

LES PRINCIPAUX APPORTS DU COLLOQUE INTERNATIONAL
"SIGNATURES SPECTRALES D'OBJETS EN TELEDETECTION"
DANS LE DOMAINE SPECTRAL DE L'INFRAROUGE THERMIQUE

MAIN CONTRIBUTIONS OF THE INTERNATIONAL COLLOQUIUM
"SPECTRAL SIGNATURES OF OBJECTS IN REMOTE SENSING"
IN THE THERMAL INFRARED SPECTRAL DOMAIN

par

François BECKER

Groupe de Télédétection
7, rue de l'Université
67000 STRASBOURG - France

RESUME

Au colloque "Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection" tenu en septembre 1981 à Avignon, huit papiers concernant l'infrarouge thermique ont été présentés. Les résultats qu'ils ont apportés et leurs conclusions sont analysés en trois grands chapitres : la signification de la luminance observée, les propriétés optiques dans l'infrarouge thermique et enfin l'impact thématique de ces bandes.

Après avoir analysé expérimentalement quelques unes des caractéristiques de la luminance infrarouge thermique d'une tache hétérogène et non plane (effets angulaires, effets du taux de couverture végétale, effets d'altitude etc...) on calcule cette luminance et on s'interroge sur le sens et l'existence d'une émissivité et d'une température effective pour la décrire. Puis on discute brièvement de la comparaison des mesures de cette luminance in situ et à partir de satellite.

On présente alors quelques résultats concernant les propriétés optiques de certains sables dans l'infrarouge thermique, notamment les distributions angulaires de l'émissivité directionnelle et de la réflectivité bidirectionnelle dans la bande 8-14 μm pour des milieux homogènes et hétérogènes.

Enfin, on aborde l'impact thématique de l'infrarouge thermique en s'appuyant sur l'analyse d'un ensemble de pixels (effet spatial) ou sur l'évolution dans le temps de la luminance de ces pixels (effet temporel). Cette analyse se situe à la fois au niveau du sol (relations entre luminance et caractéristiques d'un couvert sous ses aspects structuraux, thermiques et hydriques) et au niveau du satellite (évapotranspiration, analyse critique des mesures ...).

En conclusion, on rapporte les directions de recherche qui se sont dégagées et, malgré les problèmes non encore résolus, on souligne l'importance de ce domaine spectral pour comprendre le milieu naturel et sa dynamique et donc mieux en maîtriser le développement.

ABSTRACT

During the International Colloquium "Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing" held in 1981 at Avignon (France), eight papers concerning the thermal infrared bands have been presented. Their main results and conclusions are analysed in three main sections : meaning of the observed radiance, optical properties in the thermal infrared bands and finally applications of these bands to the structure analysis of the surface and to heat and mass transfers.

Having analysed experimentally some characteristics of the thermal infrared radiance of an heterogeneous and non flat pixel, such a radiance is calculated. The meaning and existence of an effective emissivity and temperature to describe this radiance are then discussed allowing a brief presentation of the problems concerning the comparison between in situ and remote measurements.

Some results concerning the optical properties of various sands in the thermal infrared bands are then presented, mainly the angular distributions of both the bidirectional reflectivity and the spectral emissivity in the band 8-14 μm for homogeneous and heterogeneous samples.

Finally, various applications of these thermal infrared bands are presented. They are based on an analysis of a large ensemble of pixels (spatial effects) and the time variation of the radiance of these pixels (temporal effect), both in the field (relationships between the radiance and the structural, thermal and moisture characteristics of a canopy) and from satellite data (evapotranspiration, critical analysis of satellite data etc...).

In a conclusion, the main directions of research which were suggested at Avignon are reported and, despite of the problems which are still to be solved, the importance of the thermal infrared bands to understand the natural medium and its dynamics and therefore to control its development is emphasized.

I - Introduction

Les bandes infrarouge thermique (4 à 14 μm) présentent un grand intérêt en télédétection parce qu'elles peuvent donner des informations spécifiques non seulement sur les objets eux-mêmes grâce à l'analyse spectrale de leurs propriétés optiques, mais encore sur le comportement énergétique et hydrique de ces milieux. Malgré cet intérêt, sur les 54 communications présentées à Avignon ¹⁾, seulement 8 concernaient l'infrarouge thermique. Ce faible nombre peut s'expliquer en partie par les raisons suivantes :

- 1) Il y a beaucoup moins de données enregistrées par les satellites d'observation de la terre (HCMM et Landsat C) dans l'infrarouge thermique que dans le visible et les autres satellites tels que Meteosat et les NOAA sont encore peu populaires dans la communauté scientifique des télédétecteurs.
- 2) La physique de la télédétection dans l'infrarouge thermique est elle-même plus complexe que dans le visible et, comme il sera vu plus loin, il n'est pas facile de séparer les effets optiques et thermiques dans la luminance.
- 3) En raison du niveau actuel de la technique, les taches ont des dimensions plus grandes dans l'infrarouge thermique que dans le visible pour des bandes de largeur spectrale aussi plus grandes (1 à 2 μm), ce qui rend l'analyse de leur luminance beaucoup plus complexe.

Des communications présentées à Avignon se dégagent trois grands thèmes qui vont être analysés dans les trois parties de cet exposé. Le sens de la luminance d'une tache très hétérogène et non plane sera examiné dans le paragraphe II, ce qui permettra de discuter les conditions de l'existence de paramètres effectifs pour décrire cette luminance et d'en donner quelques propriétés théoriques. Quelques propriétés expérimentales de l'émissivité spectrale directionnelle et de la réflectivité bidirectionnelle dans l'infrarouge thermique seront brièvement présentées dans le paragraphe III, tandis que le paragraphe IV sera consacré à un compte rendu des communications traitant des applications de l'infrarouge thermique notamment dans les domaines énergétique et hydrique. Enfin, les problèmes généraux et les directions de recherches évoqués à Avignon seront rapidement présentés dans la conclusion.

II - Sens de l'émittance d'une tache

La luminance est définie par la relation :

$$L_{\lambda}(T, \theta, \phi) =$$

où $L_{\lambda}(T)$ est la luminance. Compte tenu de la géométrie (de 0,5 à 10°) ni planes, ni sphériques, plus de sensibilité et la luminance sont-elles affectées ?

II-1- Propriétés d'une tache plane

Sur le plan de la luminance en s'ajoutant à la figure 1 avec

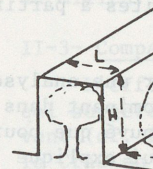


Figure 1 : Modélisation d'une tache plane de hauteur finie de hauteur H et de distance S .

diative définie par :

$$L_{\lambda}(T, \theta, \phi) = I_{\lambda}(T, \theta, \phi) / \cos \theta$$

Fig
rad
sur
son
(D'

II - Sens de la luminance d'une tache et existence des paramètres effectifs d'une tache

La luminance d'un élément de surface plane, homogène et en équilibre thermique est décrite par deux paramètres, la température de surface T et l'émissivité spectrale angulaire $\epsilon_\lambda(\theta, \phi)$, suivant la relation bien connue

$$L_\lambda(T, \theta, \phi) = \epsilon_\lambda(\theta, \phi) L^\circ_\lambda(T) \quad (1)$$

où $L^\circ_\lambda(T)$ est la luminance spectrale du corps noir à la température T. Compte tenu de la grande dimension des taches dans l'infrarouge thermique (de 0,5 à 10 km de diamètre), celles-ci ne sont pratiquement jamais homogènes, ni planes, ni en équilibre thermique. Dans ces conditions, la formule (1) n'a plus de sens immédiat (la température de surface par exemple n'est pas définie) et la luminance devient très complexe. Aussi de nombreuses communications se sont-elles attachées à étudier ses propriétés.

II-1- Propriétés de la luminance infrarouge d'une tache hétérogène et non plane

Sur le plan théorique F. Becker ²⁾ a donné une expression de cette luminance en s'appuyant sur un modèle simple de couvert végétal montré sur la figure 1 avec ses notations. Cette luminance dépend

- 1) des caractéristiques géométriques du couvert, de la répartition des températures et des propriétés optiques des divers éléments du couvert (qui dépendent de ses conditions hydriques)
- 2) des conditions d'observation, angles d'observation, orientation des rangs, altitude et angle instantané d'analyse du radiomètre.

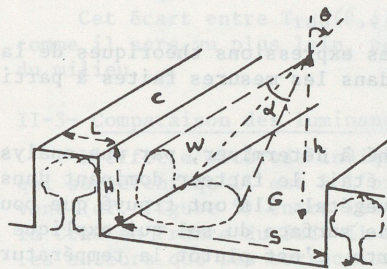


Figure 1 : Modèle simple d'un couvert formé de rangs parallèles infinis de hauteur H, d'épaisseur L distants de S.

Sur le plan expérimental, G. Guyot ⁵⁾ et R.D. Jackson ⁶⁾ ont mesuré les variations de cette luminance avec les propriétés du couvert (taux de couverture végétale, nature, humidité, orientation) et les conditions de la mesure (angle de prise de vue). Leurs résultats sont montrés figures 2 et 3. Les luminances sont mesurées en température radiative définie par

radiative définie par

$$L_\lambda(T, \theta, \phi) = L^\circ_\lambda[\text{Trad}(\theta, \phi)] \quad (2)$$

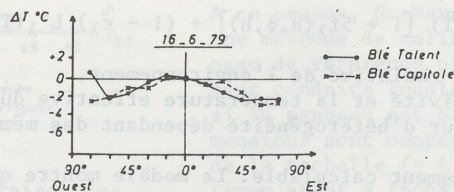


Figure 2 : Influence de l'angle de visée sur la température radiative apparente de 2 couverts de blé. La température mesurée à la verticale est prise comme référence. Les mesures sont effectuées au midi solaire dans un plan vertical Est-Ouest. (D'après G. Guyot et al. ⁵⁾)

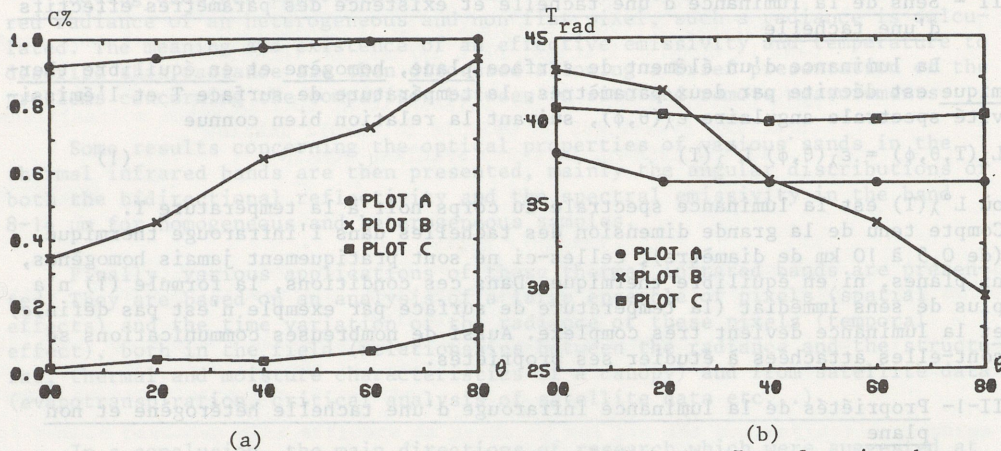


Figure 3 (a) : Variation du taux de couverture végétale C% en fonction de l'angle d'observation θ mesuré en degrés à partir du Nadir pour 3 couverts A, B et C de blés.

3 (b) : Variation de la température radiative de ces couverts en fonction de l'angle d'observation θ . (D'après R.D. Jackson ⁶)

Ces résultats s'expliquent très bien par les expressions théoriques de la luminance. Ces effets angulaires se retrouvent dans les mesures faites à partir de radiomètres à balayage aéroportés.

De leur côté, R. Brochu et al. ⁴) ont cherché à déterminer, par une analyse statistique de nombreuses mesures in situ, quel était le facteur dominant dans la luminance d'une parcelle couverte ou non de végétal. Ils ont trouvé que pour une parcelle non couverte c'est la température de surface du sol qui explique la luminance, tandis que pour la parcelle couverte, c'est plutôt la température de l'air sec au niveau du végétal. Ce résultat s'explique très bien pour la parcelle nue par l'analyse théorique et peut se comprendre pour la parcelle couverte si la température de l'air sec qui doit se situer entre la température du sol et la température du végétal (qui n'a pas été mesurée) est proche de la température radiative du couvert.

II-2- Emissivité et température effective

Dans ces conditions de complexité, peut-on introduire une émissivité et une température effective du milieu ? Dans son exposé, F. Becker ²) a montré qu'il est possible de réécrire la luminance d'un milieu sous la forme

$$L_{\lambda}(\theta, \phi) = \tilde{\epsilon}_{\lambda}(\theta, \phi, h) L^{\circ}_{\lambda}(T) [1 + 5f_{\lambda}(\theta, \phi, h)] + (1 - \tilde{\epsilon}_{\lambda}) L^{\circ}_{\lambda}(T_S) \quad (3)$$

où T_S est la température radiative de l'environnement, $\tilde{\epsilon}_{\lambda}$ et T sont l'émissivité et la température effective du milieu, $f(\theta, \phi, h)$ est un facteur d'hétérogénéité dépendant des mêmes facteurs que la luminance L_{λ} .

La quantité $\tilde{\epsilon}_{\lambda}$ est facilement calculable. Le modèle montre qu'elle dépend - du couvert (structure, propriétés optiques et donc humidité) - des conditions d'observation.

Un exemple de résultat est donné figure 4 pour les paramètres donnés dans la table 1.

L'émissivité $\tilde{\epsilon}_{\lambda}$ définie par (3) n'a d'intérêt que si $f < 10^{-3}$. Ceci explique la contradiction apparente entre la variation angulaire de $\tilde{\epsilon}$ donnée figure 4 et celle de Trad donnée figures 2 et 3.

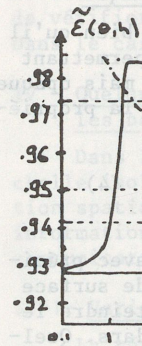


Figure 4 : $\tilde{\epsilon}$ effective en fonction de l'angle θ mesuré en degrés à partir du Nadir pour les paramètres donnés dans la table 1. (D'après F. Becker ²)

Cet écart entre $\tilde{\epsilon}$ et Trad se explique comme il se voit dans la figure 4.

II-3- Comparaison

L'effet de la température effective T suggère que la température effective du milieu est plus élevée que la température de surface mesurée (cf. figure 4). Les auteurs

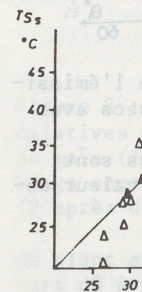
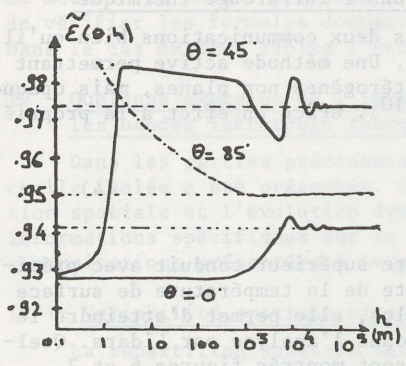
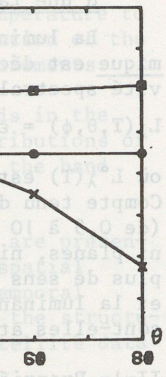


Figure 5 : Variation de la température effective du milieu (T) et de la température de surface mesurée (T_S) en fonction de l'angle θ mesuré en degrés à partir du Nadir pendant le vol de reconnaissance de la nuit du 17 août 1978. (D'après F. Becker ²)



			Paramètres
S	L	H	géométriques
3	3	3	(en m)
ϵ_g	ϵ_w	ϵ_C	optiques
.85	.95	.95	
T_g	T_w	T_C	thermiques
25	18	17	(en °C)

Table 1 : Paramètres du couvert ayant conduit au résultat de la figure 4. L'angle instantané d'analyse du radiomètre est $\alpha = 10^{-3}$ rad.

Figure 4 : Variation de l'émissivité effective $\tilde{\epsilon}(\theta, h)$ du couvert de la figure 1 en fonction de l'altitude de h et de l'angle θ d'observation mesuré en degré à partir du nadir pour les paramètres donnés table 1. (D'après F. Becker ²⁾)

Cet écart entre $T_{rad}(\theta, \phi)$ et $\tilde{\epsilon}(\theta, \phi)$, accessible directement à la mesure comme il sera vu plus loin, peut être une mesure de l'hétérogénéité thermique du milieu.

II-3- Comparaison des luminances observées in situ et à partir de satellites

L'effet d'altitude indiqué figure 4 a été discuté par B. Seguin et al. ¹¹⁾ qui suggèrent qu'il est à l'origine des différences importantes qu'ils observent (cf. figure 5) entre les mesures faites à partir de NOAA 5 et in situ, sur la Crau en France du Sud. Il faut noter cependant, comme il a été souligné par les auteurs que les corrections atmosphériques réduisent ces écarts, sans pouvoir expliquer pour autant la surestimation

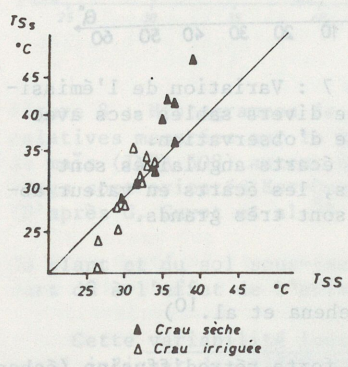


Figure 5 : Comparaison des températures par satellite (T_{SS}) et des températures de surface mesurées au sol (T_{SS}) pendant le mois de juillet 1978. (D'après B. Seguin)

par le satellite des températures de la Crau irriguée. Ces trois points soulignent la difficulté de la comparaison entre mesures in situ et mesures faites à partir de satellites. Elle provient, comme il a été souligné

- de l'effet de synthèse sur une très grande surface (représenté figure 4)
- de l'effet atmosphérique
- des fonctions d'appareil différentes pour les divers radiomètres.

A ce propos, G. Maracci et al. ⁹⁾ ont proposé une méthode de calibration à l'aide d'un panneau de référence placé in situ. Cette méthode peut conduire localement à de bons résultats si le panneau est bien calibré et si ses dimensions sont compatibles avec la dimension de la tache (≈ 4 taches au moins, l'optimum étant 9 taches).



III - Propriétés optiques de certains sables dans l'infrarouge thermique

Ce sujet n'a été abordé à Avignon que dans deux communications bien qu'il ait été sous-jacent dans la plupart des autres. Une méthode active permettant de mesurer l'émissivité de grandes surfaces hétérogènes non planes, mais opaques a été présentée par P. Ramanantsizehena et al.¹⁰). Grâce en effet à la propriété de Kirchoff

$$\varepsilon_{\lambda}(\theta_i) = 1 - \iint_{\text{hémisph. sup.}} \rho_{b\lambda}(\theta_i, \theta, \phi) \cos \theta \, d\Omega, \quad (4)$$

une mesure de $\rho_{b\lambda}(\theta_i, \theta, \phi)$ dans l'hémisphère supérieur conduit avec précision à l'émissivité et évite une mesure délicate de la température de surface et élimine les effets de l'environnement. De plus, elle permet d'atteindre le coefficient de rétrodiffusion, très important dans l'analyse par Lidars. Quelques résultats typiques concernant des sables sont montrés figures 6 et 7.

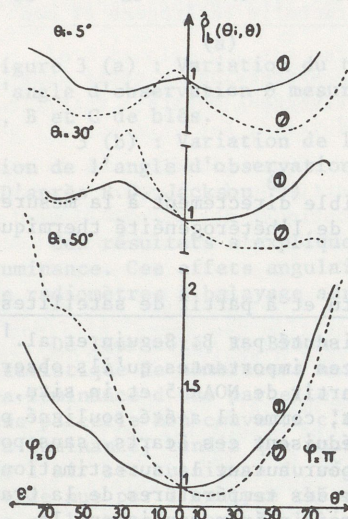


Figure 6 : Variation de la réflectivité bidirectionnelle normalisée à $\theta = 0$ en fonction de l'angle d'incidence θ_i et de l'angle d'observation θ dans le plan d'incidence pour deux sables

- ① ———
- ② - - - -

La mesure est moyennée dans le domaine 8-14 μm . (D'après P. Ramanantsizehena et al.¹⁰)

On constate que certains sables présentent une forte rétrodiffusion (échantillon ⑦) alors que d'autres ont un comportement plus diffus. Les grandes différences de comportement angulaire observées dans la réflectivité bidirectionnelle ne se retrouvent pas dans l'émissivité comme le montre la figure 7, ce qui pose le problème de la comparaison entre l'émissivité et le coefficient de rétrodiffusion. Cependant, les écarts d'émissivité entre les divers sables analysés sont considérables et peuvent conduire sur le plan radiométrique à des écarts de température radiative de 6°C pour des sables à la même température.

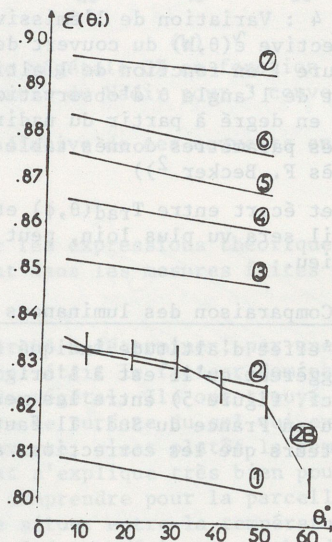


Figure 7 : Variation de l'émissivité de divers sables secs avec l'angle d'observation. Si les écarts angulaires sont faibles, les écarts en valeur absolue sont très grands.

La méthode de vérification Dans le cas

IV - Quelques les ba

Dans la chelle isolée tion spatiale information communiqué

IV-1- Vari

La ré mesurée in intéressan Ph. Malet turaux et l'influence togrammes figures 8

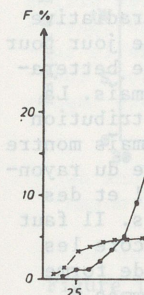


Figure 8 : relatives de maïs (I rangs sont (D'après G

du plant e cart dû à

Cette aussi indi ques du vé montrés fi différente très varia partir des ces comme NOAA 5.

La méthode de mesure proposée et le dispositif expérimental utilisé permettent de vérifier les formules donnant l'émissivité effective de milieux hétérogènes. Dans le cas de deux sables l'accord entre le modèle et la mesure est excellent.

IV - Quelques exemples de l'impact thématique de la télédétection dans les bandes infrarouge thermique

Dans les parties précédentes, seule l'analyse de la luminance d'une tache isolée a été présentée. Or la télédétection permet d'étudier la répartition spatiale et l'évolution dynamique de ces luminances et d'en déduire des informations spécifiques sur le milieu étudié. C'est pourquoi la plupart des communications présentées à Avignon ont abordé cet aspect.

IV-1- Variabilité spatiale et propriétés du couvert

La répartition spatiale des luminances infrarouge thermique d'un couvert mesurée in situ présente une variabilité dont les caractéristiques sont aussi intéressantes à connaître que la valeur moyenne. Comme l'ont en effet montré Ph. Malet et al.⁸⁾, cette variabilité locale peut être reliée aux états structuraux et phénologiques du couvert. Ainsi G. Guyot et al.⁵⁾ ont montré l'influence du taux de couverture végétale et du déficit hydrique sur les histogrammes de fréquence de température radiative. Ces résultats sont présentés figures 8 et 9. Les auteurs notent la difficulté d'obtenir des histogrammes

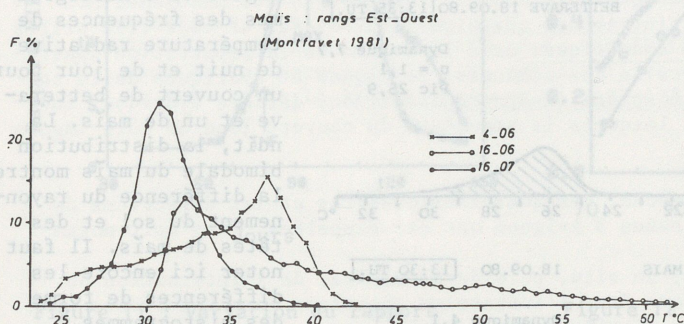


Figure 8 : Histogrammes de fréquence des températures relatives mesurées sur la même surface d'un couvert de maïs (INRA 508) autour du midi solaire dont les rangs sont orientés Est-Ouest. (D'après G. Guyot et al.⁵⁾)

de fréquence précis car sur le même site, des mesures faites à des intervalles de temps très voisins (quelques secondes) pour une journée calme, conduisent à des différences significatives sur les histogrammes mais non sur les températures moyennes. On note l'influence du taux de couverture végétale, de l'état phénologique et de l'humidité, non seulement sur la valeur moyenne mais sur la forme de l'histogramme (largeur, distribution bimodale se transformant en unimodale etc...). De plus, l'écart entre température radiative des feuilles

du plant et du sol sous-jacent décroît avec l'évolution du végétal, comme l'écart dû à l'effet de l'orientation des rangs.

Cette variabilité locale, liée à la structure et à l'état du végétal, peut aussi indiquer des différences notables dans les échanges thermiques et hydriques du végétal comme l'ont noté P. Boissard et al.³⁾. Leurs résultats sont montrés figure 10 et table 2 où l'on voit que pour des couverts de structure différente à la même température radiative moyenne, les rapports de Bowen sont très variables. Cette variabilité locale n'est actuellement pas observable à partir des canaux thermiques des satellites qui intègrent toutes ces différences comme l'ont noté B. Seguin et al.¹¹⁾ dans leur étude sur les données de NOAA 5.

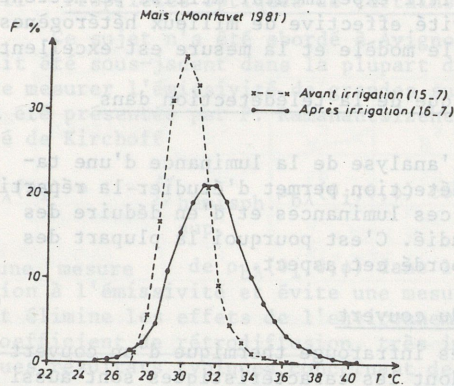


Figure 9 : Histogrammes de fréquence des températures radiatives mesurées au midi solaire sur la même surface avant et après irrigation (Maïs INRA 508 rangs orientés Nord-Sud). (D'après G. Guyot et al.⁵)

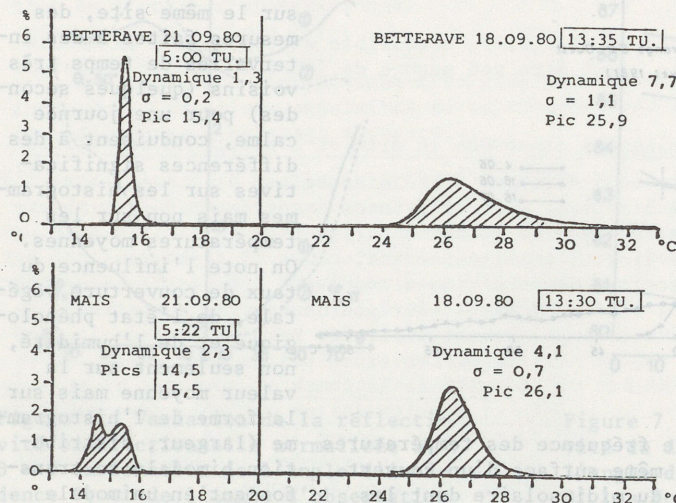


Figure 10 : Histogrammes des fréquences de température radiative de nuit et de jour pour un couvert de betterave et un de maïs. La nuit, la distribution bimodale du maïs montre la différence du rayonnement du sol et des têtes de maïs. Il faut noter ici encore les différences de forme des histogrammes. (D'après P. Boissard et al.³)

	Nuit (5h TU)	Jour (13h30 TU)
Betterave	1,8	0,25
Maïs	1,4	0,9

Table 2 : Rapports de Bowen pour les deux couverts de la figure 10. Les températures moyennes de jour sont très proches et les rapports de Bowen très différents. (D'après P. Boissard et al.³)

les conditions climatiques considérées, et le type de couvert étudié, des valeurs "seuil" pour le CWSI. Les auteurs donnent les résultats de la table 3 obtenus sur 3 parcelles de blé.

IV-2- Réponses radiatives (visible et IRT, flux échangés et déficit hydrique

A l'échelle locale, R.D. Jackson et al.⁷) ont montré que l'indice de déficit hydrique pour les céréales (crop water stress index, CWSI) qu'ils ont construit à partir de la mesure de la température radiative du couvert peut être localement un bon indice du déficit hydrique et qu'il peut être utilisé pour contrôler l'irrigation. Les figures 11 et 12 en sont une illustration. On note en effet une bonne corrélation, figure 12, entre le CWSI et la fraction d'eau extractable (jusqu'à 1,1 m) utilisée, EEU. La comparaison avec la figure 11 qui donne l'évolution de la biomasse repérée par le rapport (proche infra-rouge/rouge) permet de donner, pour

	Seuils
CWSI	
EEU	

Table 3. (al.⁷) pour le déficit hydrique. Les valeurs particulières

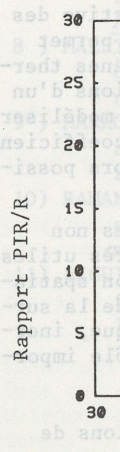


Figure 11 : Rapport proche infra-rouge/rouge (x) du temps de la journée (A (.)).

A l'échelle locale, R.D. Jackson et al.⁷) ont montré que l'indice de déficit hydrique pour les céréales (crop water stress index, CWSI) qu'ils ont construit à partir de la mesure de la température radiative du couvert peut être localement un bon indice du déficit hydrique et qu'il peut être utilisé pour contrôler l'irrigation. Les figures 11 et 12 en sont une illustration. On note en effet une bonne corrélation, figure 12, entre le CWSI et la fraction d'eau extractable (jusqu'à 1,1 m) utilisée, EEU. La comparaison avec la figure 11 qui donne l'évolution de la biomasse repérée par le rapport (proche infra-rouge/rouge) permet de donner, pour

les conditions climatiques considérées, et le type de couvert étudié, des valeurs "seuil" pour le CWSI. Les auteurs donnent les résultats de la table 3 obtenus sur 3 parcelles de blé.

(visible et et déficit

R.D. Jack- que l'indice les céréales CWSI) qu'ils la mesure

ve du cou- un bon in- et qu'il peut er l'irriga- 2 en sont en effet gure 12, en- n d'eau ex- utilisée, la figure 11 la biomasse roche infra- rner, pour

Histogram- quences de radiative de jour pour de bettera- maïs. La stribution maïs montre ce du rayon- ol et des s. Il faut ncore les de forme ammes.

Boissard

wen pour les re 10. Les jour sont ports de Bo- al.³⁾

table 3

	Seuil de déficit (point de séparation INF sur figure 11)	Arrêt de croissance de la biomasse (max du rapport PIR/R)
CWSI	0,28	0,52
EEU	0,46	0,67

Table 3 : Valeurs moyennes du CWSI et de EEU obtenues par R.D. Jackson et al.⁷⁾ pour divers couverts de blé correspondant à deux seuils typiques de déficit hydrique. Les valeurs dans ce tableau dépendent des conditions microclimatiques en particulier de la vitesse du vent.

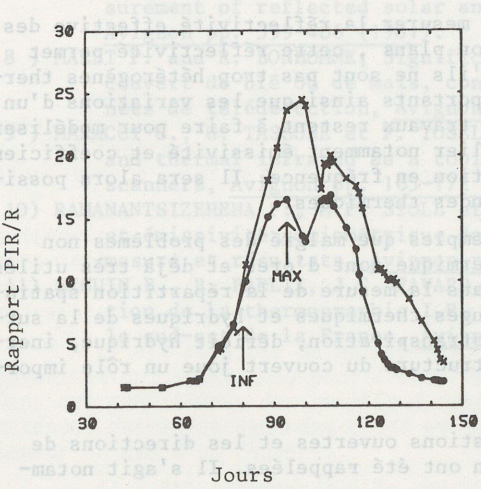


Figure 11 : Variation du rapport proche infra-rouge/rouge en fonction du temps pour la parcelle bien irriguée (x) et la parcelle mal irriguée A (.).

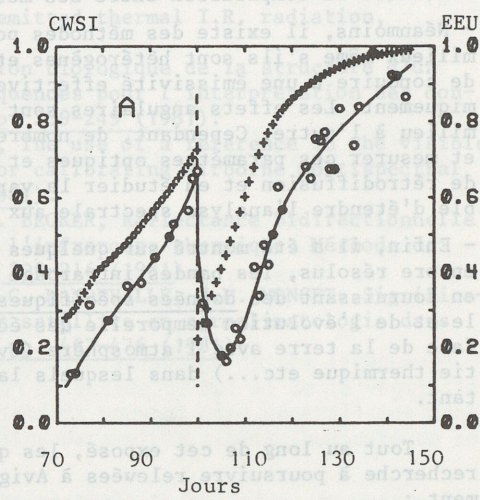


Figure 12 : Variation du CWSI (o) et de la fraction d'eau extractable à 1,1 m utilisée (+) EEU en fonction du temps. Pour la parcelle A, il y a eu irrigation au jour 100.

A l'échelle régionale, B. Seguin et al.¹¹⁾ ont présenté une analyse qualitative de la répartition spatiale des luminances observées à partir de NOAA 5 et de Météosat et de leurs corrélations avec les caractéristiques du terrain. Ils notent que :

- les écarts de luminance sont d'abord sensibles à la topographie et l'altitude puis en plaine, aux bilans hydriques ;
- les écarts de luminance pour NOAA 5 se corrèlent bien en plaine de la Crau avec les contrastes hydriques mesurés au sol. L'avantage du satellite est qu'il donne en plus les effets saisonniers sur une grande surface.

Comme le notent aussi B. Seguin et al.¹¹⁾, il faut absolument s'appuyer sur des modèles reliant les paramètres à observer aux paramètres observables si on veut entreprendre des études quantitatives (évapotranspiration, inertie thermique, humidité etc...). Les études sont en effet possibles comme viennent de le montrer les équipes européennes qui ont analysé les données Météosat sur le Sahel pour en extraire une estimation de l'évapotranspiration et de l'inertie thermique dans le cadre du GAMP sous contrat EARSEL et ESA.

V - Conclusions

Malgré les problèmes qu'elles soulèvent, ces études illustrent certains aspects des potentialités importantes offertes par la télédétection dans les canaux infrarouge thermique. Notamment ils ont montré que :

- la luminance IRT in situ d'une tache de couvert végétal est une quantité complexe dépendant des caractéristiques du couvert (structure, état hydrique et thermique, orientation ...) et des conditions de la mesure (altitude, angle d'observation, caractéristiques du radiomètre ...). Si cette luminance peut être modélisée dans les cas simples, elle ne peut pas toujours être décrite simplement en termes d'émissivité et de température effective et il n'est pas encore possible d'extraire sans ambiguïté de la luminance les caractéristiques du couvert. Dans le cas des luminances observées à partir des satellites s'ajoutent les effets de l'atmosphère et de l'intégration superficielle qui rendent difficile la comparaison entre ces mesures pour des milieux hétérogènes.

- Néanmoins, il existe des méthodes pour mesurer la réflectivité effective des milieux même s'ils sont hétérogènes et non plans, cette réflectivité permet de conduire à une émissivité effective s'ils ne sont pas trop hétérogènes thermiquement. Les effets angulaires sont importants ainsi que les variations d'un milieu à l'autre. Cependant, de nombreux travaux restent à faire pour modéliser et mesurer ces paramètres optiques et relier notamment émissivité et coefficient de rétrodiffusion et en étudier la variation en fréquence. Il sera alors possible d'étendre l'analyse spectrale aux bandes thermiques.

- Enfin, il a été montré sur quelques exemples que malgré des problèmes non encore résolus, les bandes infrarouge thermique sont d'ores et déjà très utiles en fournissant des données spécifiques dans la mesure de la répartition spatiale et de l'évolution temporelle des échanges thermiques et hydriques de la surface de la terre avec l'atmosphère (évapotranspiration, déficit hydrique, inertie thermique etc...) dans lesquels la structure du couvert joue un rôle important.

Tout au long de cet exposé, les questions ouvertes et les directions de recherche à poursuivre relevées à Avignon ont été rappelées. Il s'agit notamment :

- Des études fondamentales, in situ, puis de satellite, de l'interaction du rayonnement électromagnétique dans l'infrarouge thermique avec les divers milieux tant sous les aspects géométriques, énergétiques et spectraux. Ces études nécessitent un approfondissement théorique pour construire des modèles réalistes de luminance qui pourront être inversés. Elles permettront entre autre, de relier les luminances mesurées in situ et à partir de satellites et d'extraire ainsi les caractéristiques cherchées de la surface.

- Des études fondamentales et thématiques dans les domaines hydriques et thermiques qui permettront de préciser les modèles d'inversion donnant les paramètres du sol ou/et de croissance des végétaux à partir des luminances observées.

- Des études dans le domaine instrumental (résolutions spatiale et géométrique) devant conduire à des instruments spécifiques, bien calibrés permettant une déconvolution précise de leur fonction d'appareil et donc une mesure indépendante des conditions de sa réalisation.

Ce sont les conclusions que l'on peut tirer du colloque d'Avignon et les perspectives très intéressantes qu'il a ouvertes tant au niveau de la recherche que des applications.

Bibliographie

- 1) AVIGNON, Société Internationale de Photogrammétrie et Télédétection, Groupe VII-3, Colloque "Signatures spectrales d'objets", Avignon 8-11 septembre 1981, Proceedings edited by G. Guyot and M. Verbrugghe, INRA Service des publications, route de St Cyr, 78000 Versailles (France).

- 2) BECKE
- 3) BOISS
- 4) BROCH
- 5) GUYOT
- 6) JACKS
- 7) JACKS
- 8) MALET
- 9) MARAC
- 10) RAMAN
- 11) SEGUI

- 2) BECKER F., Angular reflectivity and emissivity of natural media in the thermal infrared bands, Avignon pp. 57-72 (1981).
- 3) BOISSARD P., J.M. BERTOLINI, P. VALERY, D. RENARD, Thermographie de couverts végétaux à courte distance, Avignon pp. 559-568 (1981).
- 4) BROCHU R., F. BONN, Influence de la couverture végétale sur les relations entre rayonnement solaire incident, températures du sol et radiation thermique émise dans la fenêtre 9,5-11,5 microns, Avignon pp. 331-338 (1981).
- 5) GUYOT G., E. CHASSERAY, Analyse de la signification physique et biologique de la température radiative d'un couvert végétal de céréales, Avignon pp. 379-389 (1981).
- 6) JACKSON R.D., Interaction between canopy geometry and thermal infrared measurements, Avignon pp. 291-302 (1981).
- 7) JACKSON R.D., P.J. PINTER Jr., Detection of water stress in wheat by measurement of reflected solar and emitted thermal I.R. radiation, Avignon pp. 399-406 (1981).
- 8) MALET P. and R. BONHOMME, Signification biologique de la structure d'un couvert de blé ou de maïs, conséquences pour l'interprétation des données de télédétection, Avignon pp. 239-249 (1981).
- 9) MARACCI G., G. TASSONE et F. TOSELLI, The use of a reference in the visible and thermal infrared as a tool for calibrating airborne multispectral scanners, Avignon pp. 165-172 (1981).
- 10) RAMANANTSIZEHENA P., M.P. STOLL et F. BECKER, Réflectance bidirectionnelle et émissivité goniométrique dans l'infrarouge thermique. Méthode de mesure et résultats, Avignon pp. 209-216 (1981).
- 11) SEGUIN B., B. BAELTZ, J.C. FAVARD, J.C. MANDEVILLE, J.M. MONGET, Signification de la thermographie I.R. par satellite en agroclimatologie dans le sud-est de la France, Avignon pp. 467-476 (1981).

polarisation, incidence) pour l'observation sélective du sol et de la végétation. Dans ces conditions, des relations quantitatives pouvant être généralisées sont obtenues entre les réponses radar et certains paramètres cibles (humidité du sol, teneur en eau d'un couvert).

Il a été recommandé à la conclusion générale du colloque, de mettre l'accent sur les recherches dans le domaine des micro-ondes - recherches peu nombreuses à l'heure actuelle.

ABSTRACT

Some considerations on microwave remote sensing researchs are presented based on contributions of the Colloquium on "Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing".

The physical content of microwave sensor responses is related to geometric and dielectric properties of the object. The information acquired are complementary to that obtained in other spectral bands.

Selective observations of vegetation canopy are possible through a proper choice of microwave (frequency, polarisation, incidence). Quantitative relationships - which can be generalized - are obtained between radar responses and certain target parameters (soil moisture, water content of a canopy).

It was recommended in the general conclusion of the colloquium to put the emphasis on microwave remote sensing researchs in the future.

