

Simulation d'images dans l'infrarouge thermique par approche synthétique : spécifications et architecture fonctionnelle.

T. Poglio^{1,2}, T. Ranchin², E. Savaria¹, L. Wald²

- 1- Alcatel Space, Département « Architecture des Systèmes d'Observation »
- 2- Ecole des Mines de Paris, Groupe Télédétection & Modélisation, Sophia-Antipolis

RESUME : on présente les spécifications et l'architecture fonctionnelle d'un simulateur de scènes dans l'infrarouge thermique pour des longueurs d'onde variant de 3 à 14 μm . Ce simulateur doit être capable de générer des scènes avec une très haute résolution spatiale et de gérer l'ensemble des interactions entre les objets composant le paysage. Les phénomènes physiques sont brièvement rappelés ; une méthodologie originale de simulation basée sur la gestion d'entités homogènes spatialement et temporellement vis à vis des processus physiques est proposée. Elle permet de traduire efficacement l'histoire récente de la scène, toujours nécessaire à la simulation d'une image infrarouge.

INTRODUCTION

Les besoins pour l'imagerie à très haute résolution spatiale dans l'infrarouge thermique concernent des domaines divers, tels la météorologie, la gestion de l'environnement ou le renseignement militaire. Cependant, ces images à une résolution spatiale de l'ordre de quelques mètres ne sont pas encore disponibles et de nouveaux systèmes d'observation sont à l'étude. Une étape essentielle est l'évaluation des performances opérationnelles de ces futurs systèmes ainsi que la formation des utilisateurs à ce type d'images. Dans cette perspective, la simulation est un outil irremplaçable car elle permet la maîtrise de toutes les caractéristiques du système d'observation. La simulation délivre une image telle qu'elle aurait été observée par le système. Un point essentiel dans la simulation est la connaissance précise des paramètres d'entrée, et en particulier de la scène que le système doit observer. Cette connaissance est rendue possible par l'utilisation d'un simulateur de scènes.

La simulation de conditions météorologiques variables, de lieux, d'heure d'acquisition et de paysages différents d'une part, ainsi que la possibilité de simuler une scène pour tout intervalle spectral compris entre 3 et 14 μm d'autre part, doivent être envisagées. Afin de remplir au mieux ces spécifications, une approche par synthèse de paysages a été sélectionnée. En infrarouge thermique, le flux provenant d'un objet est pour partie émis par cet objet et pour partie dû à la réflexion de l'ensemble des flux spectraux incidents. Pour chaque objet du paysage, le simulateur de paysages prédit les échanges de chaleur entre les objets, l'évolution

temporelle du bilan des flux, l'émission propre de l'objet ainsi que les réflexions spectrales des flux incidents.

Jaloustre-Audouin *et al.* (1997) et Jaloustre-Audouin (1998) ont développé un simulateur pour tout type de paysage représenté à deux dimensions. Celui-ci modélise de façon très pertinente le comportement des objets considérés séparément. Des simulateurs de scènes avec des représentations 3-D en entrée existent, mais uniquement pour des applications spécifiques, tel le comportement thermique des véhicules (Johnson *et al.*, 1998) ou la modélisation du bilan radiatif dans les paysages naturels (Guillevic, 1999).

Ce papier rappelle dans la première partie les fondements de la physique dans l'infrarouge thermique ; la deuxième partie est consacrée à la représentation du paysage en éléments et à sa description globale. La troisième partie présente une architecture fonctionnelle capable de traduire les spécifications d'un simulateur de scène à très haute résolution spatiale dans l'infrarouge thermique. Les avantages de cette représentation associée à cette architecture ainsi que les perspectives d'évolution sont exposés en conclusion.

LES PROCESSUS PHYSIQUES

Dans l'infrarouge, le flux provenant d'un objet dans un intervalle spectral donné est à la fois dû à la température de surface de cet objet (émission propre) et à la réflexion des flux spectraux incidents. En fonction de la bande spectrale et du matériau de surface qui compose l'objet, l'un des processus prévaut sur l'autre. En l'absence de connaissance α

priori, température de surface et réflexion doivent être calculées avec la même précision.

L'émission propre

Le flux émis par un objet est une fonction de l'émissivité de celui-ci (caractéristique intrinsèque de l'objet) ainsi que de sa température de surface. Cette dernière peut être prédite en résolvant l'équation de diffusion de la chaleur dans le cas particulier de son application aux paysages. Il s'agit d'une équation différentielle qui peut, par exemple, être résolue en utilisant la méthode des différences finies. La connaissance :

- de la température de l'objet sur toute sa profondeur à l'instant précédent,
- des conditions limites en profondeur et en surface, est alors requise.

Le premier effet correspond à un effet d'inertie. La condition limite en profondeur est généralement donnée par la température de couche profonde, connue (dans le cas de l'intérieur d'un bâtiment par exemple), ou laissée libre (dans le cas de surfaces naturelles). La condition limite à la surface correspond au bilan des flux incidents. Ce bilan de flux traduit des effets instantanés ; il est responsable des variations de température. Sa connaissance précise est nécessaire pour déterminer la température de surface. Or, ceci n'est possible que si l'environnement de l'objet est connu (Poglio *et al.*, 2001) tout comme son état hydrique.

Les réflexions

Dans l'infrarouge thermique, l'ensemble des objets qui composent le paysage, ainsi que le soleil et l'atmosphère doivent être considérés comme des sources potentielles. De fait, le calcul du flux spectral reçu d'un objet requiert la connaissance de la distribution de tous les objets environnant et de leurs interactions. Une méthode de type radiosité (Watt, 2000 ; Sillon and Puech, 1994) pourrait être utilisée pour résoudre un tel problème ; cependant, des considérations physiques et énergétiques montrent que l'environnement d'un objet se réduit à ses quelques plus proches voisins. Parmi ces considérations, citons la diminution de l'influence d'un objet sur un autre avec l'augmentation de la distance, et la faible portée des réflexions multiples, due aux faibles valeurs de réflectances généralement rencontrées. Dans la plupart des cas, ces valeurs de réflectances sont comprises entre 0,05 et 0,3 (ASTER, 2000).

Si le calcul du flux spectral réfléchi par un objet à l'instant t ne nécessite que la connaissance du bilan des flux spectraux à cet instant, il n'en est pas de

même pour la température de surface. Compte tenu des effets d'inertie, un calcul itératif doit être mené.

REPRESENTATION – MODELISATION DU PAYSAGE

Définition de l'élément

L'élément est l'entité sur laquelle va être effectué l'ensemble des calculs. Il est défini comme la plus grande entité homogène :

- spatialement (même orientation en tout point),
- en profondeur (*i.e.* la répartition des matériaux qui le compose est la même en tout point de l'élément),
- temporellement vis à vis du flux reçu de la part du soleil (suivi de l'ombre).

Cette définition s'appuie sur des considérations classiques (même orientation, mêmes matériaux...) et de manière plus originale sur des considérations temporelles vis à vis d'un processus physique.

Par rapport aux simulateurs 2-D, ses deux processus physiques additionnels ayant un impact important sur la simulation de scènes en infrarouge thermique sont l'éclairement solaire (régions à l'ombre *versus* régions ensoleillées) et les différences de vitesse de vent dues aux perturbations des objets 3-D composant le paysage (Poglio *et al.*, 2001). Cependant, bien que les perturbations d'écoulement de vent aient un impact important sur la simulation, elles ne sont pas prises en compte dans la définition de l'élément. Cela est actuellement justifié par la difficulté de modélisation de l'écoulement du vent dans un paysage complexe.

L'échantillonnage temporel imposé pour la résolution de l'équation de la chaleur, de l'ordre de la dizaine de minutes (Jaloustre-Audouin, 1998) est tel que le déplacement d'une ombre sur le sol entre deux itérations successives peut être petit vis à vis de l'échantillonnage spatial souhaité. Des considérations physiques et énergétiques tenant compte de ces phénomènes aident à fixer une dimension limite inférieure pour chaque élément, et aident également à en limiter le nombre. Finalement, on décidera ou non de créer un élément si :

$$f(h, \Delta t, a_i, \hat{n}_i, \vec{R}_{sol}, S_i) \geq v_{seuil} \quad (1)$$

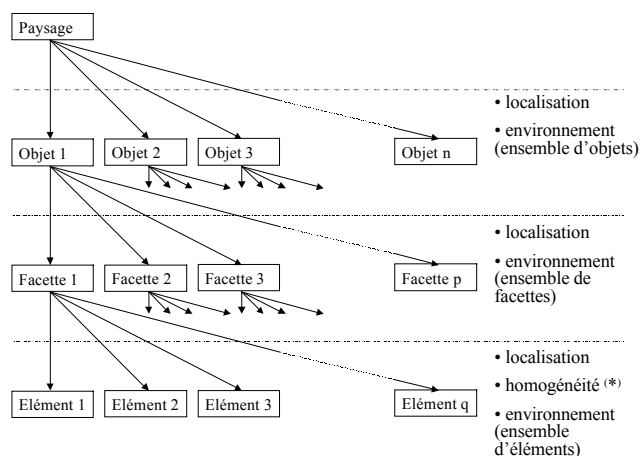
où f est une fonction empirique, h et Δt sont respectivement l'heure de la simulation et le laps de temps séparant l'itération courante de l'instant de la simulation. Si la simulation s'effectue de nuit, l'impact des ombres dans la journée qui aura précédé sera faible ; plus Δt est grand, moins l'influence de l'ombre sur la simulation sera ressentie. a_i , \hat{n}_i et \vec{R}_{sol} sont respectivement l'albédo, la normale et la valeur du rayonnement solaire (direct et diffus) reçu.

Ces paramètres permettent de déterminer la différence de flux reçu entre une entité à l'ombre et une entité au soleil. S_i est la taille de l'entité considérée ; si celle-ci est déjà proche de la taille minimale critique (en regard de la résolution souhaitée dans l'image finale) l'entité sera considérée comme indivisible. v_{seuil} est une quantité déterminée à partir de critères physique et énergétique ; elle dépend également de la précision requise en sortie du simulateur.

Un élément ainsi défini pourra toujours être subdivisé en éléments de taille inférieure. Cela peut s'avérer nécessaire, notamment si la précision souhaitée lors de la simulation de certains phénomènes physiques (réflexions multiples, masquage du ciel, etc...) est importante.

Modélisation du paysage

Le paysage composé d'objets (structures 3-D) peut alors se décomposer en éléments comme le montre la Figure 1.



(*) : homogénéité ; homogénéité spatiale, mêmes matériaux constituants, homogénéité temporelle vis à vis de l'éclairement solaire.

Figure 1 : description du paysage sous forme d'objets, de facettes, et d'éléments.

Chaque objet est spatialement localisé et orienté et possède son propre environnement composé d'objets. Chaque objet se décline en une somme de facettes (structure 2-D). Chacune d'elle est orientée, spatialement homogène et constituée du même matériau. Ces facettes possèdent un environnement qui leur est propre, également composé de facettes, elles même appartenant aux différents objets qui composent l'environnement initial de l'objet dont sont issues les facettes considérées. Les propriétés d'environnement d'une facette sont ainsi héritées des propriétés d'environnement des objets qu'elles composent. Cela nous amène à une définition de type objet du paysage.

La recherche de l'évolution temporelle des ombres sur les facettes ainsi créées conduit à scinder ces

facettes en éléments de manière à ne disposer que d'entités soit totalement à l'ombre, soit totalement au soleil, mais homogènes vis à vis de l'éclairement solaire. Chaque élément ainsi créé possède un paramètre supplémentaire par rapport à la facette dont il est issu : le vecteur d'éclairement, échantillonné temporellement.

Le paysage est ainsi parfaitement modélisé ; une méthode doit permettre de traduire l'ensemble des interactions entre les éléments pour arriver à générer une scène représentative du paysage.

METHODOLOGIE – ARCHITECTURE FONCTIONNELLE

La synthèse paramétrique

A partir de la connaissance du bilan des flux sur chaque élément, il est possible de calculer de façon itérative la température de surface et par suite les flux émis et réfléchi (Figure 2).

Les entrées nécessaires à la simulation sont (Jaloustre-Audouin *et al.*, 1997) :

- une représentation géométrique du paysage, basée sur une description en objets. Chacun des objets est décomposé en facettes, à chacune desquelles il est possible d'associer un matériau la constituant.
- l'ensemble des conditions de la simulation : jour, lieu, heure, bilan des précipitations pendant les 48 heures qui ont précédé la simulation...
- une base de données des caractéristiques thermo-optiques des matériaux présents dans le paysage,
- le gabarit spectral du capteur ; sa réponse spectrale et sa tâche image (ou sa fonction de transfert) sont nécessaires pour la simulation de l'image finale.

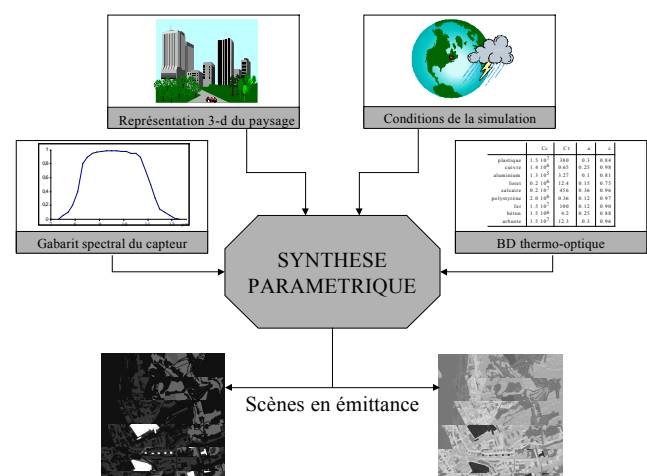


Figure 2 : illustration de la synthèse paramétrique de scènes dans l'infrarouge thermique.

Architecture fonctionnelle

Compte tenu des différents processus physiques qui interviennent dans l'infrarouge, et compte tenu du choix de définition adoptée pour l'élément, il est possible de décomposer le simulateur d'images en 4 simulateurs primaires fonctionnant en cascade (Figure 3). Le premier (S0) s'intéresse à la création des éléments en tenant compte des considérations physiques extérieures, imposé par les conditions de la simulation. Le paysage étant composé d'objets et de facettes (renseignements fournis par l'utilisateur), il évalue l'impact et la portée des ombres. La scène est alors découpée en éléments.

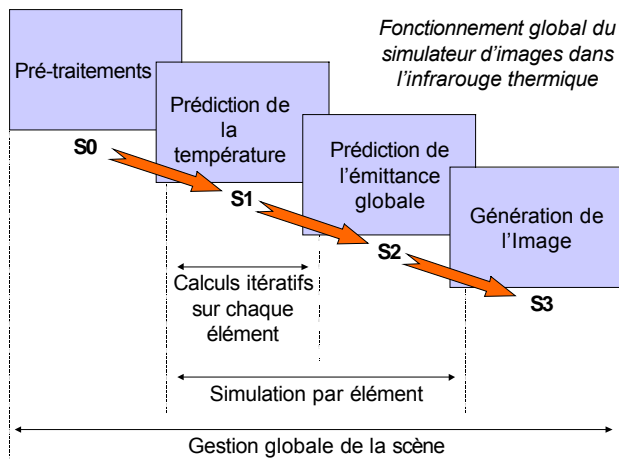


Figure 3 : architecture fonctionnelle du simulateur de scènes. Illustration du fonctionnement en cascade.

Il évalue ensuite le restant de paramètres extérieurs à chacun des éléments : vitesse du vent, environnements (radiatif et conductif)... Le second simulateur (S1) résout de façon itérative les équations de diffusion de la chaleur et de bilan hydrique élément par élément et donne ainsi accès à la température de surface de chaque élément à l'instant de la simulation. Le troisième (S2) calcule les flux émis et réfléchi par chaque élément dans la direction de visée du capteur. Enfin, le dernier simulateur (S3) génère une image représentative de la scène en fonction de l'angle de visée et de la fonction de transfert du capteur.

CONCLUSION

Ce choix de définition des éléments permet de ne traiter que des quantités homogènes tout au long de la synthèse. Cela rend le calcul du bilan des flux nettement plus simple, en ne considérant des zones que totalement à l'ombre ou totalement au soleil. Cependant, l'inconvénient d'une telle représentation apparaît si on désire plusieurs simulations d'un même paysage à des dates différentes. Les représentations en terme d'objets ou de facettes restent identiques

quel que soit le jour considéré. La représentation en éléments dépendant directement de la position du soleil, elle diffère chaque jour de l'année et doit être recalculée.

L'architecture fonctionnelle décrite précédemment, associée à la représentation de la scène en éléments est cependant la seule qui puisse traduire de façon satisfaisante les différences réelles de flux provenant d'une même facette. L'infrarouge thermique est le domaine spectral où l'histoire de la scène dans les instants qui précèdent l'acquisition (quelques heures) a le plus d'influence sur l'ensemble du signal. La simulation d'images dans ce domaine spectral se doit de reproduire le plus fidèlement possible cet état de fait. Cette architecture fonctionnelle le permet, et va servir de base au développement d'un simulateur de scènes à très haute résolution spatiale.

BIBLIOGRAPHIE

- ASTER, 2000. ASTER spectral library Ver 1.2, CD-ROM, Jet Propulsion Laboratory, NASA, October 2000, <http://spectib.jpl.nasa.gov/archive/jhu.html>.
- Guillevic P., 1999. Modélisation des bilans radiatif et énergétique des couverts végétaux. Thèse de Doctorat, Université P. Sabatier, Toulouse, France, 181 p.
- Jaloustre-Audouin K., 1998. SPIrou : Synthèse de Paysage en InfraRouge par modélisation physique des échanges à la surface. Thèse de Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, Nice, France, 169 p.
- Jaloustre-Audoin K., Savaria E., Wald L., 1997. Simulated images of outdoor scenes in infrared spectral band. In proceedings of AeroSense'97, SPIE, Orlando, USA.
- Johnson K., Curran A., Less D., Levanen D., Marttila E., Gonda T., Jones J., 1998. MuSES: A new heat and signature management design tool for virtual prototyping. In proceedings of the 9th Annual Ground Target Modelling & Validation Conference, Houghton, MI.
- Poglio T., Savaria E., Wald L., 2001. Influence of the three-dimensional effects on the simulation of landscapes in thermal infrared, à paraître dans les proceedings EARSeL du 21st Symposium, Marne-la-Vallée, France.
- Sillion F.X., Puech C., 1994. *Radiosity & Global Illumination*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., ISBN 1-558-60277-1, San Francisco, CA, U.S.A., 251 p.
- Watt A., 2000. *3-D Computer Graphics*, Third Edition, Addison-Wesley Publishing Company Inc, ISBN 0-201-39855-9.