la température de surface. Néanmoins elle n'est pas très performante pour restituer correctement les évolutions de température dans les régions où la sortie ou l'entrée dans l'ombre se fait avec une variation brutale du flux absorbé (flanc Est en milieu de matinée et flanc Ouest en milieu d'après-midi).

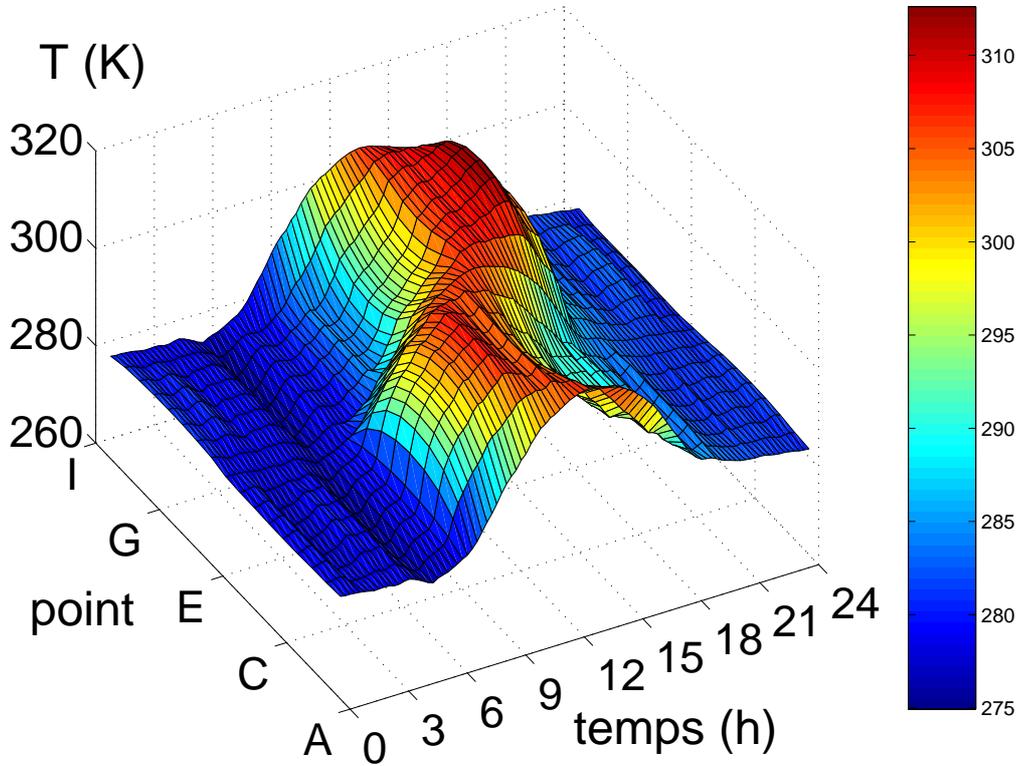


FIG. 6.71 – Températures en surface de la crête centrale du profil calculées avec le modèle ombre/soleil, après filtrage de 50% du flux solaire direct entre le lever du soleil et 10 h et entre 13 et 15 h

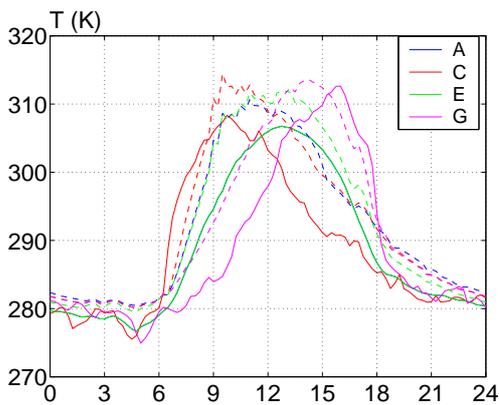


FIG. 6.72 – Températures en quatre points du profil calculées avec le modèle ombre/soleil où le flux solaire direct est filtré, comparées aux températures de référence calculées avec MISTRAL 3D (traits pointillés)

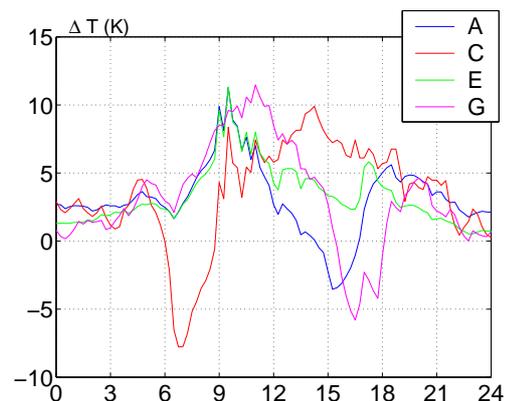


FIG. 6.73 – Écart correspondant en quatre points du profil avec les températures calculées par MISTRAL en 3D

Les écarts avec la solution 3D MISTRAL dans le cas des crêtes orientées Nord/Sud s'expliquent par le fait que certaines hypothèses du modèle ombre/soleil ne sont pas vérifiées : le coefficient d'échange convectif réel n'est pas constant, le flux solaire direct, avant d'être pondéré par la fonction d'incidence $f(\theta)$, n'est pas constant non plus. Ces écarts s'expliquent en plus par le fait que la diffusion latérale qui est présente dans la réalité vient éousser les gradients de température à la frontière des zones d'ombre. L'application de la méthode ombre/soleil au même type de géométrie mais avec des distances crête à crête plus grandes devrait réduire l'influence de la diffusion latérale et par conséquent réduire les écarts entre les températures de référence (MISTRAL) et les températures calculées par le modèle.

Orientation Est/Ouest

Un calcul de référence avec MISTRAL est maintenant réalisé dans une autre configuration. La géométrie et les conditions numériques restent inchangées. La seule modification réside dans l'orientation des crêtes : leurs axes sont orientés non plus Nord/Sud mais Est/Ouest. Les températures de référence ainsi obtenues sont représentées sur la figure 6.74 pour les points A, C, E, et G.

Une étude paramétrique de la fonction $g(t)$ pour cette configuration a révélé que, quel que soit le pourcentage d'atténuation du flux solaire direct et quelles que soient sa fréquence et sa durée, les températures calculées par la méthode ombre/soleil sont très proches. De plus, l'emploi des températures T_{soleil} et T_{ombre} sans filtrage intermittent du flux solaire direct a montré de meilleurs résultats en température. En conséquence, le calcul ombre/soleil qui suit utilise les températures T_{soleil} et T_{ombre} calculées dans la configuration de la section 6.2.3. Ces températures sont rappelées en figure 6.75.

Les températures en surface du profil dans cette nouvelle configuration sont tracées figure 6.76. Quel que soit le point en surface, sa température présente un maximum aux alentours de 13h. Dans cette configuration, le flanc de la crête comportant le point G est toujours situé au soleil, tandis que l'autre flanc est toujours à l'ombre (point E).

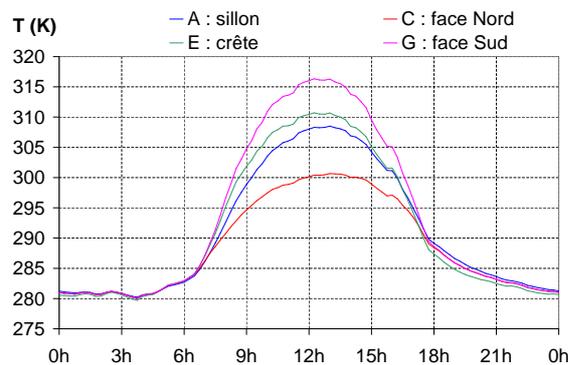


FIG. 6.74 – Températures de référence MISTRAL en quatre points du profil pour des crêtes orientées Est/Ouest

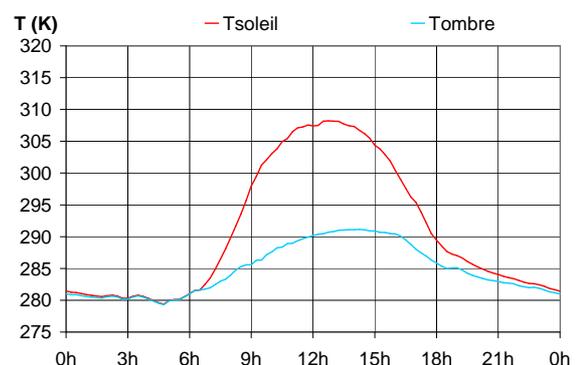


FIG. 6.75 – Températures $T_{soleil}(t)$ et $T_{ombre}(t)$ calculées par MISTRAL en 1D sur un sol plan horizontal pour le 1er octobre 2002 dans les conditions énoncées en section 6.2.3 avec les conditions météorologiques expérimentales

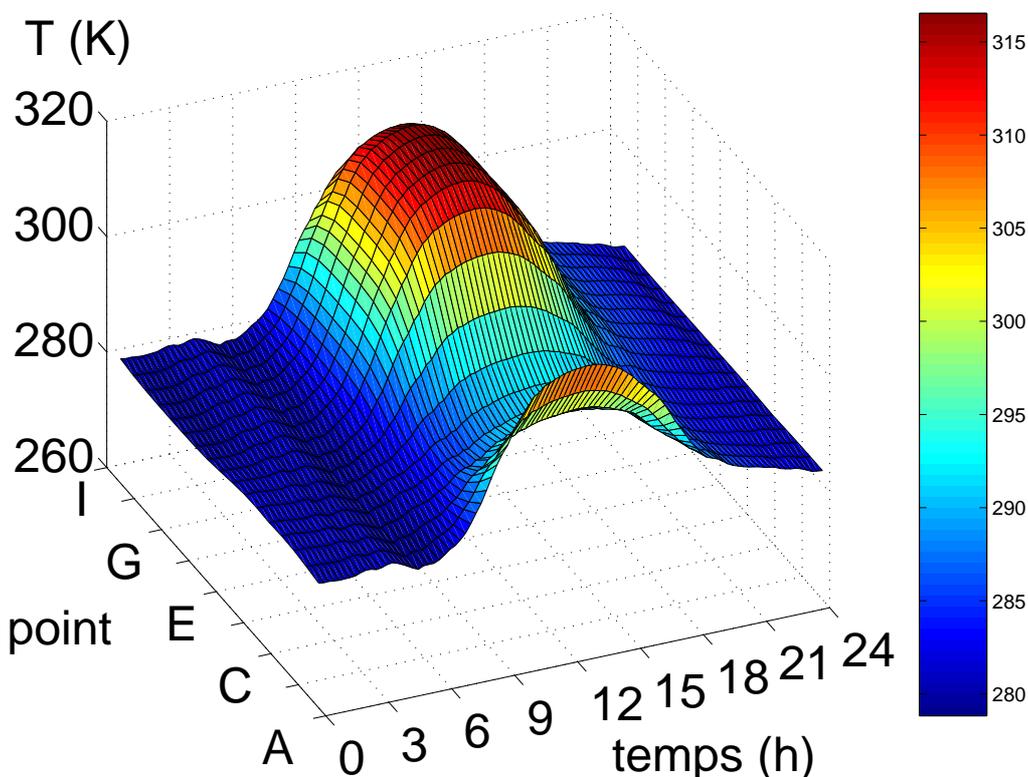


FIG. 6.76 – Températures en surface de la crête centrale du profil, calculées avec le modèle ombre/soleil sans atténuation du flux solaire direct — axes des crêtes orientés Est/Ouest

La figure 6.77 montre la comparaison des températures calculées par le modèle avec les températures de référence. Les points A et E ayant la même normale locale, leurs températures sont confondues. Les températures obtenues avec le modèle ombre/soleil sont très satisfaisantes pour les points A, E, et G. En revanche, la température au point C est très faible. Ceci vient du fait que le point C est à l'ombre pendant toute la journée. Ainsi, sa température est toujours égale à T_{ombre} . La température réelle en ce point est plus élevée (courbe rouge en pointillé), à cause de la diffusion latérale et du flux réfléchi par les surfaces environnantes. Mais la méthode ombre/soleil ne tient pas du tout compte de ces facteurs. C'est pourquoi dans le cas d'une surface toujours située à l'ombre cette méthode n'est pas adaptée.

Les écarts (figure 6.78), aux points A, E, et G, sont en moyenne inférieurs à 2 K. La méthode ombre/soleil s'avère donc satisfaisante dans le cas surfaces recevant le flux solaire direct.

En vue de se rapprocher des conditions réelles, une piste d'évolution consisterait à prendre en compte dans le modèle un coefficient d'échange variable. Par ailleurs, la méthode ombre/soleil telle qu'elle est proposée ici ne tient pas compte des masquages solaires dus à l'environnement. Pour tenir compte explicitement de ces masquages il n'y a pas de solution simple, et le lancer de rayon s'avère nécessaire. Mais cette méthode est très coûteuse en temps de calcul et contraste avec notre prérequis d'une méthode simple et rapide. En conséquence, les modélisations proposées dans ce chapitre semblent atteindre les limites de ce qui est réalisable en 1D pour modéliser la variabilité des températures de surface sur un sol rugueux. Les pistes d'amélioration énoncées ci-dessus méritent d'être explorées. Il semble néanmoins difficile de développer un modèle 1D simple général qui puisse rendre compte avec une grande précision de tous les phénomènes 3D ayant lieu dans la réalité.

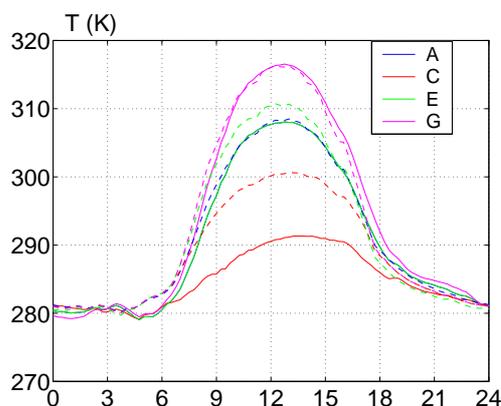


FIG. 6.77 – Températures en quatre points du profil calculées avec le modèle ombre/soleil sans masquage du flux solaire direct, comparées aux températures de référence calculées avec MISTRAL 3D (traits pointillés) — axes des crêtes orientés Est/Ouest

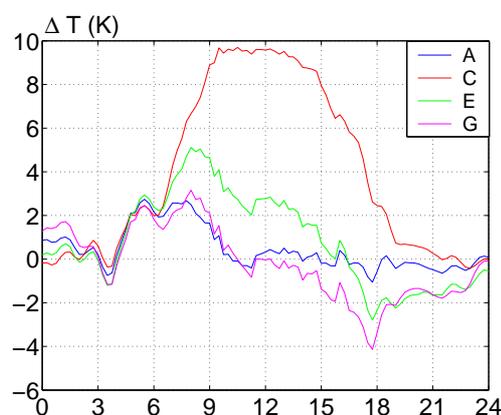


FIG. 6.78 – Écarts correspondants en quatre points du profil avec les températures calculées par MISTRAL 3D

6.4 Bilan des modélisations proposées

Le code MISTRAL ayant été validé dans le chapitre précédent, il a été utilisé dans ce chapitre comme code de référence. Une étude de ses données physiques (diffusivité, effusivité), optiques (émissivité) et météorologiques (température de l'air, coefficient d'échange, vitesse du vent, flux solaire) d'entrée a permis de mieux comprendre comment évolue la température en fonction de ces paramètres, et ensuite d'isoler les paramètres qui dominent la variabilité de la température de surface. Cette première étape nous a permis de montrer que les paramètres thermiques sont du second ordre dans la plage de variation étudiée. La convection est prépondérante surtout la nuit, et pendant la journée les flux de rayonnement solaire dominant, en fonction de l'orientation des surfaces par rapport au soleil. Les résultats obtenus au cours de cette étude paramétrique ont confirmé les analyses menées lors de la campagne expérimentale.

Les écarts de température maximaux en surface ont lieu pendant la journée, entre les surfaces situées à l'ombre et celles soumises au rayonnement solaire. Cette constatation nous a amené à proposer une approche, nommée *ombre/soleil*. Elle consiste à supposer que la température en un point d'un sol "rugueux", i.e. comportant un relief, peut être retrouvée par composition de deux températures obtenues sur un sol plat horizontal : une température "soleil", et une température "ombre", pour laquelle le rayonnement solaire direct est nul.

Dans un premier temps, trois méthodes, fondées sur ce principe, ont été testées. Elles ont toutes été comparées à une simulation MISTRAL de référence, réalisée avec les mêmes conditions que celles de la campagne expérimentale (même matériau, géométrie, même orientation de l'échantillon). La première méthode développée, la plus basique, consiste en une approche binaire : la température en un point quelconque du sol rugueux est égale à la température soleil lorsque le point est au soleil, et égale à la température ombre sinon. Les résultats de cette méthode ne sont pas satisfaisants, car les changements brusques de température du modèle — jusqu'à 15 K — aux instants où les points changent d'état ne sont pas du tout réalistes. De plus, quelle que soit la localisation du point en surface de la crête, sa température est égale à la

température "soleil" dès lors qu'il est au soleil. Par conséquent, entre 9h et 15h les températures sont uniformes sur la surface : le modèle ne retranscrit en aucune façon la variabilité spatiale des températures de surface.

En vue d'améliorer les résultats en température, la deuxième méthode a pour principe de décomposer les températures-solutions (i.e. les températures obtenues par la simulation MISTRAL) en fonction des températures ombre et soleil. La décomposition obtenue est ensuite approchée par polynômes, et ceux-ci permettent d'obtenir en retour des écarts très satisfaisants entre les températures calculées (par le modèle) et les températures de référence, et de les réduire de plus de moitié par rapport au modèle précédent. Mais le point faible de cette méthode est que, si elle est extensible a priori à des géométries semblables (profil périodique décrit analytiquement) elle est plus difficilement généralisable à d'autres géométries.

La troisième tentative repose, comme la précédente, en une décomposition de la température-solution en fonction des températures ombre et soleil, mais cette fois un terme angulaire est introduit, dépendant de la normale à la surface et du vecteur solaire. Ce terme angulaire permet de bien rendre compte de la variabilité spatiale des températures en surface de la crête. Néanmoins des problèmes subsistent aux heures où le soleil est proche de l'horizon. Une adaptation de la méthode ombre/soleil est par conséquent proposée.

En supposant que le flux incident peut être décomposé en un flux directionnel constant et en un flux hémisphérique, une formulation de la solution en température, passant dans le domaine de Fourier, est proposée. Le fait de travailler dans le domaine de Fourier permet de prendre en compte implicitement et *rigoureusement* l'effet de diffusion thermique 1D dans le matériau et les déphasages associés. Néanmoins, l'application directe de cette méthode ne fournit pas de résultats satisfaisants, parce que le contenu fréquentiel pauvre des températures ombre et soleil dans l'espace de Fourier amène de fortes oscillations de la solution.

L'application de "filtres" intermittents sur le rayonnement solaire direct permet des variations brusques du flux absorbé. Par ces variations, le comportement thermique du sol aux fréquences élevées peut alors se révéler, et la solution cesse d'osciller. Les températures alors obtenues se rapprochent des températures de référence, et décrivent bien le comportement global de la solution : la température s'élève d'abord aux points orientés Est, puis son maximum se déplace temporellement avec le trajet du soleil vers les points orientés Ouest. Des écarts de température importants sont trouvés dans les régions où la sortie ou l'entrée dans l'ombre se fait avec une variation brutale du flux absorbé (flanc Est en milieu de matinée et flanc Ouest en milieu d'après-midi). Ceux-ci sont dus au fait que certaines des hypothèses de départ (flux directionnel constant, coefficient d'échange constant, pas de diffusion latérale) ne sont pas vérifiées en réalité.

Pour tester les réactions de la méthode ombre/soleil dans le cas où les points de surface connaissent moins de variations brusques entre ombre et soleil, une autre configuration est envisagée, pour laquelle les axes des crêtes sont orientés Est/Ouest. Pour les points situés à l'ombre pendant toute la journée, le modèle n'est pas capable de prédire correctement la température (elle est égale à la température "ombre" quelle que soit l'heure). Néanmoins, les températures ainsi obtenues et comparées aux résultats de la simulation MISTRAL sont globalement tout à fait satisfaisantes : les écarts sont en moyenne inférieurs à 2 K sur tout le profil. Cette méthode est donc capable de fournir une estimation raisonnable des températures de surface d'un sol "rugueux". En vue d'augmenter la performance du modèle, quelques pistes mériteront par la suite d'être explorées.

En vue de se rapprocher des conditions réelles, une piste d'évolution consisterait à prendre en compte dans le modèle un coefficient d'échange variable. En effet, l'étude paramétrique (section 6.1) a montré son influence non négligeable sur les températures de surface. Par ailleurs, la

méthode ombre/soleil telle qu'elle est proposée ici ne tient pas compte des masquages solaires dus à l'environnement. Pour tenir compte explicitement de ces masquages il n'y a pas de solution simple, et le lancer de rayon s'avère nécessaire. Mais cette méthode est très coûteuse en temps de calcul et contraste avec notre prérequis d'une méthode simple et rapide. En conséquence, les modélisations proposées dans ce chapitre semblent être proches des limites de ce qui est réalisable en 1D pour modéliser la variabilité des températures de surface sur un sol rugueux. Des améliorations devront être tentées, mais il semble néanmoins difficile de développer un modèle 1D simple général qui puisse rendre compte avec une grande précision tous les phénomènes 3D ayant lieu dans la réalité.

Chapitre 7

Conclusion

Nous nous sommes attachés au cours de cette étude à appréhender les phénomènes à l'origine de la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface d'un sol homogène avec relief, et de quelle manière ils l'influencent. À partir de la compréhension des origines de cette variabilité, nous avons été amenés à en proposer des modélisations. En effet, la température de surface est une donnée essentielle pour le calcul des luminances issues de ces surfaces et ainsi pour la production d'images infrarouges.

Nous avons montré, à travers une étude bibliographique, que les codes de simulation IR approchent les échanges thermiques dans les sols par des transferts monodimensionnels verticaux. Or, si cette hypothèse est vérifiée aux grandes échelles (de l'ordre du kilomètre), elle ne l'est plus lorsque cette échelle est réduite, car les effets tridimensionnels – latéraux – ne sont alors plus négligeables.

Il est évident que la présence de reliefs a pour effet de faire varier la température d'une surface. Mais cette température varie également lorsque la surface est plane. En effet, les études menées sur des sols plats montrent que les écarts en surface à une même heure de la journée peuvent atteindre la dizaine de degrés, ces écarts étant principalement dus à l'inhomogénéité des constituants. D'autres études concernant des sols avec reliefs, et provenant essentiellement du domaine agronomique, montrent que de jour la variabilité spatiale des températures de surface est augmentée par la présence de reliefs, notamment à cause des contrastes entre les surfaces à l'ombre et celles au soleil.

Lors de la création d'images à basse résolution (échelle du kilomètre) par des simulateurs IR, chaque pixel correspond à une surface suffisamment importante pour que les informations de température et de luminance puissent être moyennées sans introduire d'erreurs importantes. Mais les utilisateurs des simulateurs cherchent sans cesse à augmenter la résolution des images produites. Dans ce contexte, il n'est plus question de négliger la variabilité de la température de surface, comme c'est presque toujours le cas. L'emploi de codes de transfert thermique 3D est toujours possible, mais ces codes sont complexes à mettre en place et coûteux en temps de calcul, ce qui est généralement incompatible avec les usages de l'imagerie infrarouge.

Pour une meilleure compréhension et prise en compte de la variabilité en température, des mesures sur une maquette de surface complexe – des dunes de forme sinusoïdale – ont été réalisées. Elles nous ont conduit à isoler deux principales sources de la variabilité des températures de surface : le flux solaire incident de jour, et la convection de nuit. Ces résultats nous ont également permis de disposer d'une banque de mesures suffisante pour la validation ultérieure de modèles. L'exploitation des mesures a confirmé la grande variabilité spatiale en température : les écarts peuvent atteindre 20 K entre deux points du profil, situés respectivement à l'ombre et au soleil. L'analyse des résultats nous a également permis de déterminer les comportements ty-

piques des températures en surface d'un tel profil. À un instant donné la température en surface de la maquette admet une forme pseudo-sinusoïdale, et son maximum se déplace spatialement et temporellement de la face Est vers la face Ouest suivant le déplacement du maximum d'éclairement solaire. L'amplitude de cette pseudo-sinusoïde varie : elle est maximale autour de 10h et de 16h, et minimale autour de midi – lorsque le soleil est à son zénith – et pendant la nuit. Ces observations s'expliquent assez simplement. De jour, par ciel clair le flux de rayonnement solaire domine les échanges. Lorsque le soleil se couche, les effets convectifs prennent la relève, et tendent à uniformiser les températures. Nous avons par ailleurs constaté que la présence d'une couverture nuageuse tend à uniformiser les températures en surface.

À l'issue de la réalisation de la campagne expérimentale, la deuxième étape de notre démarche a été de valider le code MISTRAL. Les comparaisons ont montré que MISTRAL reproduit bien les variations de température observées lors de la campagne expérimentale. De plus les écarts moyens temporels, pour tous les points du profil, restent inférieurs à l'incertitude de mesure déterminée lors de la campagne expérimentale. Néanmoins, l'adéquation simulation/mesures pourrait encore être améliorée. En effet, les flux d'éclairement calculés par MODTRAN et utilisés par MISTRAL sont inférieurs d'environ 7% à ceux mesurés lors de la campagne, ce qui provoque des erreurs de l'ordre de 0.5% sur les températures. Il a également été constaté un léger décalage temporel de l'ordre de la 1/2 heure sur certains résultats. Le calcul de l'éphéméride de MISTRAL pourrait en être la cause.

Une fois validé, MISTRAL a été considéré comme code de référence et a été ensuite utilisé pour comparer des modèles simplifiés de la température de surface dans des configurations différentes de celle de la campagne expérimentale. La dernière partie du travail présenté dans ce document a ainsi consisté à proposer quatre modélisations principales de la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface. Ces modélisations ont été d'abord appliquées à la configuration de la maquette dans son dispositif expérimental, et comparées aux simulations MISTRAL correspondantes. Elles reposent toutes quatre sur le même principe, que nous avons nommé *ombre/soleil*. Il consiste, rappelons-le, à supposer qu'on peut retrouver la température en un point d'un sol comportant un relief par une composition idoine de deux températures : $T_{\text{soleil}}(t)$ et $T_{\text{ombre}}(t)$, obtenues sur un sol plat horizontal exposé respectivement au soleil et à l'ombre. Parmi les quatre modélisations proposées et appliquées à la configuration expérimentale, la meilleure permet d'obtenir des écarts en moyenne inférieurs à 2 K, ce qui est très satisfaisant. Mais le modèle utilisé n'est pas généralisable en l'état à tout type de profil. Une seconde modélisation permettant d'obtenir des résultats acceptables utilise le passage dans le domaine de Fourier. Elle repose sur l'hypothèse que le flux reçu en surface peut être décomposé en un terme constant directionnel, et un terme hémisphérique (pouvant varier temporellement). De plus, cette modélisation de la température prend en compte explicitement l'orientation de la surface par rapport au soleil, à travers l'angle situé entre la normale à la surface et le vecteur solaire. Les écarts de température entre ce modèle et la simulation de référence MISTRAL sont plus élevés qu'avec le modèle précédent : de l'ordre de 6 K. Néanmoins, cette méthode a montré de très bons résultats sur la même géométrie ayant subi une rotation de 90° : des écarts inférieurs à 2 K. Des pistes d'amélioration subsistent pour augmenter la précision de cette méthode, notamment par la prise en compte d'un coefficient d'échange variable, plus proche du cas réel.

La modélisation de la variabilité spatiale des températures de surfaces avec relief reste donc difficile à appréhender. Il est en effet complexe de vouloir modéliser simplement des phénomènes tridimensionnels par des modèles simplifiés 1D. Ce travail a permis de montrer que les phénomènes prépondérants sont le flux solaire incident de jour et la convection de nuit. Les modèles développés apportent des résultats en température satisfaisants, qui arrivent en partie à rendre

compte simplement de ces phénomènes complexes.

Cependant, les efforts doivent être poursuivis dans la voie de la modélisation afin d'accroître la précision en température et d'aboutir à un modèle analytique de température 1D. L'application de ce modèle à des géométries 3D devrait ensuite permettre d'étendre le domaine de validité de la modélisation.

Le calcul des luminances fait appel non seulement aux températures de surface, mais aussi aux émissivités de ces surfaces. Ces émissivités présentent, pour certains matériaux ou milieux, comme l'eau, une variabilité angulaire qui est souvent loin d'être négligeable. Il serait ainsi approprié de réaliser pour les émissivités de surface une étude similaire à celle-ci.

Bibliographie

- [AKC⁺95] G. P. Anderson, F. X. Kneizys, J. H. Chetwynd, J. Wang, M. L. Hoke, L. S. Rothman, L. M. Kimball, R. A. McClatchey, E. P. Shettle, S. A. Clough, L. W. Abreu, and J. E. A. Selby. FASCODE/MODTRAN/LOWTRAN : Past/present/future. In *18th Annual Review Conference on Atmospheric Transmission Models*, 6-8 juin 1995.
- [Bar98] P. Barillot. Manuel utilisateur du code mistral 1.0. Technical Report MISTRAL-MU-1.0, ONERA, 1998.
- [BBD⁺] A. J. W. Borghorst, J. A. Businger, W. J. Derksen, F. H. Schmidt, D. W. Scholte Ubing, D. A. De Vries, and W. R. Van Wijk.
- [BBR89] A. Berk, L. S. Bernstein, and D. C. Robertson. MODTRAN : A moderate resolution model for LOWTRAN 7. Technical Report GL-TR-89-0122, Spectral Sciences Inc., april 1989.
- [Bli78] J. F. Blinn. Simulation of wrinkled surfaces. In ACM SIGGRAPH New York, editor, *Proceedings of SIGGRAPH'78*, volume 12, pages 286–292, Atlanta, Georgia, USA, 23-25 Août 1978.
- [BN76] J. F. Blinn and M. E. Newell. Texture and reflection in computer generated images. *Communications of the Association for Computing Machinery*, 19(10) :542–547, Octobre 1976.
- [Bur63] W. C. Burrows. Characterization of soil temperature distribution from various tillage-induced microreliefs. *Soil Science Society Proceedings*, 27 :350–353, 1963.
- [Bus73] J. A. Businger. Turbulent transfer in the atmospheric surface layer. In *Workshop in micrometeorology*, pages 67–98. American Meteorological Society, 1973.
- [BW80a] T. M. Burgess and R. Webster. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. i. the semivariogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*, 31 :315–331, 1980.
- [BW80b] T. M. Burgess and R. Webster. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. ii. block kriging. *Journal of Soil Science*, 31 :333–341, 1980.
- [Cat74] E. Catmull. *A subdivision algorithm for computer display of curved surfaces*. Report UTEC-CSc-74-133, Computer Science Department, University of Utah, Salt Lake City, UT, Décembre 1974.
- [Cen82] M. Centeno. New formulae for the equivalent night sky emissivity. *Solar Energy*, 28(6) :489–498, 1982.
- [CJ59] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger. *Conduction of Heat in Solids*. Oxford University Press, New York, 1959.
- [CKSA86] S. A. Clough, F. X. Kneizys, E. P. Shettle, and G. P. Anderson. Atmospheric radiance/transmission : FASCOD2. In *Proceedings of the Sixth Annual Conference of Atmospheric Radiation*, Williamsburg, VA, USA, 1986.

- [DCS97] Dcs corporation - simulation solutions for training. Document électronique, 1997. <http://www.dscorp.com/solutions/simtraining/simulation/simulation.htm>.
- [DLS86] B. Davidoff, J. W. Lewis, and H. M. Selim. Variability of soil temperature with depth along a transect. *Soil Science*, 142(2) :114–123, August 1986.
- [DW01] N. Duong and M. Wegener. Validation of the sensorvision thermal emission model. Technical Report DSTO-RR-0212, Defence Science and Technology Organization, Australia, avril 2001.
- [FDF⁺95] J. D. Foley, A. Van Dam, S. K. Feiner, J. F. Hughes, and R. L. Phillips. *Introduction à l'infographie*. Addison-Wesley France, Avril 1995.
- [GDA99] W. H. Gray, C. Dumont, and M. A. Abidi. Simulation of a tire inspection system. In *Proceedings from QCAV '99*, 1999.
- [GLM⁺00] L. A. Gee, A. C. Legrand, F. Mériaudeau, C. Dumont, and M. A. Abidi. Textures from stereo-based ir imaging for industrial tire inspection. In *SPIE*, 2000.
- [GRL81] S. C. Gupta, J. K. Radke, and W. E. Larson. Predicting temperatures of bare and residue covered soils with and without a corn crop. *Soil Science Society of America Journal*, 45 :405–412, 1981.
- [Hec86] P. S. Heckbert. Survey of texture mapping. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 6(11) :56–67, Novembre 1986.
- [HMG82] J.L. Hatfield, J. P. Millard, and R. C. Goettelman. Variability of surface temperature in agricultural fields of central california. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 48(8) :1319–1325, August 1982.
- [HVVB84] J.L. Hatfield, M. Vauclin, S.R. Viera, and R. Bernard. Surface temperature variability patterns within irrigated fields. *Agricultural Water Management*, 8 :429–437, 1984.
- [IJ69] S. B. Idso and R. D. Jackson. Thermal radiation from the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 74 :5397–5403, 1969.
- [IMM03] M. G. Iziomon, H. Mayer, and A. Matzarakis. Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies : Measurement and parametrization. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65 :1107–1116, 2003.
- [Jac84] P. A. M. Jacobs. Convective heat exchange of three-dimensional objects. *Arch. Met. Geoph. Biocl.*, 33 :349–358, 1984.
- [Jal98] A. K. Jaloustre. *SPIROU : Synthèse de Paysages en InfraROUge par modélisation physique des échanges à la surface*. PhD thesis, Université de Nice Sophia Antipolis, 1998.
- [Jan98] E. Jansson. *Simulation Model for Soil Water and Heat Conduction - Description of soil model*. PhD thesis, Department of Soil Science, Uppsala, Sweden, mai 1998.
- [KKOL00] S. Kang, S. Kim, S. Oh, and D. Lee. Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature. *Forest Ecology and Management*, 136 :173–184, 2000.
- [Kri51] D. G. Krige. A statistical approach to some basic mine valuation on the witwatersrand. *Journal of Chemistry, Metallurgy and Mining Society of South Africa*, 52 :119–139, 1951.
- [KSA⁺88] F. X. Kneizys, E. P. Shettle, L. W. Abreu, G. P. Anderson, W. O. Gallery, J. E. A. Selby, and S. A. Clough. Users guide to LOWTRAN 7. Environmental Research Papers, No. 1010 AFGL-TR-88-0177, Air Force Geophysics Laboratory, Optical/Infrared Technology Division, Hanscom AFB, MD, December 1988.

-
- [LLH92] Y. Luo, R. S. Loomis, and T. C. Hsiao. Simulation of soil temperature in crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 61 :23–38, 1992.
- [Mah82] Y. Mahrer. A theoretical study of the effect of soil surface shape upon the soil temperature profile. *Soil Science*, 134(6) :381–387, December 1982.
- [MBKC99] C. Miesch, X. Briottet, Y. H. Kerr, and F. Cabot. Monte carlo approach for solving the radiative transfer equation over mountainous and heterogeneous areas. *Applied Optics*, 38(36) :7419–7430, 20 December 1999.
- [MBMO97] M. Moriondo, D. Bertini, M. Mancini, and S. Orlandini. Preliminary investigation of spatial variability of temperature in a hilly area. In M. Bindi and B. Gozzini, editors, *Seminar on Data Spatial Distribution in Meteorology and Climatology*, Volterra, 28 Septembre - 3 Octobre 1997.
- [MDOW89] G. Moussu, L. Diabate, D. Obrecht, and L. Wald. A method for the mapping of the apparent ground brightness using visible images from geostationary satellites. *International Journal of Remote Sensing*, 10(7) :1207–1225, 1989.
- [Mie99] C. Miesch. *Quantification des effets de l'hétérogénéité et des reliefs d'une scène en télédétection : modélisation du signal en entrée du capteur*. PhD thesis, ENSAE, 1999.
- [PFTV92] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling. *Numerical Recipes in FORTRAN : The Art of Scientific Computing*, chapter 2.4 : Tridiagonal and Band Diagonal Systems of Equations, pages 42–47. Cambridge University Press, Cambridge, England, 2nd edition, 1992.
- [PW91] F. B. Pierson and J. R. Wight. Variability of near-surface soil temperature on sagebrush rangeland. *Journal of Range Management*, 44(5), September 1991.
- [QKL02] H. Qi, P. T. Kuruganti, and Z. Liu. Early detection of breast cancer using thermal texture maps. *IEEE*, pages 309–312, 2002.
- [RBW00] C. Rigollier, O. Bauer, and L. Wald. On the clear sky model of the esra — european solar radiation atlas — with respect to the heliosat method. *Solar Energy*, 68(1) :33–48, 2000.
- [Ris01] D. W. Riseborough. An analytical model of ground surface temperature under snowcover with soil freezing. In *58th Eastern Snow Conference*, Ottawa, Ontario, Canada, 2001.
- [Sal94] C. Salvaggio. *Multispectral scene generation using atmospheric propagation and thermodynamic models*. PhD thesis, State University of New York, 1994.
- [SB57] R. H. Shaw and W. F. Buchele. The effect of the shape of the soil surface profile on soil temperature and moisture. *Iowa State College Journal of Science*, 32(1) :95–104, August 15 1957.
- [SBC98] G. Serrot, X. Briottet, and H. Cosnefroy. Presentation of an new brdf measurement device. In *EUROPTO Conference on Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems IV*, volume 3494, pages 34–40, Barcelona, Spain, September 1998.
- [SBG⁺96] L. Seghi, M. Bindi, B. Gozzini, G. Maracchi, and S. Orlandini. Analisi preliminare della variabilità spaziale della temperatura in un ambiente collinare toscano. *Rivista di Agronomia*, 30(3 Suppl.) :540–545, juillet-septembre 1996. (en italien).
- [SBVS95] J. R. Schott, S. D. Brown, R. V. Vaqueno, and C. Salvaggio. The DIRSIG homepage. Document électronique, 1995. <http://dirsig.cis.rit.edu/>.
-

- [SMA⁺95] H. E. Snell, J. L. Moncet, G. P. Anderson, J. H. Chetwynd, S. Miller, and J. Wang. FASCODE for the environment (FASE). In *SPIE Proceedings*, volume 2471, pages 88–95, 1995.
- [SR88] S. P. Sullivan and W. R. Reynolds. Validation of physically reasonable infrared signature model (PRISM). In *Infrared Systems and Components II*, volume 890. SPIE, 1988.
- [Sto68] H. L. Stone. Iterative solution of implicit approximations of multidimensional partial differential equations. *S. I. A. M. Journal of Numerical Analysis*, 5(3) :530–558, septembre 1968.
- [SZ81] G. E. Schneider and M. Zedan. a modified strongly implicit procedure for the numerical solution of field problems. *Numerical Heat Transfer*, 4(1), janvier-mars 1981.
- [Thu90] B. Thunholm. A comparison of measured and simulated soil temperature using air temperature and soil surface energy balance as boundary conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 53 :59–72, 1990.
- [TYU85] B. B. Trangmar, R. S. Yost, and G. Uehara. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, 38 :45–94, 1985.
- [UKB96] B. Usowicz, J. Kossowski, and P. Baranowski. Spatial variability of soil thermal properties in cultivated fields. *Soil and Tillage Research*, 39 :85–100, 1996.
- [UMAF95] B. Usowicz, F. Moreno, L. Andreu, and J. E. Fernandez. Spatial distribution of topsoil thermal properties in field without crops. *Zeszyty Problemowe Postepow Nauk Rolniczych*, 419 :109–117, 1995.
- [UW92] B. Usowicz and R. Walczak. Investigations and analyses of spatial variability of soil temperature. *Int. Agrophysics*, 6 :43–53, 1992.
- [VF99] D. A. Vaitekunas and D. S. Fraedrich. Validation of the NATO-standard ship signature model (SHIPIR). Technical report, NATO, 1999.
- [VS91] J. T. Vose and W. T. Swank. A soil temperature model for closed canopied forest stands. Research Paper SE-281, United States Department of Agriculture – Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, North Carolina, avril 1991.
- [VS97] U.S. Army CECOM Night Vision and Electronic Sensors. Paint the night. Document électronique, 1997. http://www.tec.army.mil/research/products/TD/tvd/survey/Paint_the_Night.html.
- [VVBH82] M. Vauclin, S. R. Viera, R. Bernard, and J. L. Hatfield. Spatial variability of surface temperature along two transects of a bare soil. *Water Resour. Res.*, 18 :1677–1686, 1982.
- [Web85] R. Webster. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advances in Soil Science*, 3 :1–70, 1985.
- [WU94] R. Walczak and B. Usowicz. Variability of moisture, temperature and thermal properties in bare soil and in crop field. *Int. Agrophysics*, 8 :161–168, 1994.

Annexes

Annexe A

Outils géostatistiques

Le *krigeage* est une méthode d'interpolation spatiale. Cette méthode peut être utilisée à la fois pour l'interpolation et l'extrapolation. Le "*krigeage*" porte le nom de son précurseur, l'ingénieur minier sud-africain D. G. Krige. Dans les années 50, Krige [Kri51] a développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de déterminer la distribution spatiale de minerais à partir d'un ensemble de forages. Ensuite, en 1963, le français Matheron a formalisé l'approche en utilisant les corrélations entre les forages pour en estimer la répartition spatiale. C'est lui qui a baptisé la méthode "*krigeage*". Il a également été le premier à employer le terme géostatistiques pour désigner la modélisation statistique de données spatiales. Le variogramme est l'outil de base de cette modélisation.

A.1 Le variogramme

L'interpolation spatiale est un problème classique d'estimation d'une fonction $F(x)$, où $x = (x, y)$, en un point x_p du plan à partir de valeurs connues de F en un certain nombre, m , de points environnants x_i :

$$F(x_p) = \sum_{i=1}^m W_i \cdot F(x_i) \quad (\text{A.1})$$

Le problème consiste à déterminer la pondération, i.e. les W_i , de chacun des points environnants. Il existe plusieurs façons de choisir ces poids. Les deux méthodes les plus connues sont l'interpolation linéaire (en fonction de l'inverse de la distance) et la méthode des splines cubiques (ajustement de polynômes cubiques). Le *krigeage* choisit plutôt les poids à partir du degré de similarité entre les valeurs de F , i.e. à partir de la covariance entre les points en fonction de la distance entre ces points.

La seule condition indispensable pour utiliser le *krigeage* est que la moyenne et la variance de la fonction F soient stationnaires, c'est-à-dire qu'elles ne dépendent pas de la position des points, mais seulement de la distance entre les points. Le variogramme est alors simplement la variance totale moins la covariance, en fonction de la distance entre les points. Le *krigeage* utilise alors le semi-variogramme (la moitié du variogramme) pour déterminer les poids dans l'équation A.1. Le semi-variogramme est calculé à l'aide de l'équation A.2 pour les $n(h)$ points x_i et y_i séparés par une distance $h = |x_i - y_i|$:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (x_i - y_i)^2 \quad (\text{A.2})$$

La figure A.1 présente un exemple de semi-variogramme $\gamma(h)$. Il suffit d'ajuster une fonction analytique à tous ces points à l'aide de la méthode des moindres carrés, et on obtient alors une fonction continue caractérisant complètement la semi-variance en fonction de la distance entre les points.

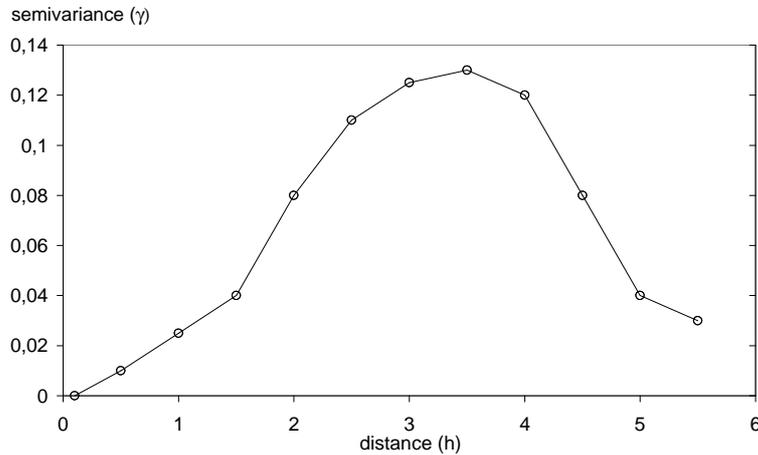


FIG. A.1 – Exemple de semi-variogramme. Les points (cercles) sont obtenus à l'aide de l'équation A.2 pour l'ensemble des distances h possibles, où $h = |x_i - y_i|$. Une fonction continue (la ligne continue) a ensuite été ajustée à l'aide de la méthode des moindres carrés

Le choix et l'ajustement d'une fonction au semi-variogramme constituent la partie la plus délicate du *krigeage*. Ce choix doit ensuite être validé par des tests statistiques.

A.2 Le *krigeage*

Le *krigeage* consiste à calculer les W_i de l'équation A.1 à l'aide des valeurs de la fonction $\gamma(h)$ correspondant aux m points choisis. Il existe trois types de *krigeage* univarié (i.e. à une seule variable) : le *krigeage* simple, le *krigeage* ordinaire et le *krigeage* universel. La différence entre ces types d'estimation réside dans la connaissance de la statistique de la variable à interpoler :

1. *krigeage* simple : variable stationnaire de moyenne connue ;
2. *krigeage* ordinaire : variable stationnaire de moyenne inconnue ;
3. *krigeage* universel : variable non-stationnaire (qui contient une tendance).

Le plus fréquemment utilisé est le *krigeage* ordinaire, également appelé *krigeage* ponctuel. La méthode consiste à déterminer la combinaison de poids, i.e. la combinaison des W_i de l'équation A.1, qui garantit que les semi-variances calculées à l'aide du point cible x_p se retrouveront sur la courbe de la figure A.1. Les poids sont obtenus en multipliant les W_i , pour chacun des m points, par chacune des m semivariances associées à ce point (les lignes de la matrice A de l'équation A.3). Le problème s'exprime finalement sous la forme du système de $m + 1$ équations linéaires à $m + 1$ inconnues.

$$A \cdot W = B \tag{A.3}$$

où :

$$A = \begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \cdots & \gamma(h_{1m}) & 1 \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \cdots & \gamma(h_{2m}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(h_{m1}) & \gamma(h_{m2}) & \cdots & \gamma(h_{mm}) & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_m \\ \lambda \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad B = \begin{bmatrix} \gamma(h_{1p}) \\ \gamma(h_{2p}) \\ \vdots \\ \gamma(h_{mp}) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Les $\gamma(h_{ij})$ sont les valeurs du semi-variogramme qui correspondent à la distance h_{ij} entre les points x_i et x_j . Les $\gamma(h_{ij})$ ont déjà été calculés à partir des données à l'aide de l'équation A.2, tandis que les $\gamma(h_{ip})$ sont calculés à l'aide de la fonction analytique qui a été ajustée aux points, au semivariogramme de la figure A.1. pour que la solution soit non biaisée, il faut que la somme des poids, les W_i , soit égale à 1. Cette dernière contrainte introduit un degré de liberté supplémentaire dans le problème. Ce degré supplémentaire est utilisé en ajoutant une variable libre, λ (un multiplicateur de Lagrange), dans le but de minimiser l'erreur d'estimation. Le vecteur W est obtenu en multipliant les deux côtés de l'équation A.3 par l'inverse de la matrice A . La valeur recherchée au point x_p est ensuite calculée en utilisant les valeurs connues de F , les $F(x_i)$, à l'aide de l'équation A.1.

La variance de l'estimation s_p^2 , c'est-à-dire le carré de l'erreur standard en chaque point, est obtenue par la relation :

$$s_p^2 = W^T \cdot B \tag{A.4}$$

où le T indique la transposée du vecteur.

Annexe B

Représentation numérique des textures de surface

En infographie, comme pour tous les codes physiques de simulation, la première étape pour créer une image synthétique d'une scène consiste en la création du maillage 3D de la scène, ainsi représentée par des polygones. La seconde étape est la détermination des surfaces cachées. La méthode la plus communément utilisée pour cela, et aussi la plus rapide dans la plupart des cas, est celle du Z-buffer. Après cette étape, des modèles d'illumination et d'ombrage sont appliqués. Les plus utilisés sont décrits dans le chapitre 12 ("Illumination et ombrage") de [FDF⁺95]. Cependant, l'application de tout modèle d'ombrage à des surfaces planes donne des surfaces lisses et uniformes, en contradiction flagrante avec les surfaces du monde réel. Plusieurs méthodes existent permettant la simulation de détails de surface.

Le moyen le plus simple pour augmenter le niveau de détails d'une image est d'ajouter des polygones. Mais les détails devenant trop petits, la description explicite par polygones devient peu utilisable, car la multiplication des polygones augmente de façon démesurée les temps de calculs.

B.1 Détermination des surfaces visibles d'une image

Différentes techniques informatiques existent, afin de déterminer les lignes et surfaces visibles d'une image, et donc éliminer les lignes et surfaces cachées. Lors de la détermination des lignes visibles, on considère que les lignes sont les arêtes des surfaces opaques qui masquent les arêtes d'autres surfaces plus éloignées. Il existe beaucoup d'algorithmes de détermination de surfaces cachées. Certains d'entre eux font appel à des ressources matérielles (puces graphiques).

Il existe des algorithmes de balayage en ligne, qui génèrent l'image ligne par ligne. Les codes de tracé de rayon déterminent la visibilité des surfaces en traçant des rayons imaginaires partant de l'œil de l'observateur, et allant vers la scène. Les algorithmes de tri par profondeur nécessitent la description de l'image avec les coordonnées (x,y,z) de chaque sommet de polygone ; puis le tri est réalisé d'abord en z , puis en x et y . Cet algorithme est également appelé "algorithme du peintre", parce que les objets sont dessinés en fonction de leur profondeur, du plus éloigné au plus rapproché.

L'algorithme du peintre est efficace pour un petit nombre de polygones parce que le test de recouvrement est souvent suffisant pour décider si le polygone peut être converti en lignes de balayage. Si le nombre de polygones augmente, des tests complexes sont invoqués plus souvent et la subdivision de polygones risque également d'être invoquée plus souvent.

Il existe également des algorithmes de subdivision d'image, comme celui de Warnock. Ces algorithmes partitionnent le plan de projection de l'image. Pour chaque zone de l'image, lorsqu'on

peut déterminer facilement que les polygones sont visibles, on les affiche. Sinon, la zone concernée est divisée en sous-zones, et le processus est répété récursivement. Au fur et à mesure que la taille des zones diminue, les recouvrement entre polygones se font moins nombreux, et finalement on arrive toujours à conclure. Les tests élémentaires et les calculs nécessaires pour l'algorithme de Warnock sont relativement complexes, et en conséquence il est en général plus lent que les autres.

L'algorithme qui est encore le plus utilisé est celui de Z-buffer. Cette technique repose sur l'utilisation d'une zone de mémoire supplémentaire de même taille que l'image, appelée Z-buffer. Cette zone de mémoire sert à stocker les informations sur les profondeurs des différents pixels de l'image.

Le principe est le suivant : lorsqu'on trace un pixel d'une facette, on calcule précisément sa profondeur et on stocke cette donnée dans un tableau représentant l'écran (ce tableau est appelé le Z-buffer, Z faisant référence à la profondeur, généralement représentée par l'axe Z). Si, ultérieurement le pixel d'une autre facette doit être tracé aux mêmes coordonnées écran, on vérifie si la profondeur du pixel en question est supérieure ou inférieure à la profondeur de celui qui est déjà dans le Z-buffer. Si le pixel est derrière le précédent, on ne fait rien, sinon on dessine le pixel et on change la valeur dans le Z-buffer.

La table B.1 compare les performances de différents algorithmes de détermination des surfaces visibles. L'algorithme de tri en profondeur est efficace pour un petit nombre de polygones parce que le test de recouvrement est souvent suffisant pour décider si le polygone peut être converti en lignes de balayage. Si le nombre de polygones augmente, les tests complexes sont invoqués plus souvent et la subdivision de polygones risque d'être invoquée plus souvent. L'algorithme de Z-buffer a une performance constante parce que, si le nombre de polygones augmente, le nombre de pixels couverts par chaque polygone diminue. En contrepartie, ses besoins en ressources mémoire sont élevés. Néanmoins, avec les cartes graphiques actuelles, ce besoin de ressources ne constitue plus un problème majeur. Les tests élémentaires et les calculs nécessaires pour l'algorithme de Warnock sont relativement complexes, et en conséquence cet algorithme est en général plus lent que les autres.

En général, la comparaison d'algorithmes de détermination de surface visible est difficile, parce qu'ils ne calculent pas tous la même information avec la même précision. Par ailleurs, la place nécessaire en mémoire n'est pas le seul point important : la complexité de calcul est également un point qu'il faut minimiser. De plus, le choix d'un algorithme de surface visible dépend aussi du type de rendu d'ombre choisi, et du support matériel (machines parallèles). Une description détaillée des principales techniques de détermination des surfaces visibles est réalisée dans le chapitre 13 de [FDF⁺95].

Algorithme	Nombre de polygones de la scène		
	100	2500	60 000
Tri en profondeur	1*	10	507
Z-buffer	54	54	54
Balayage de ligne	5	21	100
Subdivision de zone de Warnock	11	64	307

* Mesures normalisées en référence à ce cas unité

TAB. B.1 – Estimation de l'efficacité relative de 4 algorithmes de détermination de surfaces visibles

B.2 Placage de texture

Une possibilité autre que l'augmentation du nombre de polygones, pour l'augmentation du niveau de détails des surfaces d'une image consiste à plaquer une image, numérisée ou fabriquée, sur la surface. Cette technique a été inventée par Catmull [Cat74], et raffinée par Blinn et Newell [BN76]. Cette approche est appelée placage de texture, ou placage de motifs ; l'image est appelée une texture, et ses éléments sont appelés des *texels*. Une texture rectangulaire possède son propre système de coordonnées (u, v) . Une texture peut aussi être générée par un algorithme. Pour chaque pixel rendu, les texels sont utilisés pour remplacer ou pour modifier l'une ou plusieurs des propriétés du matériau de la surface.

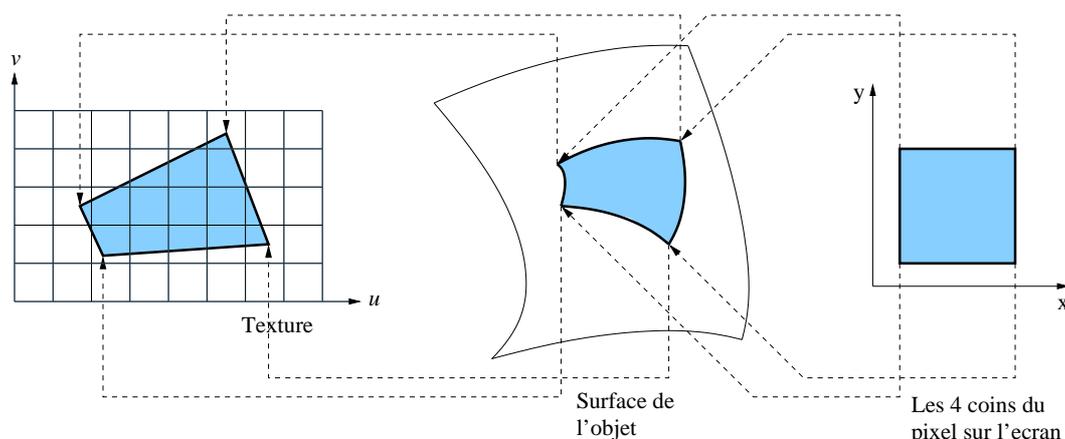


FIG. B.1 – Placage de texture : correspondance entre pixel, surface et texture

Comme on peut le voir sur la figure B.1, le placage de texture se fait en deux temps. Une approche simple consiste à trouver la correspondance des 4 coins du pixel avec la surface. Heckbert [Hec86] a proposé une étude complète des méthodes de placage des textures. Les récentes évolutions de ces méthodes conduisent actuellement à l'utilisation de surfaces triangulaires plutôt que quadrangulaires. Les triangles permettent en effet de mieux découper les surfaces, donnent lieu à des algorithmes plus rapides et permettent des câblages plus simples directement sur les puces graphiques (processeurs dédiés aux calculs graphiques).

B.3 Autres méthodes

Le placage de texture affecte l'ombrage de la surface, mais celle-ci reste lisse. Si la texture est une photographie d'une surface rugueuse, la surface ombrée ne sera pas convaincante, parce que la direction de la lumière utilisée pour créer la texture sera différente de la direction de la lumière illuminant la surface. Blinn [Bli78] a trouvé une méthode donnant l'apparence d'une géométrie modifiée sans avoir à toucher la géométrie de la surface. Son approche consiste à perturber la normale à la surface avant de passer le point au modèle d'illumination (voir [FDF⁺95], pages 494 à 507). Cette méthode est connue sous le nom de *bump mapping*, et est fondée sur le placage de textures.

Une *bump map* est un tableau de déplacements, pouvant être chacun utilisé pour perturber légèrement la position d'un point par rapport à sa position réelle. Le résultat est extrêmement convaincant : un spectateur ne remarque souvent pas que la texture de l'objet n'affecte pas sa silhouette.

Bien que le placage en 2D soit efficace dans de nombreuses situations, les textures trahissent souvent leur origine 2D quand on les plaque sur des surfaces courbes, et des problèmes apparaissent aux "coutures". Certaines approches ont été développées, dans lesquelles la texture est une fonction 3D de la position dans l'objet.

D'autres propriétés de surface peuvent être plaquées. Par exemple, dans la technique de Cook, c'est la surface elle-même qui est déplacée, au lieu de la normale.

Annexe C

Concept de texture thermique

Les textures, en synthèse d'images (voir section B.2), permettent de donner l'illusion d'une surface non plane, en superposant une image sur une surface plane. Afin d'adapter cette idée dans le domaine de la synthèse d'images physiques en température ou en luminance, l'idée est d'obtenir des images en températures représentant les variations spatiales de la température de surface, en calculant une carte de texture en température, calculée à partir de modèles physiques. Ce concept est appelé *texture thermique*.

L'objectif est de fabriquer, à partir de modèles fondés sur des principes physiques et de résultats empiriques, des images de textures thermiques, représentant la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface due aux reliefs. La variabilité temporelle de la température est généralement prise en compte à travers des modèles de forme sinusoïdale. Mais la variabilité spatiale de la température est importante, et malgré cela elle est très peu étudiée et modélisée. Une modélisation simple de celle-ci permettrait pourtant d'augmenter le réalisme et la précision des images, sans pour autant être coûteuse en temps de calcul.

En synthèse d'image, le placage de texture requiert une image de la texture à plaquer. Cette méthode peut être reproduite, à condition d'obtenir l'image à plaquer grâce à des modèles fondés sur des principes physiques. Pour obtenir ces modèles, la première étape consiste, à travers un état de l'art, à identifier les phénomènes prépondérants. L'étude bibliographique des sections précédentes a permis d'identifier comme phénomènes dominants la température de l'air, l'éclairement solaire et l'orientation des surfaces par rapport au soleil. La seconde étape consiste à développer des modèles simples de textures de surface. Cette section présente les quelques utilisations de textures thermiques présentes à ce jour. Une première approche des textures thermiques est ensuite proposée.

C.1 Utilisation des textures thermiques

Le terme de "texture thermique" est utilisé depuis peu de temps, dans quelques domaines, comme la médecine ou l'industrie. Sa définition diffère selon le domaine utilisé, et diffère également de celle que nous lui donnons tout au long de ce travail.

Dans l'industrie du pneu, la génération de textures thermiques est utilisée à des fins d'inspection de qualité. Gee et al. [GLM⁺00] développent une méthode qui permet de générer des textures thermiques à partir d'acquisitions d'images infrarouges. C'est ce principe qui est appliqué par Gray et al. dans [GDA99] : les auteurs génèrent un maillage 3D d'un pneu ; ils font ensuite des acquisitions d'images thermiques de ce pneu par trois caméras infrarouges. Ces trois images thermiques sont converties en une carte de texture 3D – ou *texture map* – et la texture obtenue est plaquée sur le maillage (voir figure C.1). Cette méthode, utilisée à des fins de contrôle

de qualité, fonctionne très bien dans ce cadre d'utilisation, mais elle ne permet en aucun cas la prédiction de ces textures thermiques.



FIG. C.1 – Extraits des travaux de Gray et al. : maillage 3D du pneu, image infrarouge du pneu, puis obtention d'une texture thermique par placage de l'image infrarouge sur le maillage 3D

Remarque :

En médecine, le terme de texture thermique désigne simplement le fait d'utiliser des acquisitions infrarouges du corps humain pour l'aide au diagnostic. Ce procédé est utilisé notamment pour la détection de tumeurs [QKL02], ou pour les IRM.

Le terme de "texture thermique" est souvent confondu avec l'imagerie thermique infrarouge, ou utilisé pour le placage d'images infrarouges, acquises par caméra thermique, sur un maillage. Ce deuxième usage peut être utile, du moins pour la partie concernant le placage d'image sur un maillage. Pour cela, il faut trouver une manière de prédire les images thermiques, avant de les plaquer éventuellement sur un maillage pré-existant.

C.2 Une approche

Le moyen le plus simple afin d'augmenter la résolution d'une image est d'ajouter des polygones, c'est-à-dire de raffiner le maillage (voir exemple figure C.2). Mais l'inconvénient majeur du raffinement du maillage est l'augmentation des temps de calcul.

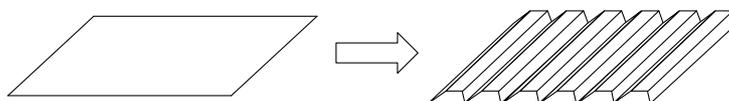


FIG. C.2 – À gauche : maille de départ. À droite : raffinement du maillage pour l'augmentation de la résolution de la maille de gauche

Une alternative à l'ajout de facettes au maillage consisterait à garder un maillage "grossier" de la scène en 3D, puis de plaquer des textures sur ses facettes (voir section B.2). Pour fabriquer ces textures, deux méthodes sont envisageables. La première est d'acquérir une image de la texture et de la plaquer sur la surface (voir section C.1), mais cette méthode a le désavantage de ne pas permettre la prédiction. Une deuxième méthode consiste à calculer cette image de texture grâce à un modèle physique. On peut appliquer ce principe pour produire soit une image en température soit une image en luminance.

Pour une image en température, le principe est le suivant. Un code de calcul fournit les températures pour chaque polygone (ou maille) de surface, de la scène 3D. Sur une maille, la température calculée par le code est constante. Afin de rendre compte d'une texture de surface, l'idée consiste à ajouter en chaque point de cette facette un terme de "perturbation" de la température moyenne.

Considérons par exemple une géométrie réelle telle qu'en figure C.3 (a). Cette géométrie est modélisée par des surfaces planes fictives équivalentes dans la représentation 3D de la scène, et le code de calcul thermique nous fournit une température moyenne par facette (figure C.3 (b)). Nous voulons modifier cette température de telle sorte qu'elle rende compte de la variabilité spatiale de la scène. Cette variabilité spatiale correspond à une texturation thermique de la surface.

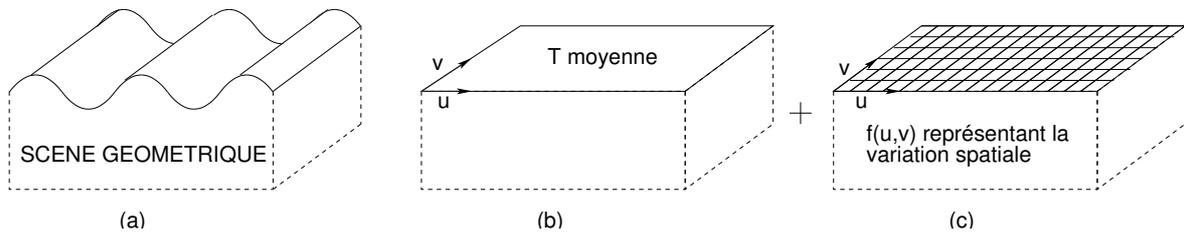


FIG. C.3 – Décomposition de la tâche. (a) géométrie d'un objet. (b) facettisation grossière de l'objet et obtention d'une température moyenne par facette. (c) fonction de perturbation de la température, en tout point de la facette

La température en chaque point est décomposée en deux termes : un terme constant – la température moyenne de la facette, calculée et fournie par le code – et une fluctuation spatiale $f(u, v) = \delta T(u, v)$ (figure C.3 (c)). Pour tout point de coordonnées (u, v) dans le repère local de la facette :

$$T(u, v) = T_{moyen} + \delta T(u, v) \quad (C.1)$$

La difficulté réside ensuite bien sûr dans la détermination du terme $\delta T(u, v)$. Le chapitre 6 propose des solutions.

Annexe D

Entrées du code MISTRAL

D.1 Fichier d'entrée du mailleur géométrique

```
# FICHER D'INITIALISATION DES DONNEES POUR CORINTHE
# Contient : Les donnees geom. utilisees dans "BD_pts" et "BD_scn"
# Les types de conditions limites par face
##### VERSION DU FICHER DE DONNEES #####
1.1
##### ONJETS SUR SCENE #####
1
##### OBJET 1 #### inferieur a 2 #####
1
1 | nobj_sc
120 | objtyp_sc
DUNE_ONDULEE | obj_nom
Beton arme | obj_mat_th
48 | imax sg epais1 Nbr noeuds suiv. direction i
25 | jmax sg epais1 Nbr noeuds suiv. direction j
14 sgeom 0.02 | kmax sg epais1 Nbr noeuds suiv. direction k
-1 | Parpaing ciment | Face1(imin):CL Mat_opti | Conventions CL :
-1 | Parpaing ciment | Face2(imax):CL Mat_opti | >0:contact objet
-1 | Parpaing ciment | Face3(jmin):CL Mat_opti | =0:eclair sol +
-1 | Parpaing ciment | Face4(jmax):CL Mat_opti | pertes rad et conv
+0 | Parpaing ciment | Face5(kmin):CL Mat_opti | -1:flux nul
+0 | Parpaing ciment | Face6(kmax):CL Mat_opti | -2:temp.imposee
-----
0.0 0.0 0.0 | X0 Y0 Z0 Vecteur translation
1.0 0.0 0.0 |
0.0 1.0 0.0 | Matrice de rotation
0.0 0.0 1.0 |
0.531 | longueur
0.405 | profondeur
0.1 | hauteur
0.051 | amplitude ondulation
3. | nbr de periodes
##### OBJET 2 #### superieur a 1 #####
```

Ce fichier est nommé `Data.geom`. Il sert à l'initialisation du module CORINTHE. Il comporte le nombre d'objets constituant la scène. Puis, pour chaque objet, il comporte son type sous la forme d'un code à trois chiffres (101 : terrain, 110 : parallélépipède, 501 : cylindre, 120 : objet à surface sinusoïdale, ...), son type de matériau (béton armé dans l'exemple), et le nombre de mailles et la dimension dans chaque direction. Pour le nombre de mailles il est possible de faire appel au maillage selon une suite géométrique. Pour cela, il faut entrer, dans l'ordre : le nombre de mailles, une chaîne de caractères commençant par "sg", et l'épaisseur de la première maille.

L'origine de chaque objet est placée par défaut au point de coordonnées (0;0;0). Pour modifier cette position, l'utilisateur peut appliquer une translation et/ou une rotation, fournies au code par l'intermédiaire d'un vecteur et d'une matrice 3×3 respectivement.

Pour chaque objet, l'utilisateur définit les conditions de contact et aux limites de chaque face sous forme d'un entier positif ou négatif. Les conventions sont les suivantes :

- -2 : le flux est imposé ;
- -1 : le flux est nul ;
- 0 : la face est libre : elle reçoit l'éclairement solaire et est soumis aux pertes radiatives et convectives ;
- >0 : la face est en contact avec un objet.

D.2 Initialisation des données physiques

D.2.1 Fichier d'entrée : Data_Mistral

```
# FICHER DE DONNEES POUR MISTRAL
#
##### VERSION DU FICHER DE DONNEES #####
2.9
##### POSITION GEOMETRIQUE #####
43.36      | latitude (deg)
05.06      | longitude (deg)
0.060      | altitude moyenne de la scene (km)
##### DATE ET HEURE DE SIMULATION (TU) #####
15/06/2000 00:00:00| dd/m/yyyy hh:mm:ss
##### MIRAGE - NORMALES #####
1          | normal_calc      recalcul des normales (0/1)
##### DEESSE/TESOS - BOUCLES TEMPORELLES #####
60         | step_time        pas de temps (secondes)
2880       | nptime_tot       nbr pas de t.
5          | step_save_time   pas de sauv.
##### DONNEES ATMOSPHERIQUES #####
L          | L/M      LOWTRAN/MODTRAN
----- Parametres LOWTRAN/MODTRAN -----
2          | model          parametre MODTRAN (mod. atmos.)
1          | imult          parametre MODTRAN (dif. simple/mul 0/1))
1          | ihaze          parametre MODTRAN (type aerosol)
0          | unit_spect     Unite spectral micron/cm-1 (0/1)
----- Discretisation spatiale de l'hemisphere (thermique) -----
7          | nangl_sld_th_zen Nbr d'integ. en zenith
1          | nangl_sld_th_azi Nbr d'integ. en azimuth (=1 pour DEESSE)
0          | rep_ang_sld_th  repartition lineaire (0) ou geom. (1)
----- Discretisation spatiale de l'hemisphere (solaire diffus) -----
5          | nangl_sld_sol_zen Nbr d'integration en zenith (>=2)
10         | nangl_sld_sol_azi Nbr d'integration en azimuth (>=3)
3          | nangl_sld_sol   **2 nbr d'integr. ds la tache sol.
10.        | angl_tache_sol  Val. angul. de la 1/2 tache solaire
##### DEESSE - GENERATION DES BASES DE DONNEES #####
0          | kod_BD_clim     (1) genere la BD climatique
1          | kod_BD_ray      (1) genere la BD d'ombrage
##### DEESSE - DEPOT D'ENERGIE DU Fd DE CIEL SUR LA SCENE #####
3          | l1              borne inf de la bande spect.
41         | l2              borne sup de la bande spect.
75         | dl              pas d'integration
##### DEESSE - DEPOT D'ENERGIE SOLAIRE DIFFUSE SUR LA SCENE #####
0.2        | l1              borne inf de la bande spect.
2          | l2              borne sup de la bande spect.
```

```

10          | dl          pas d'integration
##### DEESSE - DEPOT D'ENERGIE SOLAIRE DIRECTE SUR LA SCENE #####
0.2        | l1          borne inf de la bande spect.
3          | l2          borne sup de la bande spect.
10         | dl          pas d'integration
##### MOLIÈRE - POSITION DE L'OBSERVATEUR #####
00.50      | distance_obs(km) distance horizontale observateur-scene
42.0       | direct_obs (deg) direction scene -> obs / Sud->Ouest
0.065      | altitude_obs(km) altitude de l'observateur
##### MOLIÈRE - DEFINITION DE L'IMAGE EN LUMINANCE #####
1940.      | l1_obs      borne inf de la bande spect.
2740.      | l2_obs      borne sup de la bande spect.
5.         | dl_obs III(500) pas d'integrations III(500)
##### TESOS - CONSTANTES THERMIQUES PAR DEFAUT SUR LA SCENE #####
.95        | emis_scn   Emissivite globale de la scene
1.286e6    | rocp_scn   Chaleur spe. vol. globale
0.58       | lambda_scn Conductivite globale de la scene
288.25 7.9 | temp. moy. des facettes adjacentes
293.       | tsol       temp. sous-sol [K]
../../../../meteo_021001_15mn.dat | Tconv_moy Tconv_amp : Temp. d'air conv. [K]
#          |           ou fic meteo
-5.0       | hconv      coef. convect : >0 : impose <0 : analytique
1.0        | Vwind      Vitesse du vent [m][s-1] ou fic meteo
293.       | tinit      temp. initiale (pas de temps 0) [K]

##### TESOS - DIVERS #####
0          | ecrmat     1=écriture matrice
0          | ecrdim     1=écriture flux, organisation fct/face
0          | flux_cst_id 0=flux Modtran 1=impose
-800.      | flux_cst_val >0=cst, <0=variable ou fic. meteo
0. 0. 1.   | flux_cst_vct Vect scene horiz -> soleil ou calcule
##### TESOS - LISTE GROUPES D'OBJETS #####
1
##### TESOS - CONSTANTES PAR DEFAUT PAR OBJET #####
1          | no         Indice de l'objet
generalise | solver_coord Geometrie du solveur (cyl, cart, gen)
3D         | solver_typ  Type de solveur (1D, 2D, 3D)
2          | solver_dir  Direction de res. (1, 2, 3)
Implicite  | teta_obj   Impl./Crank-N./Expl.
.95        | emis_obj   emissivite de l'objet
1.286e6    | rocp_obj   Chaleur specif volumique
0.58       | lambda_obj conductivite therm. de l'objet
72         | imax       maillage thermique (0=mail. facet.)
20         | jmax       maillage thermique (0=mail. facet.)
14         | kmax       maillage thermique (0=mail. facet.)
##### TESOS - CONSTANTES PAR DEFAUT PAR OBJET #####

```

Le fichier nommé `Data_Mistral` sert à l'initialisation des paramètres physiques des trois modules DEESSE, TESOS et MOLIÈRE. Il regroupe les données de simulation générales (heure et lieu, durée de la simulation et pas de temps de calcul). Puis les données nécessaires à chaque module sont entrées. Le *path* `../../../../meteo_021001_15mn.dat` correspond au chemin d'accès au fichier météo (voir exemple en annexe D.3).

La description de chaque donnée d'entrée et de son fonctionnement est faite dans le document [Bar98].

D.2.2 Paramètres *MODTRAN* pour le calcul des éclaircissements

Les paramètres *MODTRAN* dans *Data_Mistral* peuvent prendre les valeurs suivantes :

Paramètre MODTRAN	valeur	signification
<i>model</i>	1	tropical
	2	midlatitude summer
	3	midlatitude winter
	4	subarctic summer
	5	subarctic winter
	6	atmosphère standard US
	7	si nouveau modèle d'atmosphère
<i>imult</i>	0	pas de diffusion multiple
	1	de diffusion multiple
<i>ihaze</i>	0	aucune atténuation par aérosol
	1	aérosol type rural (visibilité 23 km)
	2	aérosol type rural (visibilité 5 km)
	3	aérosol type navy maritime
	4	aérosol type maritime (visibilité 23 km)
	5	aérosol type urbain (visibilité 5 km)
	6	aérosol type troposphérique (visibilité 50 km)
	7	aérosol type personnalisé (voir doc. MODTRAN)
	8	aérosol type brouillard (visibilité 0.2 km)
	9	aérosol type brouillard (visibilité 0.5 km)
10	aérosol type désert	

TAB. D.1 – Paramètres *MODTRAN*

D.3 Exemple de fichier météorologique

```
# FICHIER D'INITIALISATION DES DONNEES POUR CORINTHE
# Contient : Les donnees geom. utilisees dans "BD_pts" et "BD_scn"
# Les types de conditions limites par face
##### VERSION DU FICHIER DE DONNEES #####
1.1
##### ONJETS SUR SCENE #####
1
##### OBJET 1 #### inferieur a 2 #####
1 | nobj_sc
120 | objtyp_sc
DUNE_ONDULEE | obj_nom
Beton arme | obj_mat_th
48 | imax sg epais1 Nbr noeuds suiv. direction i
25 | jmax sg epais1 Nbr noeuds suiv. direction j
14 sgeom 0.02 | kmax sg epais1 Nbr noeuds suiv. direction k
-1 |Parpaing ciment| Face1(imin):CL Mat_opti | Conventions CL :
-1 |Parpaing ciment| Face2(imax):CL Mat_opti | >0:contact objet
-1 |Parpaing ciment| Face3(jmin):CL Mat_opti | =0:eclair sol +
-1 |Parpaing ciment| Face4(jmax):CL Mat_opti | pertes rad et conv
+0 |Parpaing ciment| Face5(kmin):CL Mat_opti | -1:flux nul
+0 |Parpaing ciment| Face6(kmax):CL Mat_opti | -2:temp.imposee
-----
0.0 0.0 0.0 | XO YO ZO Vecteur translation
1.0 0.0 0.0 |
0.0 1.0 0.0 | Matrice de rotation
0.0 0.0 1.0 |
0.531 | longueur
0.405 | profondeur
0.1 | hauteur
0.051 | amplitude ondulation
3. | nbr de periodes
##### OBJET 2 #### superieur a 1 #####
```

Dans le fichier d'initialisation `Data_Mistral`, il faut fournir le chemin, absolu ou relatif, d'accès à ce fichier. Un exemple est donné dans l'annexe D.2.1 pour la température d'air.

Chaque donnée est retrouvée dans le code thermique grâce à un mot-clé :

- TPSMN : temps écoulé depuis le début de la simulation (en minutes) ;
- TA_AV : température d'air (°C) ;
- VWIND : vitesse du vent (m/s) ;
- RG : rayonnement solaire global (W/m²) ;
- H_AIR : humidité de l'air (
- CWIND : cap du vent (en degrés à partir du Nord).

Annexe E

Résolution de l'équation de la chaleur par décomposition LU et méthode MSIP

L'équation de la chaleur est discrétisée puis résolue par une méthode aux volumes finis. Le système d'équations discrétisées est écrit sous forme matricielle. Sa forme réduite à l'instant $n + 1$ constitue le système linéaire suivant :

$$[A]^{n+1}\{T\}^{n+1} = \{B\}^n \quad (\text{E.1})$$

avec

- $[A]$ la matrice carrée implicite à l'instant $n + 1$;
- $\{T\}$ le vecteur température inconnu à l'instant $n + 1$;
- $\{B\}$ le vecteur second membre explicite au pas de temps précédent n .

Les méthodes d'élimination directe permettent de factoriser une matrice $[A]$ carrée pleine en un produit de deux matrices $[L][U]$ (matrices triangulaires respectivement inférieure et supérieure) :

$$[A] = [L][U] \quad (\text{E.2})$$

Par une factorisation classique LU (figure E.1), les zéros entre les diagonales ne sont pas conservés. Le remplissage des matrices $[L]$ et $[U]$ augmente de manière très importante le nombre de coefficients stockés ainsi que le nombre d'opérations pour chaque manipulation de ces matrices. Par cette méthode on perd donc le bénéfice de la structure très creuse de la matrice $[A]$ (neuf diagonales en 2D et 17 en 3D).

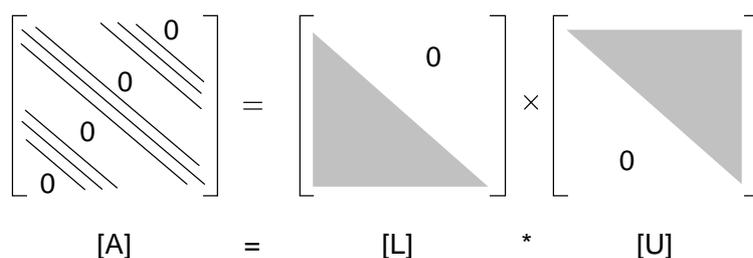


FIG. E.1 – Décomposition LU d'une matrice creuse

La méthode MSIP (Modified Strongly Implicit Procedure) a été développée par Schneider et Zedan [SZ81]. Elle est fondée sur la méthode SIP (Strongly Implicit Procedure) développée par Stone [Sto68]. Son principe est de conserver les zéros lors de la factorisation : la matrice originale $[A]$ est modifiée en lui adjoignant une matrice A' , qui permet d'obtenir une forme creuse pour les matrices de la décomposition $[L]$ et $[U]$ (figure E.2) avec :

$$[A + A'] = [L][U] \quad (\text{E.3})$$

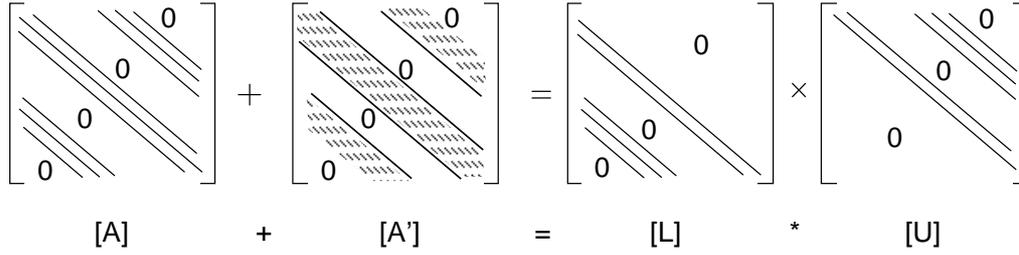


FIG. E.2 – Décomposition LU d'une matrice creuse

La matrice A' est introduite dans le système à résoudre (équation E.1), et celui-ci devient :

$$[A + A']\{T\} = \{B'\} \text{ avec } \{B'\} = \{B\} + [A']\{T\} \quad (\text{E.4})$$

La résolution de ce système est itérative, conformément à la procédure de convergence SIP de Stone :

$$[A + A']\{T\}^{n+1} = [A + A']\{T\}^n - ([A]\{T\}^n - \{B\}) \quad (\text{E.5})$$

En définissant les vecteurs différence et résidus suivants :

$$\begin{aligned} \{\delta\}^{n+1} &= \{T\}^{n+1} - \{T\}^n \\ \{R\}^{n+1} &= \{B\} - [A]\{T\}^n \end{aligned} \quad (\text{E.6})$$

on obtient :

$$[L][U]\{\delta\}^{n+1} = \{R\}^n \quad (\text{E.7})$$

Puis, en définissant le vecteur intermédiaire $\{V\}^{n+1} = [U]\{\delta\}^{n+1}$, la procédure prend la forme classique du procédé à deux pas :

$$[L]\{V\}^{n+1} = \{R\}^n \quad (\text{E.8})$$

et

$$[U]\{\delta\}^{n+1} = \{V\}^{n+1} \quad (\text{E.9})$$

On considère que le calcul a convergé vers la solution lorsque :

$$\|\{\delta\}^n\| \leq \varepsilon_{prec} \quad (\text{E.10})$$

où ε_{prec} est le critère de précision.

Annexe F

Fabrication et instrumentation de la maquette

Cette annexe présente les essais de démoulage du plâtre sur la tôle ondulée plastique de type 177/51. Les deux méthodes testées pour l'implantation des thermocouples dans la maquette sont exposées et le choix de la meilleure méthode est justifié. Enfin, une description pas à pas de la fabrication de la maquette finale est réalisée.

F.1 Essais de démoulage

Un moule de dimensions 10 cm×20 cm×10 cm est réalisé. Sa face inférieure est un morceau de tôle ondulée 177/51 de 10 cm×20 cm. Ses faces latérales sont en mélaminé. Après gâchage du plâtre, celui-ci est coulé dans le moule. Après environ 10 minutes, le plâtre est pris et le démoulage est possible. Les faces latérales du moule sont enlevées en premier. Ensuite, la face inférieure, constituée de tôle ondulée, se détache parfaitement du plâtre. Cet essai confirme qu'aucun agent de démoulage n'est nécessaire.

F.2 Essais d'implantation des sondes

Ce moulage nous permet de vérifier la facilité de démoulage du plâtre sur un moule fait de tôle ondulée. Deux méthodes d'implantation des thermocouples dans la maquette sont comparées : des sillons creusés avec une scie, une fois le plâtre sec, et une prise dans la masse des sondes lors du coulage du plâtre.

La première méthode consiste à réaliser un canal de petites dimensions avec une scie, puis d'introduire la ou les sondes, et enfin de reboucher le canal avec du plâtre encore liquide. Mais cette méthode est difficile à mettre en œuvre pour trois raisons. La première est qu'il est difficile d'effectuer un trait de scie parfaitement droit et régulier. La deuxième est que les canaux creusés avec une scie effritent le plâtre : on veut faire des canaux verticaux, et sur les côtés des crêtes il en résulte des "pointes", fragiles (voir figure F.1). La troisième raison pour laquelle des traits de scie sont peu indiqués pour le placement des thermocouples dans la maquette est que, même si on arrive à faire des canaux droits et réguliers, le rebouchage de ceux-ci avec du plâtre liquide amène des problèmes de possible présence d'air, à cause à la fois de la forte densité du plâtre et de la faible largeur des canaux.

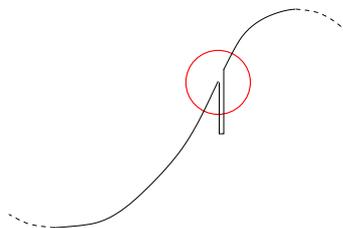


FIG. F.1 – Canal creusé à la scie dans le plâtre : fragilité du plâtre en surface, sur les côtés des crêtes, due aux canaux verticaux

Pour mettre en œuvre la deuxième méthode, trois morceaux de fil de thermocouple fixés ensemble comme l'illustre la figure F.2 sont introduits dans le moule, puis sont pris dans la masse lors du coulage du plâtre. Un trou a été réalisé dans une paroi latérale du moule pour faire passer les fils et les maintenir. Cette méthode est a priori satisfaisante du point de vue du placement des sondes. Elle a cependant deux inconvénients : même si le fait de faire passer les fils à travers des trous dans les parois latérales permet un placement assez pratique des sondes, ce n'est pas applicable pour la maquette définitive, car le démoulage s'avérerait très délicat, voire même impossible. De plus, notre moule-test est d'une largeur très inférieure à celle de la maquette : 10 cm contre 40 cm pour la maquette. Pour placer les sondes au centre du moule de 10 cm de largeur, la rigidité des fils est suffisante sur cette longueur (5 cm). Mais pour placer précisément les thermocouples au centre du moule de la maquette finale, soit à 20 cm des parois, la rigidité des fils des sondes n'est plus suffisante.

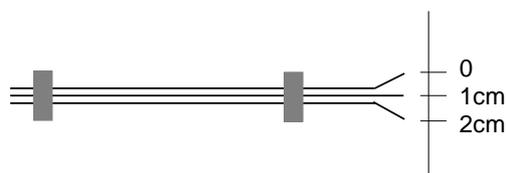


FIG. F.2 – Schéma de fixation des thermocouples

Malgré ses inconvénients, la méthode du coulage dans la masse est choisie. En effet, contrairement à la méthode du trait de scie, des solutions satisfaisantes à ses inconvénients peuvent être trouvées. Au lieu de passer les fils des sondes à travers une paroi, ceux-ci vont être fixés le long de la paroi du moule pendant le temps du coulage du plâtre. De plus, pour pallier le manque de rigidité des fils des sondes, les thermocouples vont être fixés par deux ou par trois, avec des bagues. Enfin, pour que les thermocouples affleurent à la surface de la maquette et qu'ils soient placés précisément, ceux-ci sont fixés avec de petites quantités de plâtre presque pris, avant de couler le reste du plâtre en plusieurs fois.

F.3 Fabrication de la maquette

Le moule est de dimensions 53.1 cm \times 40 cm \times 15.1 cm. Les faces latérales sont en mélaminé, et la face inférieure, qui sera ensuite la face supérieure de la maquette est en tôle ondulée plastique de type 177/51.

Sur la tôle ondulée, des repères ont été réalisés au marqueur pour signaler l'emplacement des thermocouples de surface. La maquette est moulée en plusieurs fois : d'abord, les thermocouples, et groupements de thermocouples, de surface sont fixés avec une petite quantité de plâtre presque dur (figure F.3). Cela correspond aux thermocouples (A, N, O), (E, R, S), (I, V, W), B, C, D, F, G, et H.



FIG. F.3 – Thermocouples de surface fixés, dans le moule de la maquette définitive, avec une petite quantité de plâtre presque pris



FIG. F.4 – Deuxième phase du moulage de la maquette

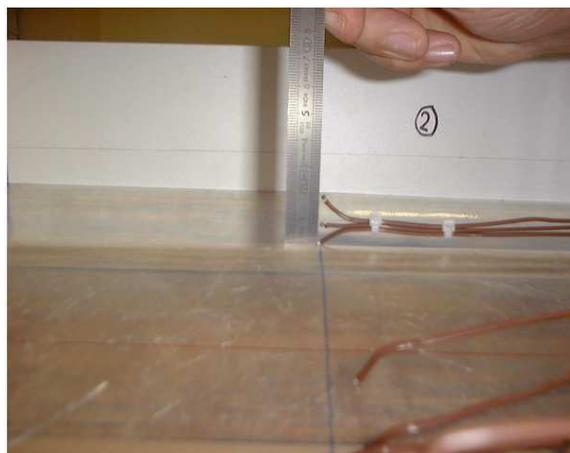


FIG. F.5 – Précision du placement des thermocouples à l'aide d'un réglelet millimétré



FIG. F.6 – Maquette finale instrumentée et démoulée

Le reste est coulé en trois fois (figure F.4), d'abord jusqu'au niveau des groupes de thermocouples (A, N, O) et (I, V, W). Puis lorsque le plâtre est pris, les groupes (P, Q) et (X, Y) sont fixés, comme précédemment, avec une petite quantité de plâtre presque pris, avant que le reste du moule soit comblé.

Remarque : précision du placement des thermocouples

Nous avons essayé de plier et de placer avec le plus grand soin les thermocouples, afin que ceux-ci soient séparés effectivement de 1 cm (voir figure F.5). Néanmoins une erreur est possible, estimée à environ ± 0.1 cm

Au bout de 24 heures, la maquette est démoulée (figure F.6) puis placée dans l'étuve, à 45°C avec le processus de *séchage*, pendant 20 jours, jusqu'à séchage complet.

Annexe G

Instruments de mesure

Afin de réaliser des mesures de températures à la surface et en profondeur de la maquette, des thermocouples de type K ont été placés à l'intérieur de celle-ci, comme décrit dans la section 4.2. Cette annexe présente chacun des instruments de mesure constituant le dispositif expérimental (voir figure 4.29). Les sondes de températures et leur étalonnage, sont d'abord présentées. Les autres instruments de mesure, placés autour de la maquette, sont ensuite décrits. Une brève présentation de la station d'acquisition des températures est tout d'abord réalisée ; puis la station météorologique et ses différents instruments de mesure sont présentés. Le fonctionnement de la caméra infrarouge est ensuite exposé.

G.1 Sondes de température

Les sondes de température implantées dans la maquette sont des thermocouples de type K. Ce paragraphe présente le thermocouple de type K, puis décrit la procédure d'étalonnage des thermocouples.

G.1.1 Le thermocouple de type K

La désignation officielle du thermocouple de type K est : nickel-chrome / nickel-aluminium. Le type K est toujours le thermocouple le plus utilisé dans l'industrie. Il a été initialement développé pour les milieux oxydants, et tous les autres milieux ne lui sont accessibles qu'au prix d'une protection soignée.

La température maximale se situe vers 1370 K, mais au-dessus de 1100 K l'oxydation provoque une dérive : le thermocouple sort progressivement de sa classe de tolérance. Il est toutefois possible de l'exposer brièvement à 1470 K et sa table de référence s'étend au-delà de 1570 K. Ce thermocouple s'utilise aussi en mesure du froid jusqu'à 100 K. Le couple thermoélectrique de type K est très répandu en raison de sa large plage de mesure et de son prix, mais sa stabilité est moins satisfaisante que celle d'autres thermocouples courants.

Lors de cycles de température, l'hystérésis qui se manifeste entre 470 K et 870 K est à l'origine de plusieurs degrés d'erreur. Cependant, d'après les simulations réalisées avec le code MISTRAL durant le dimensionnement de la maquette, dans notre cas la plage de mesure s'étendrait de 280 K à 360 K et aucun phénomène de cette nature n'est donc à craindre. Par ailleurs, la précision de mesure à ces températures est de ± 0.1 K ou $\pm 0.75\%$ de la température en °C.

G.1.2 Étalonnage des thermocouples

Avant d’implanter les thermocouples dans la maquette, leur étalonnage est nécessaire. Pour cela, les trente thermocouples sont placés dans un bain d’huile thermostaté puis reliés à la centrale d’acquisition SA32 (section G.2). Le bain d’huile est successivement réglé sur six températures différentes : 0°C, 20°C, 40°C, 60°C, 70°C et 80°C. Pour chacune de ces températures de bain, les températures relevées par la centrale d’acquisition sont notées (voir table G.1), puis les courbes d’étalonnage de chaque sonde sont établies. Les équations résultant de cet étalonnage sont ensuite programmées dans la centrale d’acquisition.

Température du bain (°C)	80	70	60	40	20	0
T1 (°C)	80.2	70.2	60.2	40	19.8	-0.2
T11 (°C)	78.8	69	58.9	38.9	18.8	-1.2
T12 (°C)	78.8	68.9	58.8	38.8	18.7	-1.3
T13 (°C)	78.7	68.8	58.8	38.8	18.7	-1.2
T14 (°C)	78.8	68.9	58.8	38.7	18.6	-1.4
T21 (°C)	78.7	68.9	58.8	38.8	18.7	-1.2
T22 (°C)	78.8	68.9	58.8	38.8	18.7	-1.3
T23 (°C)	78.7	68.9	58.8	38.7	18.7	-1.2
T24 (°C)	78.7	68.9	58.8	38.8	18.7	-1.3
T31 (°C)	78.7	68.9	58.7	38.8	18.7	-1.3
T32 (°C)	78.7	68.9	58.7	38.7	18.7	-1.3
T33 (°C)	78.7	68.8	58.7	38.7	18.6	-1.3
T34 (°C)	78.7	68.8	58.7	38.7	18.6	-1.3
T41 (°C)	78.7	68.9	58.7	38.8	18.7	-1.3
T42 (°C)	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR	ERR
T43 (°C)	78.7	68.9	58.7	38.8	18.7	-1.2
T44 (°C)	78.7	68.9	58.7	38.8	18.7	-1.3
T51 (°C)	78.9	69	58.9	39	19	-1
T52 (°C)	78.8	69	58.8	38.9	18.9	-1.1
T53 (°C)	78.8	69.1	58.9	39	18.8	-1.1
T54 (°C)	78.9	69	58.8	38.9	18.9	-1
T61 (°C)	78.8	69.1	58.9	39	18.9	-1.1
T62 (°C)	78.8	69.1	58.9	39	18.9	-1.1
T63 (°C)	78.8	69.1	58.9	39	18.9	-1.1
T64 (°C)	78.8	69.1	58.9	39	18.9	-1.1
T71 (°C)	78.9	69.1	58.9	39.1	19	-0.9
T72 (°C)	78.9	69.1	58.9	39.1	19	-0.9
T73 (°C)	78.9	69.2	59	39.1	19	-0.9
T74 (°C)	79.3	69.5	59.2	39.2	18.9	-1.3
T81 (°C)	79	69.2	59	39.2	19.1	-0.9
T82 (°C)	78.9	69.2	59	39.2	19.1	-0.9

TAB. G.1 – Étalonnage des thermocouples avant coulage dans la maquette

G.2 Centrale d'acquisition

La centrale d'acquisition des températures utilisée est le modèle SA32 de la marque AOIP (voir figure G.1). Elle comporte quatre blocs de 8 voies chacune, permettant donc d'enregistrer les signaux de 32 sondes. En façade, un écran à cristaux liquides et des touches permettent la programmation de l'enregistrement des mesures. L'enregistrement est organisé en "tâches", ou procédures, définissant les voies à enregistrer, le début et la fin des enregistrements ainsi que la fréquence d'acquisition, et le mode de stockage des résultats (mémoire de la centrale, carte PCMCIA ou sortie RS232). La programmation de la SA32 est également possible grâce au logiciel *LS32W*. Avec ce logiciel, la programmation est beaucoup plus aisée, notamment lors de l'enregistrement des courbes d'étalonnage de chaque thermocouple, mais les fonctionnalités de programmation sont les mêmes. L'autre avantage du logiciel *LS32W* est la visualisation des mesures en temps réel.

La centrale SA32 permet toute sorte de mesures : résistances, thermocouples, tensions, ... Pour les mesures avec des thermocouples, la compensation de la jonction froide est réalisée avec une sonde au platine.

Son alimentation peut s'effectuer soit en courant alternatif 220 V (50 Hz) soit en courant continu 12 V. Dans notre cas, l'alimentation en 12 V peut s'avérer utile à des fins d'autonomie du dispositif de mesure.

G.3 Station météorologique

La station météorologique (figure G.2) est de type ENERCO 407, distribuée par Cimel Electronique. Elle comporte cinq capteurs : une sonde de température d'air et une sonde d'humidité d'air, toutes deux dans un abri, un anémomètre et une girouette, ainsi qu'un pyranomètre (voir leurs caractéristiques dans la table G.2). Tous ces capteurs sont reliés à un coffret électronique, lui-même placé dans un abri en polyester armé avec ventilation naturelle et habillage interne pour réduire les effets de condensation. Un panneau solaire incorporé au portillon permet d'alimenter le boîtier électronique.



FIG. G.1 – Station d'acquisition des températures SA32



FIG. G.2 – Station météorologique autonome ENERCO 407 avec cinq capteurs mesurant la vitesse et la direction du vent, la température et l'humidité de l'air, et l'éclairement solaire visible

Le capteur de température est une sonde à résistance platine 100 ohms à 0°C. Pour la mesure de l'humidité relative, la sonde est à variation capacitive. L'anémomètre est un capteur à impulsions ; la détection s'effectue sans contact par un dispositif optoélectronique. Le signal délivré est d'une impulsion par mètre de vent passé.

La girouette est à 8 secteurs encodés en binaire naturel sur 3 bits. Le pyranomètre à thermopile du type noir et blanc est composé de 64 thermocouples cuivre-constantan disposés en étoile et compensés en température. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- longueur d'onde d'utilisation : 300 à 2500 nm ;
- sensibilité : 100 $mV/mW.cm^2$;
- résistance interne : 100 ohm environ ;
- précision : 1 % ;
- sans effet d'azimut ni de cosinus ;
- temps de réponse à 99% : 30 s.

Pour la configuration de la station et la récupération des mesures, le logiciel *CIMMET* est installé sur un PC portable, relié à la station par prise RS-232. Ce logiciel permet en outre la visualisation des données et l'affichage des courbes.

Paramètre	Cadence de mesure	Étendue de mesure	Résolution	Précision à 25°
Température	5s	-40 à +60°C	0.1°C	0.02°C
Humidité	30s	0-100%	0.5%	0.5%
Vitesse du vent	0.5s	0-64 m/s	1 m/s	
Direction du vent	0.5s	360°	5°	>1°
Rayonnement	5s	-5 à +1.5 W/m^2	1J	0.05%

TAB. G.2 – Caractéristiques des capteurs de la station météorologique

G.4 Caméra infrarouge

La caméra infrarouge utilisée est une caméra de marque Inframetrics, modèle 760. Elle dispose d'un écran LCD pour visualiser l'image et d'un port disquette pour la sauvegarde manuelle des images. Elle dispose également d'un port série RS-232, d'une sortie RGB, d'une sortie vidéo digitale et d'une sortie B/W (noir et blanc). Le coffret de balayage comporte des miroirs asservis (galvanomètres) effectuant un balayage horizontal et vertical. Lorsque le système est en fonctionnement, les galvanomètres créent un champ magnétique qui fait osciller un miroir monté sur un axe à ressort avec une contre-réaction électronique. Le balayage horizontal est réalisé à une fréquence de 4kHz en mode sinusoïdal aller et retour, soit 8kHz. Le balayage vertical s'effectue en dents de scie, à un format standard TV.

Les miroirs de la caméra sont montés dans un boîtier scellé et sous vide. Une mise au point motorisée et des filtres (bande II, bande III ou aucun filtre) fonctionnent par télécommande. Une référence corps noir thermique rotative est visualisée par le détecteur à une fréquence de 50 Hz. Le détecteur, composé de mercure/cadmium/telluride, est refroidi par un micro-compresseur intégré à cycle Stirling, à une température de 77 K. Le trajet optique de la caméra est présenté sur la figure G.3. Le rayonnement thermique en trajet parallèle pénètre dans le boîtier sous vide de la caméra à travers une fenêtre de germanium, il est dévié par les galvanomètres horizontal et vertical, et sort par une deuxième fenêtre pour passer à travers la lentille de focalisation et atteindre le détecteur.

Selon le filtre et la gamme choisis, on peut régler la fenêtre de la température : de 2 K à 100 K et de 20 à 1000 K, respectivement pour la gamme normale et pour la gamme étendue. Un codeur rotatif permet de régler la température correspondant à une intensité d'image de gris moyen. Autrement dit, si on observe une scène qui est en moyenne à une température de 300 K avec un écart-type de 8 K, on réglera la fenêtre de température sur 20 K et on déplacera le

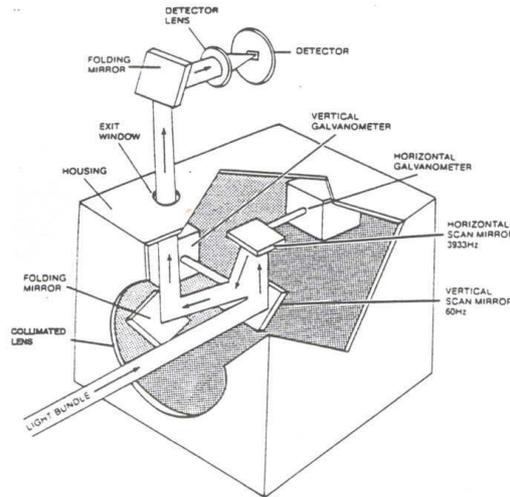


FIG. G.3 – Trajet optique de la caméra Inframetrics 760

codeur rotatif afin d'avoir une fenêtre d'observation de 290 K à 310 K.

Les images produites par la caméra infrarouge ne seront pas utilisées comme mesures de la température de surface. La visualisation infrarouge de la surface de la maquette à travers la caméra n'est présente qu'à des fins de contrôle. On veut en effet vérifier l'homogénéité de la surface, c'est-à-dire voir si la présence des thermocouples très près de la surface influence ou non la température de surface.

G.5 Chaîne de mesure

La chaîne de mesures est constituée des éléments présentés précédemment. La station météorologique est autonome grâce au panneau solaire placé sur son portillon. Cependant, elle ne stocke que les moyennes horaires. Afin d'accéder aux données instantanées et de les stocker, les mesures doivent être commandées et récupérées via un PC. Pour cela, un PC portable est relié à la station météorologique, et le logiciel *CIMSTA* de la station météo permet de configurer l'appel à la station météorologique toutes les minutes.

La centrale d'acquisition des températures stocke les mesures à la fois dans sa mémoire interne et dans une carte mémoire *PCMCIA*. Elle peut être alimentée soit en 220 V soit en courant continu 12 V. Les mesures s'effectuent en extérieur, sans aucun moyen de disposer d'électricité en continu. Il faut donc rendre le dispositif de mesure autonome, et par conséquent exploiter l'alimentation de la station d'acquisition en 12 V.

Pour alimenter à la fois le PC et la centrale d'acquisition, et rendre le dispositif autonome, le montage est le suivant : un panneau solaire, d'une surface d'environ $0.5m^2$ alimente une batterie à décharge lente, après passage du courant dans un régulateur. Ce régulateur limite les tensions de sortie entre 11.5 et 13 V.

La caméra infrarouge est utilisée ponctuellement, et elle est alimentée grâce à un groupe électrogène.

Annexe H

Résultats expérimentaux complémentaires : campagne de mesure d'août

Outre leur rôle d'analyse d'erreur de température, les mesures réalisées du 29 au 30 août 2002 nous ont permis de mettre en place le dispositif et le protocole expérimental. Elles nous ont également permis de visualiser les températures de surface de la maquette et d'en tirer les premières conclusions quant à la variabilité spatiale de la température de surface.

Afin de mesurer la température de l'air, en l'absence de station météorologique pour cette campagne de mise en place, un thermocouple est placé sous la maquette, à environ 10 cm de la face inférieure. La figure H.1 montre l'évolution de cette température d'air. Pendant cette journée de mesure, le ciel est très ensoleillé et très dégagé, et le vent est quasiment nul.

Sur la figure H.1 les mesures s'arrêtent avant midi, à cause d'un problème de câblage du thermocouple à la station d'acquisition. D'autres problèmes du même ordre sont survenus sur d'autres thermocouples : les enregistrements de trois autres sondes s'arrêtent également avant midi. Néanmoins, aucune difficulté n'est à noter quant aux sondes elles-mêmes, et les mesures de température en surface et au sein de la maquette sont toutes correctes *a priori*. De plus, le câblage de toutes les sondes a été revu après cette journée de mesure, et n'a plus eu de défaillance dans les autres campagnes.

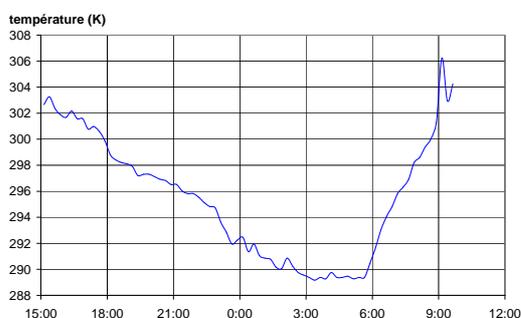


FIG. H.1 – Température de l'air mesurée sous la maquette pendant la mise en place de la campagne de mesure, du 29 au 30 août 2002

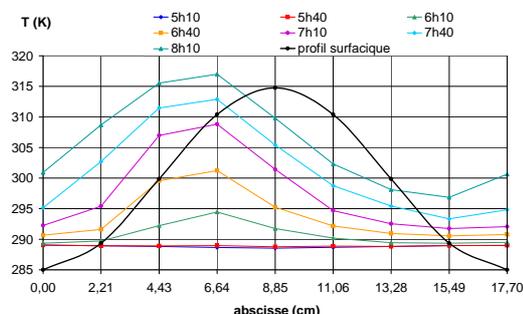


FIG. H.2 – Températures mesurées en surface de la crête centrale le 30 août 2002, le matin

La maquette est mise en place vers 15h. La figure H.2 montre les températures de surface de la crête centrale le matin. Les températures de surface à 5h10 et 5h40 sont très proches sur tout le profil : le soleil ne s'est pas encore levé, et les températures sont quasiment uniformes sur toute la surface. Ensuite, les températures commencent à croître partout, et de manière beaucoup plus importante sur le flanc Est de la crête, flanc recevant l'éclairement direct du soleil. De toute la journée, c'est à 10h10 que les contrastes sont les plus importants en surface : 20 K entre les points D et H. Ce contraste est le plus élevé trouvé durant les trois campagnes d'essais.

À 11h10, les températures sont plus élevées sur le flanc Est, et progressivement les contrastes diminuent (figure H.3). Puis à partir de 12h10 c'est sur le flanc Ouest que les températures sont les plus élevées. À partir de 13h10, les températures commencent à décroître sur toute la surface. Leur décroissance est plus importante sur le flanc Est, qui est passé à l'ombre, et les températures les plus élevées se trouvent toujours sur le flanc Ouest (figure H.4).

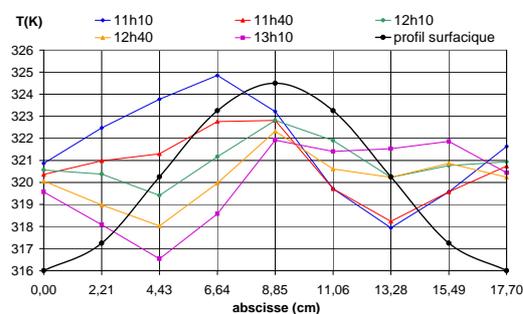


FIG. H.3 – Températures mesurées en surface de la crête centrale le 30 août 2002, en début d'après-midi

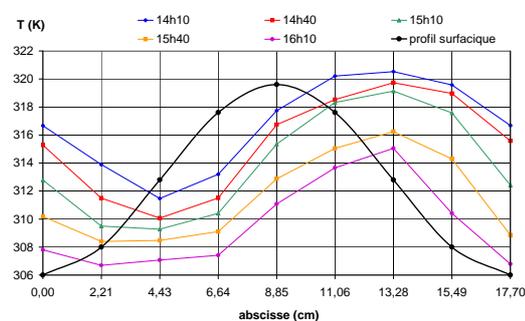


FIG. H.4 – Températures mesurées en surface de la crête centrale le 30 août 2002, dans l'après-midi

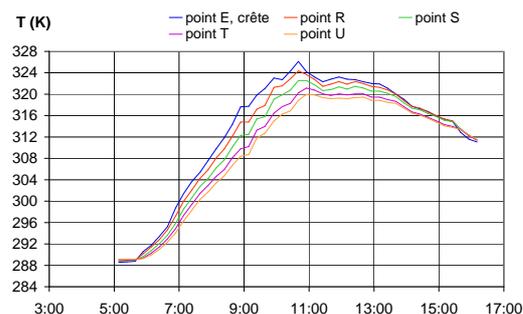


FIG. H.5 – Températures mesurées sous la crête –point E– tous les cm, le 30 août 2002

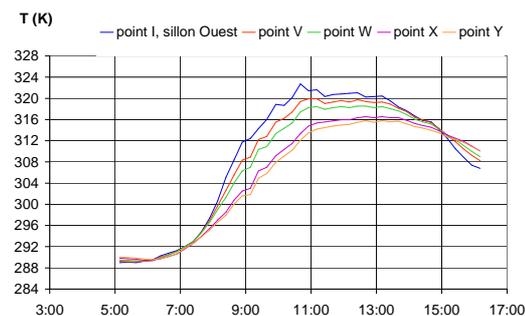


FIG. H.6 – Températures mesurées sous le sillon Ouest –point I– tous les cm, le 30 août 2002

Des mesures en profondeur sont également réalisées, à la verticale de la crête et des sillons. La figure H.5 montre ces températures sous la crête aux cinq points considérés, au cours de la journée du 30 août 2002. Les courbes de température sont placées dans le même ordre que les points de mesure à partir de 5h50, puis se croisent vers 15h40 : il semble s'opérer une inversion des températures lorsque le soleil décline. Par ailleurs, les phénomènes ayant lieu en surface sont amortis et retardés par l'inertie thermique du matériau. Ces mêmes phénomènes sont observables à la verticale du sillon Ouest (figure H.6).

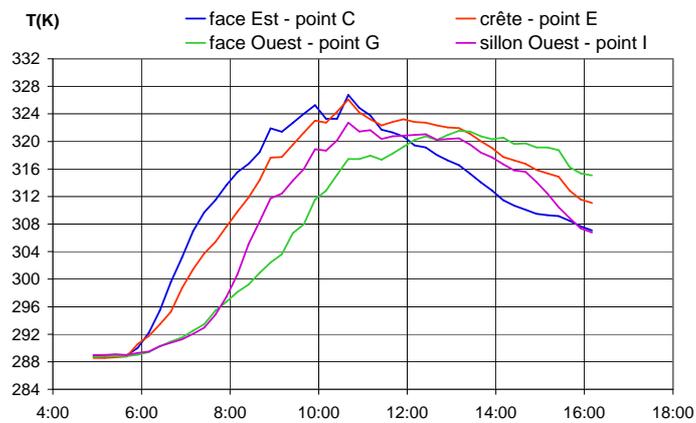


FIG. H.7 – Températures en surface de la crête en quatre points du profil –face Est, crête, face Ouest et sillon– le 30 août 2002

Annexe I

Coefficients des polynômes de la fonction $a_2(x, t)$

La fonction $a(x, t)$ définie dans la section 6.2.2 est approchée par la fonction $a_2(x, t)$ de la forme suivante :

$$a_2(x, t) = p_3t^3 + p_2t^2 + p_1t + p_0 \quad (\text{I.1})$$

Deux modélisations, par des polynômes d'ordre 2 et d'ordre 3 sont réalisées. Les coefficients p_i sont les suivants :

point	Polynômes d'ordre 2			Polynômes d'ordre 3			
	p_2	p_1	p_0	p_3	p_2	p_1	p_0
A	9.9239	-9.9031	2.1966	4.4815	1.241	-4.6425	1.2136
A'	11.903	-12.898	3.241	0.8734	10.211	-11.873	3.0494
B	13.231	-15.245	4.1524	-4.2637	21.492	-20.25	5.0876
B'	13.428	-16.306	4.72	-9.7186	32.258	-27.714	6.8519
C	12.532	-16.073	4.9246	-15.051	41.694	-33.741	8.2262
C'	10.608	-14.486	4.7032	-18.406	46.27	-36.092	8.7407
D	7.6201	-11.366	3.9625	-18.241	42.962	-32.778	7.9638
D'	3.9299	-6.9975	2.738	-14.541	32.102	-24.066	5.9275
E	0.6284	-2.5855	1.3457	-9.25	18.55	-13.444	3.3748
E'	-1.272	0.5258	0.2129	-5.2132	8.8285	-5.5937	1.3564
F	-1.3854	1.6348	-0.3905	-3.3143	5.0361	-2.2557	0.3365
F'	-0.2615	1.2158	-0.5527	-2.145	3.8945	-1.3022	-0.0822
G	1.5074	-0.134	-0.4074	-0.839	3.1303	-1.1189	-0.2234
G'	3.6808	-2.1954	-0.0012	1.046	1.6542	-0.9676	-0.2306
H	5.8554	-4.532	0.561	3.1249	-0.2079	-0.8585	-0.1254
H'	7.9201	-7.06	1.2738	4.5603	-0.9155	-1.7069	0.2735
I	9.9239	-9.9031	2.1966	4.4815	1.241	-4.6425	1.2136

Les résultats concernant les polynômes d'ordre 2 sont analysés en section 6.2.5. Les courbes concernant les polynômes d'ordre 3 sont tracées ci-dessous (figures I.1 à I.3).

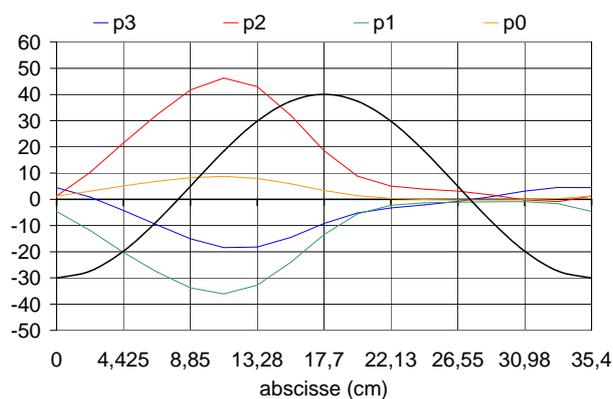


FIG. I.1 – Evolution des coefficients p_0 , p_1 , p_2 et p_3 de la fonction $a_2(x, t)$ en fonction de l'abscisse x

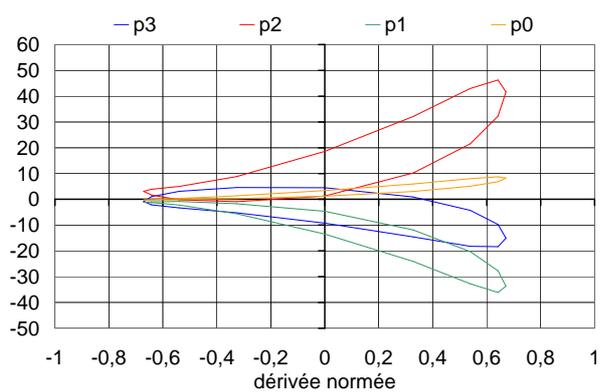


FIG. I.2 – Evolution des coefficients p_0 , p_1 , p_2 et p_3 de la fonction $a_2(x, t)$ en fonction de la pente \dot{x} au point d'abscisse x

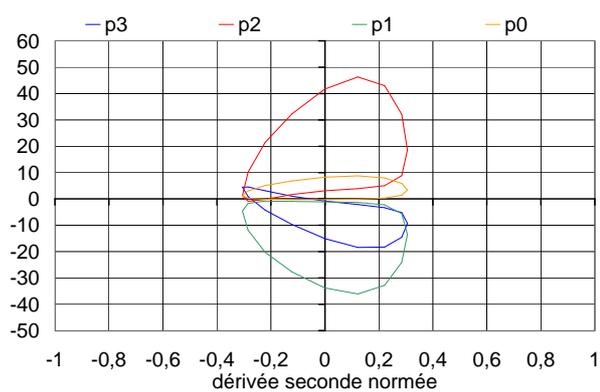


FIG. I.3 – Evolution des coefficients p_0 , p_1 , p_2 et p_3 de la fonction $a_2(x, t)$ en fonction de la dérivée de la pente \ddot{x} au point d'abscisse x

Annexe J

Méthode des quadripôles

La méthode dite des quadripôles thermiques est exposée. La démarche est explicitée pour un mur d'épaisseur l , sans source interne et à l'équilibre thermique à l'instant initial, soit :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \\ T = 0 \quad \text{à} \quad t = 0 \end{cases} \quad (\text{J.1})$$

Appelons θ_e et θ_s les transformées de Laplace des températures en $z = 0$ et $z = e$, Φ_e et Φ_s les transformées de Laplace des flux en $z = 0$ et $z = e$. De manière générale, le problème étant linéaire, il existe une relation linéaire entre les grandeurs d'entrée (θ_e et Φ_e) et les grandeurs de sortie (θ_s et Φ_s), soit :

$$\begin{cases} \theta_e = A\theta_s + B\Phi_s \\ \Phi_e = C\theta_s + D\Phi_s \end{cases} \quad (\text{J.2})$$

où la matrice $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ est la matrice de transfert inverse du quadripôle associé au mur (figure J.1).

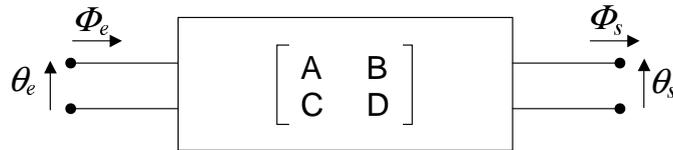


FIG. J.1 – Quadripôle d'un mur passif

Le système J.1 après transformation de Laplace devient :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{\mathcal{P}}{a} \theta \quad (\text{J.3})$$

dont la solution est :

$$\theta = K_1 \sinh \alpha z + K_2 \cosh \alpha z \quad (\text{J.4})$$

avec $\alpha^2 = \mathcal{P}/a$ (\mathcal{P} variable de Laplace).

À la température T , on associe le flux ϕ :

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial z} \quad (\text{J.5})$$

Après transformation de Laplace :

$$\Phi = -\lambda S \frac{d\theta}{dz} \quad (\text{J.6})$$

soit :

$$\begin{cases} \theta_e = \cosh \alpha l \theta_s + \frac{1}{\lambda D} \frac{\sinh \alpha l}{\alpha} \Phi_s \\ \Phi_e = \lambda S \alpha \sinh \alpha l \theta_s + \cosh \alpha l \Phi_s \end{cases} \quad (\text{J.7})$$

et par suite (relation J.2) :

$$\begin{cases} A = D = \cosh \alpha l \\ B = \frac{\sinh \alpha l}{\lambda S \alpha} \\ C = \lambda S \alpha \sinh \alpha l \end{cases} \quad (\text{J.8})$$

Le système étant symétrique et passif, il existe bien deux relations entre les termes de la matrice :

$$\begin{aligned} A &= D && \text{(système symétrique)} \\ AD - BC &= 1 && \text{(système passif)} \end{aligned}$$

Pour des régimes périodiques établis, il est plus intéressant d'opérer une décomposition en série de Fourier et ainsi de travailler en régime sinusoïdal établi, soit :

$$T = T_m \exp(i\omega t) \quad (\text{J.9})$$

$$\phi = \phi_m \exp(i\omega t) \quad (\text{J.10})$$

L'équation J.3 et la relation J.6 deviennent :

$$\begin{cases} \frac{d^2 T_m}{dz^2} = \frac{i\omega}{a} T_m \\ \phi_m = -\lambda S \frac{dT_m}{dz} \end{cases} \quad (\text{J.11})$$

Le reste du développement est alors inchangé : il suffit de remplacer dans les résultats \mathcal{P} par $i\omega$, θ par T_m et Φ par ϕ_m .

Résumé :

Cette étude traite de la simulation de la variabilité spatiale et temporelle de la température de surface pour des sols avec relief. L'approche 1D développée pour les modèles simplifiés consiste à exprimer la température en un point de la surface du sol avec relief comme une combinaison d'une température "ombre" et d'une température "soleil" du sol équivalent plat horizontal. Les phénomènes prépondérants de la variabilité de la température sont isolés par la réalisation de mesures en extérieur sur une maquette (en plâtre) à profil sinusoïdal. Les mesures obtenues permettent de valider le code thermique 3D de référence. Différents modèles analytiques 1D sont développés et validés par rapport à ce code. L'application de la méthode "ombre/soleil" par passage dans l'espace de Fourier conduit à une bonne concordance entre le modèle et la solution de référence 3D.

Mots-clés :

température de surface, variabilité spatiale, variabilité temporelle, sol périodique, relief, modèle analytique, mesures, espace de Fourier, infrarouge, thermique.

Abstract :

This study deals with the simulation of the spatial and temporal variability of surface temperature for grounds with relief. The developed 1D approach of the simplified model expresses the temperature of a point by a combination of the "shadow" and "sun" temperatures of a corresponding horizontal flat soil. The phenomena dominating the temperature variability was demonstrated by measurements made over a model (made of plaster) with a sinusoidal profile. The results allow us to validate the 3D thermal code. Several analytical 1D models are developed and validated with this 3D code. Applying the "sun/shadow" method through the Fourier domain leads to a good agreement between the model and the 3D reference solution.

Key words :

surface temperature, spatial variability, temporal variability, periodic profile, relief, analytical modeling, measures, Fourier domain, infrared, thermal.