

Change of Spatial Scale Over Heterogeneous Surface in Thermal Infrared Remote Sensing

L. Coret¹, X. Briottet¹, Y.H. Kerr² and G. Chehbouni²

¹ONERA/DOTA, 2, avenue E. Belin, 31055, Toulouse, France

²CESBIO, (CNES/CNRS/UPS) , BP 2801, 18, avenue E. Belin, 31055, Toulouse, France

Abstract

In Thermal infrared remote sensing the radiometric phenomena are non-linear. This problem is particularly sensitive when the scale of observation varies and when the scenes become heterogeneous. The main model used in change of spatial scale [Becker88] consists in aggregation of observable physical variables by connecting various physical parameters obtained at different scales. Becker and Li [Becker95] apply this model to the radiometric budget equation and obtain a relation connecting local known surface temperatures with the equivalent temperature of the set. The work presented here consists in the study of this aggregative scheme, by the bias of realized experimental data to the FAUGA2000 campaign in June 2000 [Malaplate01]. Radiometric measurements were realized on an artificial heterogeneous scene composite of various types of materials, each having thermo-optical characteristics known. The comparisons show a good agreement between the used model of aggregation and the measurements. The difference in surface temperatures between the modeling and the experiment is lower at 1.5K and increases with heterogeneity.

Key Words : Infrared Remote Sensing, Change of Scale, Heterogeneity, Surface Temperature, Radiometry

1 Introduction

La télédétection infrarouge thermique permet de fournir une information spatialisée des propriétés de surface (émissivité et température de surface). Dans ce contexte, lorsque les surfaces observées sont hétérogènes, du fait de la non-linéarité des phénomènes physiques, les propriétés thermo-optiques équivalentes du paysage s'expriment de façon complexe [Becker95]. De plus, un modèle de transfert établi et validé à l'échelle d'une surface "homogène" ne peut, d'emblée, être utilisé à celle d'une surface plus grande sans risque d'erreurs importantes ([Duggin85], [Prevot93]). Différents travaux ont été entrepris pour comprendre le signal incident en entrée de capteur. Ils ont pour point de départ la description du paysage hétérogène en élément de surface homogène. Leur agrégation est basée sur l'analyse du changement d'échelle spatiale.

Deux types d'approche sont alors possibles dans le changement d'échelle [Brunet95]: l'approche "mosaïque" consistant à calculer les flux indépendants sur chaque élément de scène homogène puis de sommer ces flux avec la pondération adéquate au niveau du détecteur; l'approche "agrégative" dans laquelle le processus d'intégration est utilisé au niveau du sol pour définir des paramètres agrégés à l'échelle du paysage, ce dernier représentant alors une surface équivalente uniforme et composite sur laquelle les flux moyens sont directement calculés.

La première approche implique la connaissance de la distribution spatiale fine des propriétés optiques des différents éléments du paysage. Aussi, elle nécessite un grand nombre de paramètres à considérer, ce qui rend son utilisation lourde. La seconde approche semble donc plus intéressante car le changement d'échelle ne s'effectue non plus sur les résultats spatialisés mais directement sur des paramètres constitutifs de la surface intégrée, les lois appliquées à une échelle supérieure étant les mêmes qu'à l'échelle locale.

Ces deux approches, appliquées à l'équation du bilan radiatif [Becker95] sont ici décrites dans le paragraphe 2. Une étude expérimentale du principal modèle de changement d'échelle dans l'infrarouge est alors abordé par le biais d'une campagne de mesures effectuées sur le site expérimental PIRENNE au Fauga près de Toulouse, France, présentée au paragraphe 3. Différents modèles d'agrégation sont ensuite comparés au paragraphe 4 pour estimer l'écart existant entre les deux approches.

2 Modélisation du changement d'échelle dans l'infrarouge

Plusieurs modèles existent. Les plus courants sont basés sur des approches énergétiques [Blyth95], [Chehb95], [Kerr98], [Lhomme92]. Mais cette approche ne permet pas l'utilisation de données issues de la télédétection. En revanche, l'approche radiométrique [Becker88] de changement d'échelle dans l'infrarouge le permet et repose sur l'agrégation de propriétés physiques connues localement et à la conservation de celles-ci après un changement de résolution spatiale.

Le schéma d'agrégation est alors appliqué à l'équation du transfert radiatif à grande échelle. La luminance obtenue après agrégation est directement mesurable par un radiomètre à basse résolution spatiale. L'équation radiométrique dans le cas d'une surface homogène plane et lambertienne s'écrit, pour un senseur situé au niveau du sol, en négligeant la réflexion du rayonnement solaire direct:

$$L_\lambda = \varepsilon_\lambda L_\lambda^{CN} (T_{sr}) + (1 - \varepsilon_\lambda) L_\lambda^{atm\downarrow} \quad (1)$$

$L_\lambda^{CN} (T_{sr})$ est la luminance du corps noir à la température T_{sr} , température radiative de surface définie par [Norman95]:

$$T_{sr} = L_\lambda^{CN^{-1}} \left[\frac{L_\lambda}{\varepsilon_\lambda} \right] \quad (2)$$

$L_\lambda^{atm\downarrow}$ est la luminance spectrale de l'atmosphère, incidente à la surface; ε_λ est l'émissivité spectrale. Dans le cas de surface plane, le passage de l'échelle locale à l'échelle globale se fait en agrégeant les luminances locales $L_{\lambda k}$ à l'aide d'une moyenne pondérée par les éléments de surface:

$$\langle L \rangle_\lambda = \sum_k S_k L_{\lambda k} \quad (3)$$

l'indice k fait référence aux caractéristiques de l'élément de surface k , $S_k = d\omega_k / \Omega$ est la surface normée du sous élément k , $d\omega_k$ est l'angle solide sous lequel est vu S_k depuis le radiomètre, Ω est l'angle solide sous lequel est vu l'ensemble. S_k satisfait l'égalité $\sum S_k = 1$. En imposant que les modèles de mesure de luminance sont identiques quelle que soit l'échelle spatiale, on obtient l'expression suivante:

$$\langle L \rangle_\lambda = \langle \varepsilon \rangle_\lambda L_\lambda^{CN} (\langle T_{sr} \rangle_\lambda) + (1 - \langle \varepsilon \rangle_\lambda) L_\lambda^{atm\downarrow} \quad (4)$$

En identifiant terme à terme les équations (3) et (4), on obtient une expression analytique de la température de surface et de l'émissivité à l'échelle globale:

$$\langle \varepsilon \rangle_\lambda = \sum_k S_k \varepsilon_{\lambda k} \quad (5)$$

$$\langle T_{sr} \rangle_\lambda = L_\lambda^{CN-1} \left[\frac{\sum_k S_k \varepsilon_k L_\lambda^{CN} (T_{sk})}{\langle \varepsilon \rangle_\lambda} \right] \quad (6)$$

Dans le cadre de l'étude présentée ici, les expressions (3) et (4) seront comparées grâce aux mesures réalisées au cours de la campagne FAUGA2000. En outre, les grandeurs précédentes seront intégrées sur le domaine spectral des appareils utilisés au cours de la campagne. Dans le domaine infrarouge, les effets dus à l'intégration spectrale sont faibles [Njoku96]. Par la suite, les grandeurs seront donc spectralement intégrées et normalisée par la réponse du filtre des appareils de mesures utilisés. L'émissivité ainsi définie est:

$$\varepsilon = \frac{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} f(\lambda) \varepsilon_\lambda d\lambda}{\int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} f(\lambda) d\lambda} \quad (7)$$

avec $f(\lambda)$ fonction filtre. Les grandeurs nécessaires à la comparaison sont les luminances locales L_k , les émissivités et températures de surface locales ε_k et T_{sk} et la luminance atmosphérique $L^{atm\downarrow}$. Dans l'expression (3), les luminances locales L_k sont calculées à l'aide d'une caméra préalablement étalonnée, de réponse spectrale $h_{cam}(\lambda)$. Les images obtenues donnent accès aux luminances locales et, par intégration spatiale suivant la relation (3), à la luminance globale notée $\langle L \rangle_{cam}$. L'expression (4) est calculée à l'aide de mesures laboratoires des émissivités par un spectrophotomètre et de mesure sol de luminances locales et de la luminance atmosphérique $L^{atm\downarrow}$ à l'aide de radiomètre. La luminance atmosphérique est mesurée à l'aide d'une acquisition effectuée sur une plaque d'aluminium dont la température de surface est obtenue par une sonde de température [Malap00]. Ainsi, la connaissance des émissivités et de la luminance permet la détermination de la température de surface (que l'on notera T_{sk}) de chaque matériau. Pour obtenir ces températures de surface locale, la loi du corps noir est approchée par une loi en puissance [Slater]:

$$L^{CN} (T_{sk}) = \alpha T_{sk}^\beta \quad (8)$$

Les coefficients α et β de l'approximation sont déterminés sur les bandes des radiomètres, en considérant leur fonction filtre. La luminance agrégée sur une surface hétérogène composée de plusieurs types de matériaux, notée $\langle L \rangle_{agr}$, est alors obtenue par l'utilisation des expressions analytiques des températures de surface et d'émissivités équivalente (5) et (6).

3 Données expérimentales

Les données expérimentales ont été acquises lors de la campagne FAUGA2000 [Malaplate01], réalisée sur le site Pirrene au Fauga, France. La campagne a été menée conjointement par le laboratoire LSIIT/GRTR de Strasbourg et par le département d'optique théorique et appliqué de l'ONERA de Toulouse au cours du mois de juin 2000. Dans le cadre de cette campagne, des mesures radiométriques infrarouges ont été réalisées sur une scène comportant plusieurs types de matériaux (figure 1). La scène a une taille de $1.5 \times 1.5 \text{ m}^2$. Elle est imagée par une caméra infrarouge, placée sur un échafaudage, à une hauteur de 5 m au dessus de la scène. Des radiomètres placés au sol, effectuent les mesures de température de surface de chaque élément de la scène. Des mesures d'émissivités spectrales des différents matériaux ont été obtenues en laboratoire à l'aide d'un spectrophotomètre à transformée de Fourier Nicolet800 équipé d'une sphère intégrante. Les émissivités locales ε_k de chaque matériau sont déduites de ces mesures par intégration sur les bandes spectrales des radiomètres et par normalisation par la réponse de l'appareil (7). Les températures de surface locales T_{sk} sont obtenues à l'aide de deux radiomètres; le PRT5 fonctionnant sur la gamme $10.5\text{-}12.5 \mu\text{m}$ et pour trois gammes de températures ($313\text{-}348\text{K}$, $283\text{-}318\text{K}$ et $253\text{-}288\text{K}$); le GRTRad fonctionnant sur une seule gamme de température et pour deux gammes de longueur d'onde ($9.9\text{-}11.4 \mu\text{m}$ et $11.3\text{-}12.4 \mu\text{m}$). Les mesures de luminance locales L_k sont réalisées à l'aide d'une caméra Inframetrics 760 située à une hauteur de 5 m au dessus de la scène placée sur un échafaudage, pour un angle de visée de 22° . Malgré tout, les images obtenues sont considérées au nadir et les effets angulaires seront alors négligés. Cette caméra couvre le domaine spectral $8\text{-}12 \mu\text{m}$. C'est une caméra à balayage de 256 pixels par ligne. Le champ de vue vertical est de 15° et celui horizontal est de 20° . Dans ces conditions, la résolution spatiale obtenue dans le cadre de la campagne est de 9.7 mm .

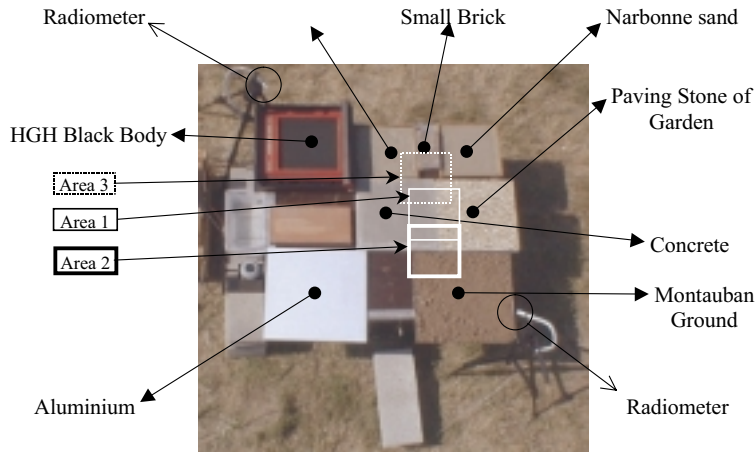


FIG. 1 – Vue de dessus de la scène artificielle pour le 27 juin

De plus, il est à noter que les divers instruments utilisés (caméra et radiomètre) ont été interétalonnés à partir d'un corps noir de référence HGH, placé dans la scène. Cet interétalonnage a pour principal intérêt de recalibrer les différents radiomètres et caméras entre eux. Pour chaque instrument, un coefficient de pondération est appliqué:

$$p = \frac{L_{instrument}^{CN}(T_{CN})}{L_{instrument}^{mesure}} \quad (9)$$

Pour étudier l'effet de l'hétérogénéité sur le schéma d'agrégation, différentes surfaces hétérogènes sont choisies sur les images caméra par extraction de zones d'intérêt (figure 1). Ainsi, trois zones d'intérêt d'hétérogénéité différente ont été étudiées: la zone 1 comportant 50% de béton et 50% de dalle de jardin; la zone 2 comportant 12.5% de béton, 37.5% de dalle de jardin et 50% de terre de Montauban et la zone 3 comportant 25% de béton, 25% de dalle, 16.6% de sable des rivières, 16.6% de brique et 16.6% de sable de Narbonne. Chaque zone a pour taille $62.8 \text{ cm} \times 62.8 \text{ cm}$. La terre de Montauban et le sable de rivière sont les matériaux de la scène les plus hétérogènes (voir tableau 1).

4 Résultats

Les mesures d'émissivités spectrales sur la bande TIR sont données sur la figure 2. Les données sol mesurées pour les 6 types de matériaux présents dans la scène sont résumées dans le tableau 1 pour la journée du 27 juin à 14h55.

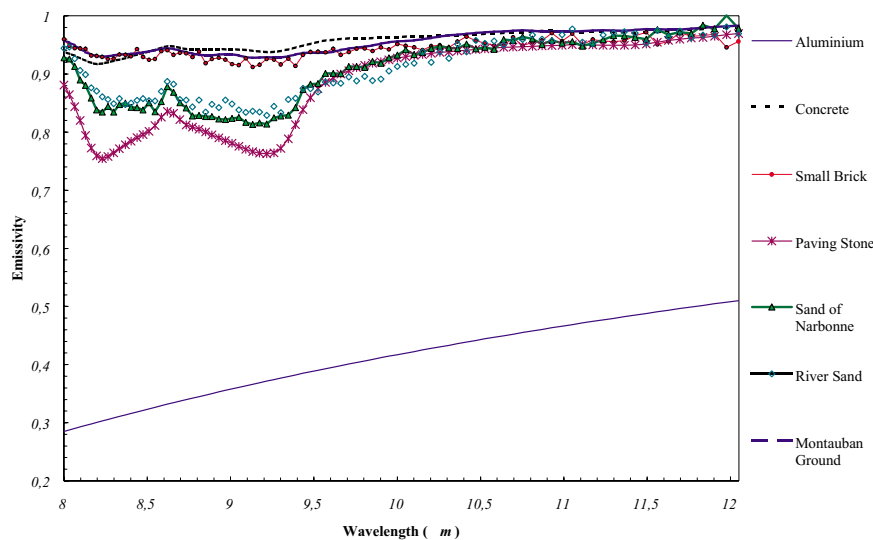


FIG. 2 – *Emissivités spectrales des matériaux de la scène, sur la bande TIR.*

	ε_k	T_{s_k} (K)	$\Delta T_{s_k}/T_{s_k}$ (%)
Dalle de jardin	0.943	328.3	0.28
Béton	0.969	332.7	0.16
Terre de Montauban	0.970	335.1	0.49
Sable de rivière	0.949	336.3	0.51
Sable de Narbonne	0.950	329.5	0.23
Brique	0.955	335.0	0.23

TAB. 1 – *Données locales mesurées à 14h55 le 27 juin 2000*

4.1 Comparaison des données sol et caméra

La comparaison des données sol et caméra permet d'étudier l'influence de l'hétérogénéité sur le schéma d'agrégation. La figure 3 donne la variation de la différence, au cours de la journée, entre les luminances agrégées $\langle L \rangle_{agr}$ et les luminances caméra $\langle L \rangle_{cam}$. L'écart est défini comme:

$$Gap = \frac{\langle L \rangle_{cam} - \langle L \rangle_{agr}}{\langle L \rangle_{cam}} \quad (10)$$

Cette différence est de l'ordre de 2%. En terme de température de surface, l'erreur commise sur une journée est en moyenne de 0.5% soit environ 1.5K pour une température de 300K (environ 0.15°C sur une température de 30°C). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans la littérature [Njoku96]. De plus, cette différence varie au cours de la journée et est plus importante en milieu de journée. Cette variation peut s'expliquer par l'accroissement du gradient de température qui est plus marqué en milieu de journée, ce qui entraîne des différences de températures entre les matériaux, beaucoup plus marquées, d'où une hétérogénéité plus forte. C'est aussi cela qui explique la variation globale au cours de la journée. Le modèle de changement d'échelle est donc sensible à l'hétérogénéité de surface.

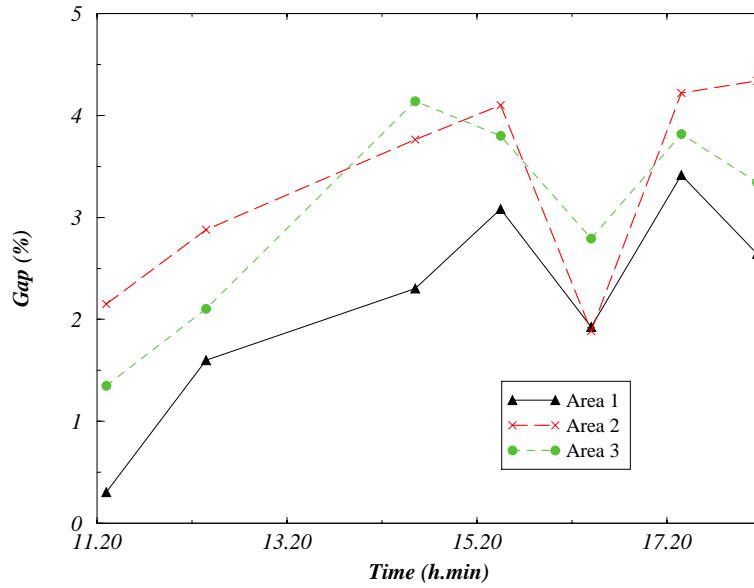


FIG. 3 – Variation de la différence entre données sol et données caméra

La différence obtenue reste malgré tout faible et n'est pas détectable par une mesure par télédétection. A de plus grandes échelles, l'hétérogénéité devient plus importante et de tels écarts peuvent ne pas être pris en compte. Les matériaux utilisés ici ne possèdent pas une grande hétérogénéité aussi bien au niveau de l'émissivité qu'au niveau de la température. Pour mieux valider le modèle d'agrégation, il apparaît qu'il faut utiliser une scène possédant une hétérogénéité plus marquée. Une étude supplémentaire doit être menée sur des surfaces plus hétérogènes pour caractériser des écarts suffisants pour prendre en compte efficacement le changement d'échelle à des résolutions plus importantes.

4.2 Influence de l'hétérogénéité sur le schéma d'agrégation

Ils existent d'autres schémas d'agrégation utilisés en télédétection. L'expression (6) permet d'obtenir une température solution de l'équation radiative. Fréquemment, en télédétection, on ne possède pas les grandeurs suffisantes à sa détermination. Pour s'affranchir de cette difficulté, les formulations suivantes sont utilisées:

$$\langle T_s \rangle_m = \sum S_k T_{sk} \quad (11)$$

$$\langle T_s \rangle_q = \sqrt[4]{\sum S_k T_{sk}^4} \quad (12)$$

Il est possible d'évaluer ces expressions à partir de mesures effectuées lors de cette campagne. La figure 4 donne la variation de la différence, au cours de la journée du 27 juin, entre les luminances agrégées à partir des expressions (11) et (12) et la luminance $\langle L \rangle_{agr}$:

$$Gap = \frac{\langle L \rangle_{agr} - \langle L \rangle_{agr} \left(\langle T_s \rangle_f \right)}{\langle L \rangle_{agr}} \text{ avec } f = m \text{ ou } q \quad (13)$$

L'erreur commise par l'utilisation de (11) ou (12) reste faible, moins de 0.1% pour le cas de la zone 1 mais près de 1% dans le cas de la zone 2. L'hétérogénéité intervient d'une manière importante au niveau des valeurs des paramètres agrégés. Les résultats obtenus ici rejoignent des simulations effectuées sur des cas simples en fonction de la longueur d'onde, sur la bande TIR. Les écarts obtenus par simulation, dans un cas proche de la zone 1, sont de l'ordre de 0.6% en utilisant (11) et de 0.5% en utilisant (12). De tels écarts se retrouvent aussi dans la littérature [Becker95].

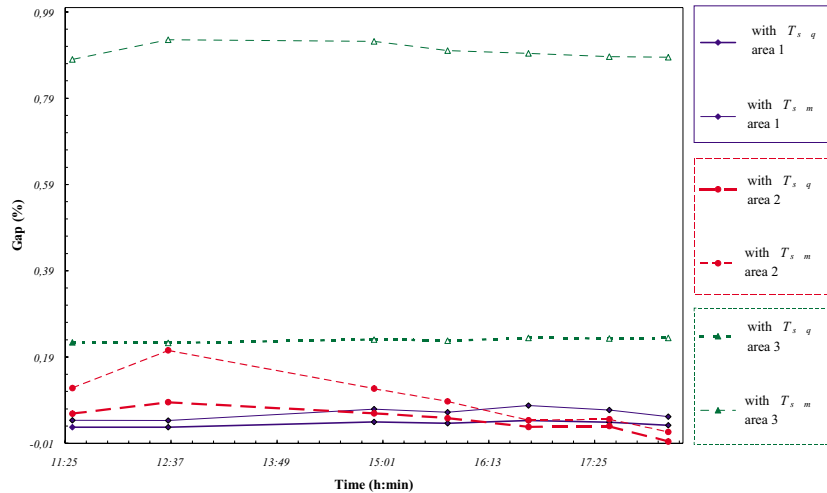


FIG. 4 – Variation de l'écart entre divers types de schéma d'agrégation

Même si ces écarts restent faibles (environ 0.1%), l'utilisation de schémas tels que (11) et (12) peut devenir source d'erreur pour des scènes très hétérogènes. L'expression (12) donne moins d'erreur que (11). Ceci est là aussi confirmé par la simulation. Dans l'infrarouge thermique, la loi du corps noir peut s'écrire par le biais de l'approximation (8) avec des valeur de β allant de 5 à 2. Dans ce cas, l'expression (12) est une bonne approximation de la loi du corps noir et (12) est très proche de (6) dans le cas d'émissivité proche de 1, ce qui peut expliquer la faible différence obtenue ici. Les résultats obtenus, à partir de mesures directes, confirment le fait que l'utilisation de schémas d'agrégations, tel que (11) et (12), entraîne des erreurs proportionnelles à l'hétérogénéité de surface. Toutefois, les mesures utilisées ici ne reflètent

pas les cas plus complexes que l'on rencontre dans la réalité. De plus, les hypothèses de base du modèle (surface plane et lambertienne) réduisent l'écart réel, en particulier au niveau des éventuels effets angulaires qui n'apparaissent pas dans (11) et (12) et qui entraînent des écarts supplémentaires ([Smith97], [Chehb00b]).

5 Conclusion

La première étude réalisée par comparaison des données caméra et des données sol a montré l'intérêt du schéma d'agrégation dans l'infrarouge. En effet, l'approche agrégative permet d'obtenir des expressions de paramètre thermo-optique à échelle globale (ici de l'ordre du mètre) permettant la détermination d'une luminance équivalente avec 2% d'erreur par rapport à une intégration directe des luminances locales, soit environ une erreur de 0.5% en température de surface. Cependant, les surfaces étudiées ici ne permettent pas d'obtenir une hétérogénéité suffisamment réaliste en terme de surface naturelle. Des simulations dans le cas de surfaces plus réalistes montrent que cet écart devient plus important (de l'ordre de 10K en température de surface dans le cas de surface végétale [Chehb96]) et dont l'impact sur la détermination de flux est encore mal connu.

Ces données ont permis de tester différents schémas d'agrégation. Dans ce cas, l'écart entre la valeur de luminance globale alors obtenue et la valeur théorique est faible bien que l'utilisation de tel schéma se révèle délicate dans le cas de surface très hétérogène. Là aussi, les surfaces considérées restent insuffisamment hétérogènes pour bien quantifier ce qui se passe à des échelles plus importantes. En particulier, les effets angulaires, ici négligés, peuvent être une source de biais important entre les schémas d'agrégation classique et la réelle valeur du paramètre agrégée ([Smith97], [Chehb00b]).

Un effort va être mené pour pouvoir caractériser en premier lieu une hétérogénéité plus importante ainsi que les effets angulaires sur les approches agrégatives en télédétection. De même, l'impact des erreurs commises par agrégation sur le bilan en terme de flux de surface, semble mal connu. Une campagne conjointe entre l'ONERA et le CESBIO est en projet sur le site PIRRENE pour répondre à ces deux questions.

Remerciements

Nous remercions Monsieur Marc Philippe Stoll et Madame Françoise Nerry du Groupe de Recherche en Télédétection et Radiométrie (LSIIT/GRTR) ainsi que Monsieur Alain Malaplate (ONERA/DOA) qui ont réalisé les mesures et fournis les données sol et caméra de la campagne FAUGA2000.

Références

- [Becker88] F. Becker and M. Raffy. Modèles et modélisations en télédétection. *Télédétection spatiale : aspects physiques et modélisation - Ecole d'été CNES*, 1988.
- [Becker95] F. Becker and Z-L. Li. Surface temperature and emissivity at various scales : definition, measurement and related problems. *Remote sensing Reviews*, 12:225–253, 1995.

- [Blyth95] E.M. Blyth and R.J. Harding. Application of aggregation models to surface heat flux from the sahelian tiger bush. *Agricultural and forest Meteorology*, 72:213–235, 1995.
- [Brunet95] Y. Brunet, E. Lannaud, and E. Pradel. Les problèmes d'échelle en modélisation. In *Actes de l'Ecole-Chercheurs INRA en Bioclimatologie*, Le Croisic, France, 3-7 April 1995. INRA.
- [Chehb00b] A. Chehbouni, Y. Nouvellon, Y.H. Kerr, M.S. Moran, C.J. Watts, L. Prévot, D.C. Goodrich, and S. Rambal. Directional effect on radiative surface temperature measurements over a semi-arid grassland site. *Remote Sens. Environ.*, 2000.
- [Chehb95] A. Chehbouni, E.G. Njoku, J-P. Lhomme, and Y.H. Kerr. Approaches for averaging surface parameters and fluxes over heterogeneous terrain. *Journal of climate*, 8:1386–1393, May 1995.
- [Chehb96] A. Chehbouni, D. Lo Seen, E.G. Njoku, and E.M. Montny. Examination of the difference between radiative and aerodynamic surface temperatures over sparsely vegetated surfaces. *Remote sensing environment*, 58:177–186, 1996.
- [Duggin85] M.J. Duggin. Factors limiting the discrimination and quantification of terrestrial features using remotely sensed radiance. *Int. J. remote sensing*, 6(1):3–27, 1985.
- [Kerr98] Y.H. Kerr, A. Chehbouni, L.H. Hipps, and al. Flux aggregation over heterogeneous surfaces in semi-arid region : Modelling and validation. *American Meteorological Society, Special Symposium on Hydrology*, pages 11–16, Jan 1998. Phoenix, Arizona.
- [Lhomme92] J-P. Lhomme. Energy balance of heterogeneous terrain : averaging the controlling parameters. *Agric. For. Meteor.*, 61:11–21, 1992.
- [Malaplate01] A. Malaplate, F. Nerry, M.P. Stoll, and R. Luhahe. Radiométrie des fonds terrestres dans les bandes 3-5 μm et 8-13 μm : mise en oeuvre, impact de l'hétérogénéité, possibilités. In *Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing Symposium*, Aussois, France, 8-12 January 2001.
- [Njoku96] E.G. Njoku, S.J. Hook, and A. Chehbouni. Effects of surface heterogeneity on thermal remote sensing of land parameters. In *Scaling up in hydrology using remote sensing*. Institute of Hydrology, John Wiley and Sons, J.B. Steward, E.T. Engman, R.A. Feddes and Y.H. Kerr, 1996.
- [Norman95] J.M. Norman and F. Becker. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces. *Remote sensing Reviews*, 12:159–173, 1995.
- [Prevot93] L. Prevot, Y. Brunet, K.T. Paw, and B. Seguin. Canopy modelling for estimating sensible heat flux from thermal infrared measurements. In *Proc. Workshop on Thermal Remote Sensing of the Energy and Water Balance over Vegetation in Conjunction with Other Sensors*, La Londe Les Maures, France, 20-23 September 1993. CEMAGREF Editions, Montpellier, France.
- [Slater] P.N. Slater. Remote sensing: Optics and optical systems. *Addison - Wesley publishing company*.
- [Smith97] J.A. Smith, N.S. Chauhan, T.J. Schmugge, and J.R. Ballard Jr. Remote sensing of land surface temperature : the directional effect. *IEEE Trans. On geoscience and remote sensing*, 35(4), July 1997.