



# MODÈLES PHYSIQUES ET ANALYSE D'IMAGES POUR LA SIMULATION DE SCÈNES INFRAROUGES

Jean-Pierre Gambotto et Vincent Leroy

MATRA - LTIS

6, rue Dewoitine B.P.14, F78142 Velizy Villacoublay Cedex (France)

**Résumé.** Cet article présente une méthode d'analyse/synthèse pour la simulation de scènes infrarouges réalistes. L'approche utilise des modèles physiques pour prédire les radiométries infrarouges d'une scène naturelle ainsi que des outils d'analyse d'image pour fusionner les scènes synthétiques avec des images réelles. Les algorithmes développés permettent la simulation d'une même scène pour différentes conditions climatiques et à une heure quelconque.

**Abstract.** This paper describes an analysis/synthesis simulation procedure for the generation of realistic infrared images of outdoor scenes. The approach is based on combining synthetic scenes with real images using segmentation algorithms and region analysis. Physics models are used to predict the infrared radiometries of the synthetic scenes. The developed algorithms can generate the same scene at a different time of day or under different climatic conditions.

## 1 INTRODUCTION

Les images infrarouges (IR) de scènes naturelles sont utilisées pour l'interprétation de scènes [7], en télédétection [8] ainsi qu'en robotique mobile pour l'analyse du terrain [2]. La température de surface d'un objet dépend des échanges de chaleur entre cet objet et son environnement ainsi que des propriétés physiques du matériau. Plusieurs modèles mathématiques ont été développés afin de modéliser le comportement thermique des sols et des végétaux. Cet article présente, tout d'abord, une description de ces modèles et analyse les paramètres permettant d'expliquer le contraste dans l'image IR.

L'algorithme de simulation est présenté sur la figure 1. La phase d'analyse comprend deux étapes. En premier lieu, une segmentation de l'image originale en régions homogènes. A cette étape, un étiquetage est réalisé afin d'associer à chaque région un matériau et une orientation pré-définis. Ensuite, un algorithme permet d'extraire un signal de texture de l'image originale.

A la phase de synthèse, les modèles thermiques sont utilisés pour déterminer les températures de chaque surface, puis calculer les radiométries de l'image thermique. Une image, où chaque région a un niveau de gris constant, est générée lors de cette première étape. Les paramètres d'environnement peuvent être modifiés afin d'ajuster au mieux l'image synthétique à l'image réelle. La modification de ces paramètres permet aussi de générer la même scène à une heure différente de la journée ou pour une autre saison.

Une seconde étape permet de fusionner le signal de texture avec les radiométries de l'image synthétique. Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de textures réelles dans le processus de synthèse améliore largement le réalisme de la simulation. Un certain nombre d'outils de traitement ont aussi été développés pour modifier le signal de texture afin de rendre compte des évolutions temporelles de la scène (i.e. la même scène à une heure ou une saison différente).

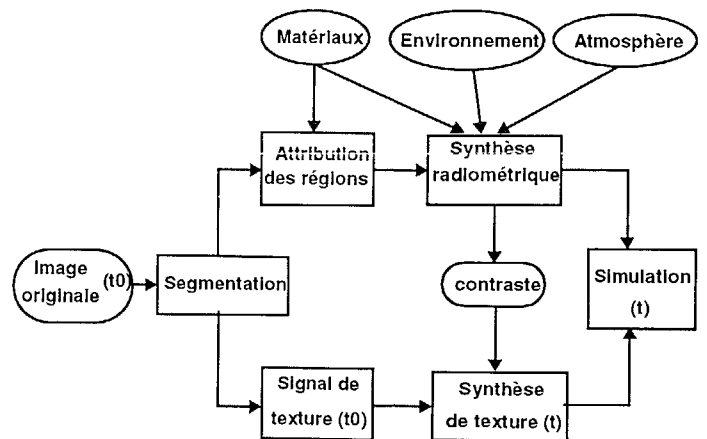


Figure 1: Simulation de scènes infrarouges.

## 2 MODÈLES PHYSIQUES

Plusieurs modèles mathématiques ont été développés afin d'expliquer les mécanismes de transfert de la chaleur dans le sol. L'hypothèse généralement utilisée est que les échanges de chaleur ont lieu perpendiculairement à la surface. Cette hypothèse est justifiée lorsque l'on s'intéresse à des surfaces de tailles assez grandes. La température  $T$  dans un milieu homogène de diffusivité thermique  $\kappa$  vérifie alors l'équation 1D de la chaleur:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

où  $t$  est le temps et  $z$  la profondeur. Les solutions de cette équation aux dérivées partielles en  $z$  et  $t$  dépendent des conditions aux limites. Dans le cas d'un sol homogène, la condition la plus complexe est située en surface du matériau. Trois paramètres: la diffusivité thermique  $\kappa$  ( $m^2 s^{-1}$ ), l'inertie thermique  $I$  ( $W s^{1/2} m^{-2} K^{-1}$ ), et la conductivité thermique  $K$  ( $W m^{-1} K^{-1}$ ) sont utilisés pour décrire le comportement thermique des matériaux. Ils vérifient la relation:

$$I = \frac{K}{\sqrt{\kappa}} \quad (2)$$



## 2.1 Bilan d'énergie

Le sol reçoit des radiations et en réémet une partie. Cette différence  $R_n$  entre rayonnement reçu et rayonnement émis est appelé "rayonnement net". Les radiations intervenant sont celles des courtes longueurs d'ondes (rayonnement solaire), et celles situées dans l'infrarouge (rayonnement des corps).

- **Le soleil** est la principale source d'énergie. On note  $W_{soleil}$  la partie directe de cette énergie qui atteint la Terre. Elle se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffusé par le ciel. Une partie de cette énergie est absorbée par le sol et a pour valeur:  $(1 - A)W_{soleil}$ , où  $A$  est l'albédo de la surface (rapport entre l'énergie réfléchie par la surface et l'énergie reçue).
- **L'atmosphère** réémet dans l'infrarouge une partie de l'énergie solaire qu'elle a absorbée. Soit  $W_{ciel}$  cette énergie et  $\epsilon_g$  l'émissivité du matériau considéré. L'énergie absorbée par la surface a pour valeur:  $\epsilon_g W_{ciel}$ .
- **Le matériau** émet aussi des radiations vers l'atmosphère dans l'infrarouge thermique. On note  $W_{sol}$  ce terme. Le rayonnement net a donc pour valeur:

$$R_n = (1 - A)W_{soleil} + \epsilon_g W_{ciel} - W_{sol} \quad (3)$$

L'énergie absorbée par le matériau est dissipée par les phénomènes de conduction, convection et évaporation. L'équation de conservation de l'énergie à la surface du sol est donnée par:

$$R_n = W_{cv} + W_{cd} + W_{evap} \quad (4)$$

où  $W_{cv}$  est l'énergie perdue par convection,  $W_{cd}$  le terme de conduction et  $W_{evap}$  l'énergie perdue par évaporation. Les expressions de ces différents termes peuvent être retrouvées dans la littérature [1, 6]. On a:

$$W_{ciel} = \sigma T_{ciel}^4 \quad (5)$$

$$W_{sol} = \epsilon_g \sigma T_g^4 \quad (6)$$

où  $\sigma$  est la constante de Boltzman,  $T_g$  la température du sol et  $T_{ciel}$  la température effective du ciel. Le flux thermique dans le sol est fonction de la conductivité thermique du matériau  $K$  et a pour valeur:

$$W_{cd} = K \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7)$$

L'énergie perdue par convection est donnée par:

$$W_{cv} = h[T_g - T_a] \quad (8)$$

où  $T_a$  est la température de l'air et le coefficient de convection  $h$  dépend principalement de la vitesse du vent à la surface du matériau. L'énergie perdue par évaporation a une forme similaire:

$$W_{evap} = h_{evap}(Q(T_g) - Q(T_a)) \quad (9)$$

où  $h_{evap}$  est fonction de la vitesse du vent et de la chaleur latente de vaporisation de l'eau  $L$ , et les paramètres  $Q(T_g)$  et  $Q(T_a)$  dépendent du taux d'humidité du sol et de l'air aux températures considérées.

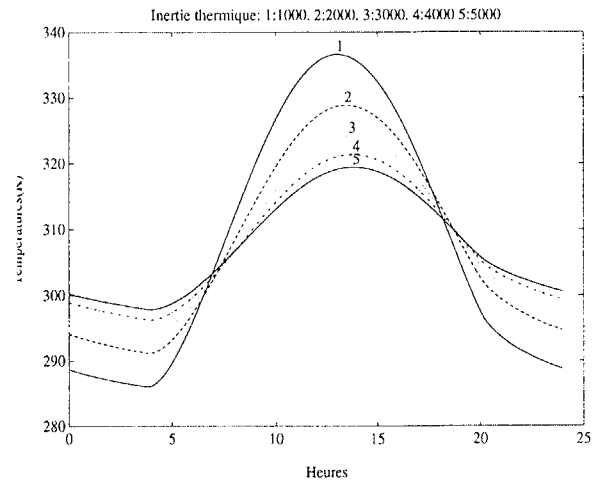


Figure 2: Courbes de températures en fonction de l'inertie thermique du matériau.

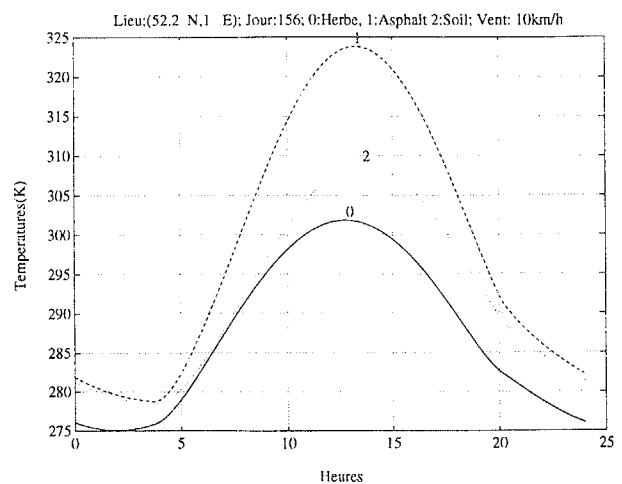


Figure 3: Courbes de températures pour l'herbe, l'asphalte et le sol, en été.

## 2.2 Un modèle de végétaux

La modélisation des échanges d'énergie dans un couvert végétal est plus complexe que celle présentée précédemment pour les matériaux inertes. La complexité vient de la multiplicité des différentes interfaces: sol-végétaux, végétaux-atmosphère et différentes couches de la canopée. Des modèles sont proposés dans la littérature pour prendre en compte des terrains partiellement couverts d'une couche de végétation [1], ou bien les différents étages d'une canopée. Ils intéressent les domaines de la climatologie (modélisation des échanges d'énergie et de masse à l'échelle du globe ou à l'échelle régionale), et de l'agronomie (calcul du bilan hydrique et du bilan d'énergie à l'échelle de la plante où bien à l'échelle de la parcelle cultivée). Nous présentons ici, une modélisation plus simple qui permet de prédire la température de surface d'une feuille [5].

Une feuille est représentée comme une plaque fine ayant des dimensions caractéristiques, des propriétés de réflectivité spécifiques, ainsi qu'un coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. La photosynthèse a un effet négligeable sur la température de la feuille, et l'énergie dissipée par conduction dans la feuille est négligeable. L'équation de conservation de l'énergie en surface de la feuille est donc donnée par:

$$(1 - A)W_{soleil} + \epsilon_f W_{ciel} - W_f = W_{cv} + W_{evap} \quad (10)$$

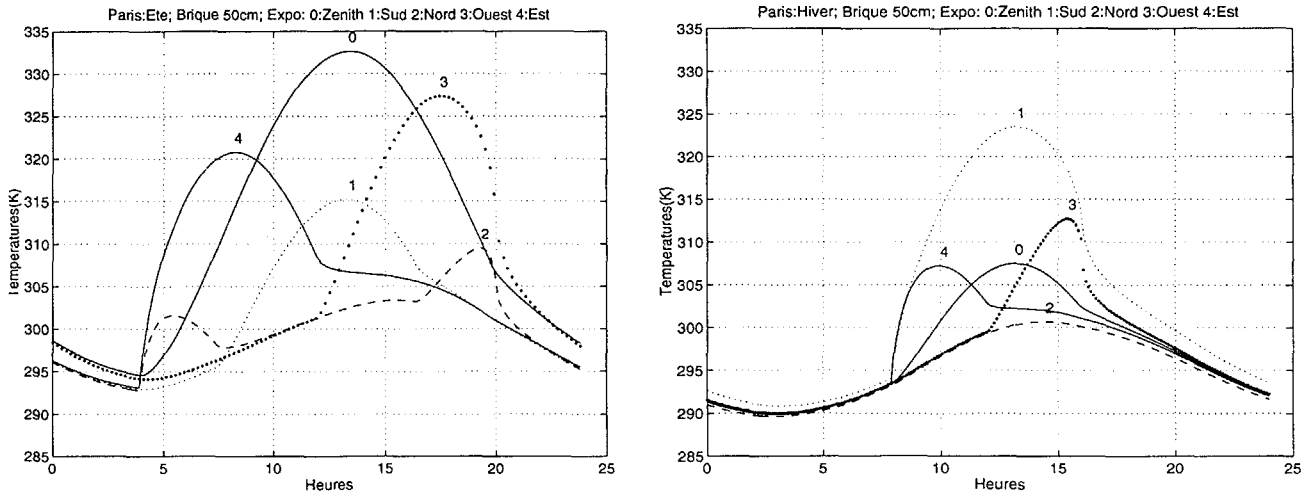


Figure 4: Courbes de températures d'un mur de brique en fonction de l'orientation de la surface, en été et en hiver.

où  $\epsilon_f$  est l'émissivité de la feuille,  $W_f$  l'énergie rayonnée par la feuille, et l'énergie perdue par convection  $W_{cv}$  dépend de la forme et des dimensions de la feuille. L'énergie perdue par évaporation est donnée par le produit:

$$W_{evap} = LT_f E \quad (11)$$

Le taux d'évaporation  $E$  ( $kgm^{-2}s^{-1}$ ) est fonction de la résistance de la feuille à l'évaporation  $r_s$  (en  $sm^{-1}$ ), ainsi que du taux d'humidité de l'air. La valeur de la résistance  $r_s$  est une caractéristique de l'espèce végétale qui peut varier en fonction de l'état d'irrigation de la plante.

### 2.3 Calcul de la température

Du fait de la non-linéarité des conditions aux limites en surface du matériau, il n'est pas possible de trouver une solution analytique à l'équation de la chaleur dans le cas général. Dans cette étude, nous avons utilisé la technique des différences finies [6, 4]. Cette technique consiste à numériser les équations (1) et (4) (équations (1) et (10) pour la végétation). Elle permet la modélisation des échanges de chaleur dans les terrains composés de plusieurs couches de matériaux, ainsi que le traitement des objets comportant des sources de chaleur internes (bâtiments).

### 2.4 Synthèse des radiométries

La température de surface de chaque région est calculée à partir des paramètres thermiques, des paramètres atmosphériques et des paramètres d'environnement. L'étape suivante consiste à calculer la luminance  $L$  en chaque point de l'image. Ce calcul est réalisé en intégrant, à l'aide de l'équation de Planck, le rayonnement de la surface d'émissivité  $\epsilon$  et de température  $T$  sur la bande spectrale du capteur [4].

### 2.5 Le contraste thermique

Dans les applications qui utilisent l'imagerie IR, on ne s'intéresse pas à la valeur absolue de la température, mais plutôt au contraste entre zones voisines. Il a pour origine:

- des matériaux ayant des propriétés thermiques différentes,
- des surfaces ayant des propriétés physiques différentes (orientation et propriétés optiques),

- des sources de chaleur.

Dans le cas de matériaux inertes, deux paramètres: l'inertie thermique et l'orientation de la surface, permettent de caractériser une région homogène. Ces paramètres rendent compte du contraste lorsque l'on a deux régions composées de matériaux différents ou bien ayant des orientations différentes. La figure 2a) montre l'évolution temporelle de la température pour plusieurs valeurs de l'inertie thermique. Les courbes s'intersectent en deux points (le matin et le soir), ce qui a pour conséquence une inversion du contraste. La seconde source de contraste pour un matériau inerte est la différence d'orientation des surfaces. Le changement d'orientation modifie l'énergie solaire absorbée par le matériau. Un exemple est présenté sur la figure 4 pour un mur de brique en été et à la latitude de Paris, pour cinq orientations différentes. La figure 2b) montre les températures pour les mêmes matériaux en hiver. Chaque courbe s'interprète assez facilement à partir de l'angle formé par la normale à la face et le rayon solaire. Les contrastes sont cependant assez difficiles à analyser car ils dépendent aussi de la latitude et de la saison.

Le contraste entre un sol nu et un sol couvert de végétaux peut être très élevé (température plus faible que celle du sol en été, plus élevée en hiver). La hauteur des végétaux ainsi que la météorologie ont une grande influence. Un exemple est présenté sur la figure 3 pour trois matériaux: un sol, de l'asphalte et de l'herbe en été et par bonnes conditions d'ensoleillement. On remarque que la température de l'herbe reste nettement plus faible que celle des deux autres matériaux au cours de la journée.

Dans la bande spectrale  $8 - 12\mu$ , le contraste thermique correspond assez bien au contraste visible dans l'image des luminances (contraste optique). Par contre, dans la bande  $3 - 5\mu$ , le contraste optique peut être assez différent du contraste thermique du fait des composantes réfléchives du rayonnement.

## 3 ANALYSE D'IMAGES

### 3.1 Segmentation et étiquetage

La première étape d'analyse consiste à segmenter une image de référence représentative de la scène. Une description de l'algorithme utilisé est donnée dans [4]. Chaque région ainsi obtenue est supposée constituée d'une couche homogène de

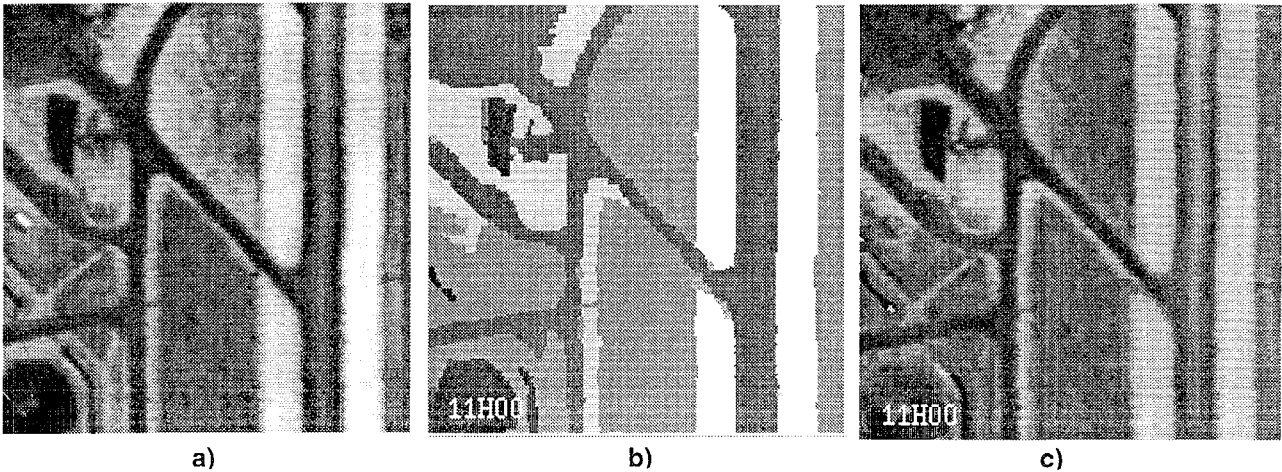


Figure 5: Image originale a); synthèse des radiométries b); synthèse de l'image texturée c).

matériaux. Les propriétés physiques et l'orientation de la surface sont supposées connues. Dans le cas où une simulation 3D est réalisée, plusieurs vues de références peuvent être utilisées.

### 3.2 Modélisation du signal de texture

Dans une image infrarouge de bonne qualité, la texture résulte des petites variations des propriétés thermiques ou optiques sur la région considérée. Les paramètres thermiques peuvent changer lorsque l'on a un mélange de matériaux légèrement différents. Parmi les propriétés optiques, l'albedo peut varier de manière importante suivant l'état de la surface, et donc modifier l'énergie absorbée. Les changements d'orientation dus au micro-relief induisent aussi des variations de la température de surface, de même que l'humidité plus ou moins importante du sol.

Le signal de texture extrait de l'image originale  $I(t_0)$  est donné par:

$$TI(t_0) = I(t_0) - MI(t_0) \quad (12)$$

où  $MI(t_0)$  est l'image des moyennes calculées sur chaque région (éventuellement lissée à l'aide d'un filtre gaussien). On en déduit un signal de texture normé:

$$TI'(t_0) = TI(t_0)/MI(t_0) \quad (13)$$

Le problème est de déterminer un signal de texture au temps  $t$ ,  $t \neq t_0$ , en utilisant la texture au temps  $t_0$  et les luminances synthétisées au temps  $t$ . Deux hypothèses ont été formulées afin de relier les évolutions du signal de texture aux changements de contraste dans la scène [3].

#### 3.2.1 Dépendance locale

Le signal de texture dépend linéairement de l'amplitude de la luminance sur la région. L'image texturée au temps  $t$  est donnée par:

$$I'(t) = L(t) + L(t).TI'(t_0) \quad (14)$$

Cette équation se met sous la forme:

$$I'(t) = L(t).[1 + TI'(t_0)] \quad (15)$$

où  $1$  est l'image de niveau constant égal à 1.

#### 3.2.2 Dépendance globale

On suppose ici que le signal de texture dépend du contraste global par l'intermédiaire du paramètre  $\alpha(t)$ . On a:

$$I'(t) = L(t).[1 + \alpha(t).TI'(t_0)] \quad (16)$$

Le paramètre  $\alpha(t)$  peut être calculé à partir du contraste dans l'image des luminances  $L(t)$ . Cette seconde hypothèse permet d'expliquer les inversions de contraste sur la texture.

La figure 5a) montre une vue aérienne d'un aéroport acquise à 11 heures du matin dans la bande  $8 - 12\mu$ . L'image des radiométries, obtenue après segmentation de l'image originale et attribution des régions, est présentée sur la figure 5b). L'addition du signal de texture à l'image originale permet d'augmenter le réalisme de la simulation (figure 5c)).

### Références

- [1] L. K. Ballick, R. K. Scoggins, and L. E. Link. Inclusion of a simple vegetation layer in terrain temperature models for thermal IR signature prediction. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 19(3):143-152, 1981.
- [2] C. Caillas. Orientation de surfaces et paramètres physiques des matériaux à partir d'une analyse multi-images infrarouges. In *Congrès RFIA*, pages 397-405, Paris, 1994.
- [3] J.P. Gambotto. Combining image analysis and thermal models for infrared scene simulations. In *IEEE Conf. on Image Processing*, Austin, Texas, Nov. 1994.
- [4] J.P. Gambotto and V. Leroy. IR scene generation under various conditions from segmented real scenes. In *SPIE Conf. no. 1967, on Aerospace Sensing*, pages 27-38, Orlando, Florida, April 1993.
- [5] D. M. Gates. *Biological Ecology*. Springer Verlag, New-York, 1980.
- [6] A. B. Khale. A simple thermal model of the earth's surface for geologic mapping by remote sensing. *Journal of Geophysical Research*, 82(11):1673-1680, 1977.
- [7] N. Nandhakumar and J.K. Aggarwal. Integrated modeling of thermal and visual image for scene interpretation. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10(4):469-480, 1988.
- [8] O. Taconet, R. Bernard, and D. Vidal-Madjar. Evapotranspiration over an agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25:284-307, 1986.