SYNTHÈSE

Possibilités d'utilisation de la télédétection satellitaire en agrométéorologie

Gérard GUYOT et Bernard SEGUIN

I.N.R.A., Station de Bioclimatologie, Centre de Recherches d'Avignon, B.P. 91, F 84140 Montfavet

RÉSUMÉ

La télédétection offre des possibilités nouvelles dans le domaine de l'agrométéorologie. Les satellites météorologiques (qui ont une bonne répétitivité dans le temps mais une faible résolution spatiale) et les satellites d'observation de la terre (qui ont une bonne résolution spatiale mais une faible répétitivité dans le temps) permettent d'obtenir des informations complémentaires sur les conditions dans lesquelles se développent les cultures et sur leur état.

Les données de l'infrarouge thermique peuvent être utilisées pour cartographier les climats locaux, estimer les bilans hydriques à l'échelle de la petite région et déterminer l'extension spatiale et l'ampleur des accidents climatiques majeurs (gel, sécheresse). Les données du visible, du proche et du moyen infrarouge permettent d'identifier les cultures, de déterminer leur stade phénologique, de suivre leur évolution, d'estimer leur biomasse et de prévoir leur production.

La combinaison des informations fournies par ces 2 types de satellites devrait permettre dans l'avenir d'avoir une meilleure connaissance et une meilleure maîtrise de la production agricole. Cependant, l'application de ces techniques pourra être limitée par la couverture nuageuse.

Mots clés additionnels : *Infrarouge thermique, visible, proche-infrarouge.*

SUMMARY

Possible uses of satellite remote sensing in agrometeorology.

Remote sensing offers new possibilities in agrometeorology. Meteorological satellites (which have good revisit capability but low spatial resolution) and earth observation satellites (which have good spatial resolution but poor revisit capability) give complementary information on crop growth conditions and on the biological status of plants. Thermal infrared data can be used to map local climates, to estimate water balance at the scale of a small region and to determine the extent and the seriousness of damage caused by major climatic accidents (frost, drought). Visible near, near and middle infrared data are well adapted to crop identification and monitoring, biomass estimation and yield forecasting. The combination of information given by these 2 types of satellites should in future provide better knowledge and better control of agricultural production. However the application of such techniques may be limited by the cloud cover.

Additional key words : *Thermal infrared, visible, near-infrared.*

I. INTRODUCTION

Dans le domaine de l'agrométéorologie, les données de 2 types de satellites peuvent être utilisées. Ce sont celles des satellites météorologiques et des satellites d'observation de la terre. Chacun d'eux apporte, en effet, des informations différentes et complémentaires.

Les satellites météorologiques permettent d'obtenir des informations dans le visible, le proche-infrarouge et l'infrarouge thermique, avec une bonne répétitivité dans le temps (30 mn pour Météosat, 4 passages par jour pour les satellites NOAA), mais avec une faible résolution spatiale (5 km pour Météosat, 1 km pour NOAA-AVHRR). Ils fournissent ainsi des informa-

tions globales, à l'échelle de la petite région, qui permettent de suivre l'évolution des conditions dans lesquelles se développent les cultures ainsi que de l'état de la couverture végétale.

Les satellites d'observation de la terre (SPOT, Landsat Thematic Mapper), ayant une faible répétitivité dans le temps (sauf pour SPOT si on utilise les possibilités de dépointage), ne permettent pas de suivre de façon précise l'évolution des couverts végétaux. Par contre, ils ont une très bonne résolution spatiale (10 à 30 m) et ils fournissent des informations multispectrales beaucoup plus détaillées que les satellites météorologiques. Ils permettent ainsi des analyses fines de la couverture végétale, à des périodes particulières.

Dans cet exposé, qui a pour objectif de faire le point

sur l'état actuel de la question, nous analyserons successivement les possibilités de la tédetection dans l'infrarouge thermique et dans le domaine des courtes longueurs d'ondes (du visible à l'infrarouge moyen). Bien qu'elles apparaissent porteuses d'applications intéressantes (telles que le suivi de l'humidité du sol) et permettent de s'affranchir des contraintes de couverture nuageuse, les micro-ondes ne seront pas traitées ici parce qu'il n'existe pas encore de satellite opérationnel dans ce domaine (le premier satellite d'observation de la terre, équipé d'un radar à antenne synthétique ERS1, sera lancé par l'Agence Spatiale Européenne en 1991).

II. LES APPORTS DE L'INFRAROUGE THERMIQUE

La mesure de l'énergie émise par une surface, dans l'infrarouge thermique, permet de déterminer sa température radiative avec une précision qui dépend de l'étalonnage du radiomètre du satellite et de la manière dont l'absorption atmosphérique est prise en compte.

A. Les satellites dont les données sont utilisables en agrométéorologie

Météosat est équipé d'une seule bande de longueur d'onde (10,5-12,5 μm) et il a des performances radiométriques assez médiocres. La précision des mesures varie entre + et - 5 °C selon les conditions atmosphériques. Par ailleurs, comme Météosat est géostationnaire, sa résolution spatiale est limitée ; aussi est-il surtout utilisable pour l'Afrique, même si certaines applications peuvent être envisagées comme la cartographie des masses nuageuses pour l'estimation du rayonnement solaire reçu au sol (DEDIEU, 1983), et si l'on excepte la contribution évidente à l'amélioration des prévisions météorologiques à court terme.

Le satellite NOAA7-AVHRR est équipé de 2 canaux dans l'infrarouge thermique : 10,3-11,3 et 11,5-12,5 μm . La combinaison linéaire de ces 2 canaux (technique dite du « split window ») permet d'éliminer l'essentiel de l'influence atmosphérique et d'estimer les températures radiatives avec une précision de l'ordre de 0,5 à 1 °C, d'après les contrôles effectués sur l'océan (DESCHAMPS & PHULPIN, 1980). Cependant, au-dessus des surfaces continentales, une sous-estimation systématique de la température radiative de 4 °C a pu être notée récemment (LAGOUARDE *et al.*, 1985). L'ajustement de la méthode du « split window » devrait cependant permettre de réduire cet écart (VIDAL *et al.*, 1987).

En ne tenant pas compte, dans un premier temps, de la variabilité de l'émissivité des surfaces naturelles (comprises généralement entre 0,95 et 0,97) (BECKER, 1981 ; BECKER *et al.*, 1984), on obtient, à partir des données de NOAA, une cartographie des températures de surface avec une incertitude de 1 à 2 °C, sur les valeurs absolues, et de 0,5 °C sur les valeurs différentielles. La dimension de la zone élémentaire visée (1 km) est très inférieure à celle de la maille du réseau synoptique (50 à 100 km) et même à celle du réseau

secondaire pluvio-thermométrique (10 à 20 km) dont la fiabilité est parfois douteuse. NOAA apparaît alors comme un outil tout à fait nouveau de diagnostic au niveau du climat local (fig. 1).

Figure 1

Les échelles d'espace caractéristiques de l'agrométéorologie (d'après Seguin, 1984).

Characteristic space scales of agrometeorology (after Seguin, 1984).

Le satellite d'observation de la terre Landsat Thematic Mapper est également équipé d'un canal infrarouge thermique 10,5-12,5 μm avec une résolution spatiale de 120 m. Pour l'instant, les données thermiques de ce satellite ont été peu utilisées dans le domaine de l'agrométéorologie. En effet, l'heure de passage du satellite (9 h 30 TU) correspond à un moment où les températures de l'air et du sol évoluent rapidement.

Il est toujours préférable d'effectuer des comparaisons à un moment où les températures diurnes sont stables, aux alentours du maximum de température. L'heure de passage de NOAA (14 h 30 TU) avait été choisie pour cela. Les simulations effectuées par VIDAL *et al.* (1987) à partir du modèle de CHOISNEL (1977) montrent (fig. 2) que, les maximums de température de l'air et du sol étant décalés, la vitesse d'évolution des températures à 14 h 30 TU est effectivement faible, mais reste notable. Elle n'est cependant pas beaucoup plus forte à 9 h 30, ce qui indique que les données thermiques de Landsat TM pourraient être utilisées en agrométéorologie pour déterminer, à certaines dates, l'état des cultures à une échelle fine.

Figure 2

Evolution horaire comparée de la température de l'air (T_a) et de la température de surface (T_s) d'un gazon. Simulation effectuée à partir du modèle de Choissnel (1977) sur une journée type (6 juillet 1986) (d'après Vidal *et al.*, 1987).

Compared hourly change of the air temperature (T_a) and of the surface temperature (T_s) of a lawn. Simulation performed on a typical day (July 6 1986) with Choissnel's model (1977) (after Vidal *et al.*, 1987).

B. Utilisations de la température de surface

Par rapport aux températures de l'air T_a , mesurées à 2 m sous abri, la spécificité de la température de surface T_s doit être prise en compte. L'évidente égalité :

$$T_s = T_a + (T_s - T_a)$$

montre que 3 types d'utilisations des données de température de surface peuvent être envisagées :

- l'utilisation directe de T_s ,
- l'estimation de T_a à partir des données de T_s ,
- l'utilisation de l'écart $(T_s - T_a)$.

1. Cartographie des climats locaux

Au cours des nuits de gel, la répartition des températures nocturnes permet d'identifier de façon objective les zones touchées et d'en déduire éventuellement une cartographie des dégâts qui peuvent être occasionnés (voir FISCHER, 1983, pour le Sud-Est de la France). Des systèmes de suivi de la température nocturne à partir de satellites géostationnaires ont également été proposées aux Etats-Unis (SUTHERLAND *et al.*, 1979) dans une optique de prévision.

Une cartographie des températures de surface diurnes peut également conduire à la détermination de « sommes de températures de surface » qui pourraient être utilisées à la place ou en complément des « sommes de températures de l'air », établies à partir de données climatiques conventionnelles pour évaluer les potentialités de production d'espèces ou de variétés différentes.

2. Estimation des variations de température de l'air

Dans une région où il n'existe pas de déficit hydrique et où le couvert végétal est homogène, l'écart $(T_s - T_a)$ est faible et relativement constant. Ce cas se rencontre essentiellement dans les zones montagneuses et couvertes de forêts homogènes. Les variations de température de l'air, liées au relief, peuvent alors être très bien décrites par les données de l'infrarouge thermique (LAGOUARDE *et al.*, 1983).

3. Estimation du bilan hydrique

Le bilan des échanges énergétiques à la surface du sol peut se représenter par l'équation suivante :

$$R_n - S = H + LE$$

avec R_n : rayonnement net (résultante des échanges radiatifs de courte et de grande longueur d'onde),

S : flux de chaleur par conduction dans le sol,

H : flux de chaleur sensible dans l'air,

LE : flux de chaleur latente dans l'air (L est la chaleur latente de vaporisation de l'eau, E est le flux d'eau évaporé par un sol nu ou évapotranspiré par un couvert végétal) (LE est souvent représenté par ET , évapotranspiration).

Le flux de chaleur sensible peut se mettre sous la forme :

$$H = \rho C_p h (T_s - T_a)$$

h étant le coefficient d'échange convectif, ρ la masse spécifique et C_p la chaleur spécifique de l'air.

De ces équations nous pouvons déduire :

$$T_s - T_a = R_n - S - LE / \rho C_p h.$$

Pour un niveau de rayonnement solaire donné (valeur de R_n donnée) l'écart $(T_s - T_a)$ est essentiellement fonction de l'évaporation (LE) de la zone considérée. Il est d'autant plus grand que l'évaporation est plus faible. Ainsi, SEGUIN *et al.* (1982) ont pu noter des écarts de température de plus de 20 °C entre 2 surfaces adjacentes, l'une sèche et l'autre irriguée. Le coefficient h a une influence plus limitée. Il varie en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité du couvert végétal (fonction du type de couvert : bas comme des prairies ou élevé comme du maïs ou des arbres fruitiers) ainsi que du type d'aménagement du paysage (ouvert ou cloisonné par des brise-vent). Les variations de h sous l'influence de ces différents facteurs peuvent se traduire par des variations de l'écart $(T_s - T_a)$ de l'ordre de 2 à 3 °C (SEGUIN, 1984).

Comme cet ordre de grandeur est nettement inférieur à celui de l'effet de l'évaporation, on peut ainsi envisager d'utiliser la température de surface pour suivre le bilan hydrique. C'est ainsi qu'à la suite des travaux de JACKSON *et al.* (1977), SEGUIN (1984) a proposé une relation simplifiée permettant d'estimer l'évapotranspiration ET à partir des données de température de surface :

$$ET = R_n - A (T_s - T_a) + B.$$

ET est estimé à l'échelle journalière à partir de R_n , intégré sur la journée, et de l'écart $(T_s - T_a)$ au moment du maximum de température. A et B sont des constantes ($A = 0,25 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$, $B = 1,0 \text{ mm} \cdot \text{j}^{-1}$). Comme la température de l'air T_a , à 2 m sous abri, est beaucoup moins variable que la température de surface du sol on peut utiliser les données fournies par le réseau climatique au sol et effectuer des interpolations entre les postes. L'erreur ainsi introduite est de l'ordre de 1 °C. Elle doit être comparée à la variabilité de T_s qui est souvent supérieure à 10 °C. Le rayonnement net R_n peut être déduit des données de rayonnement global, qui peut lui-même être déterminé à partir des mesures de couverture nuageuse par le satellite (DEDIEU, 1983). Le rayonnement net peut également être mesuré au niveau du sol ou estimé à partir des données climatiques. L'erreur globale, résultant de l'utilisation de cette relation simplifiée, est de l'ordre de 1 $\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$, ainsi que l'ont montré les travaux effectués dans la basse vallée du Rhône (SEGUIN *et al.*, 1986). Il devient ainsi possible, à partir des données satellitaires, de cartographier les valeurs de l'évapotranspiration réelle à l'échelle d'une région.

Dans les régions sahéniennes, l'évapotranspiration réelle d'une zone donnée dépend de la quantité de précipitations qui a été reçue, et comme on a vu que la température de surface pouvait être reliée à l'évapotranspiration, on peut penser que l'on aura également une relation (température de surface) $\leftrightarrow$ (précipitations). C'est ce qu'ont montré ASSAD *et al.* (1986). Ils ont mis en évidence l'existence d'une corrélation linéaire étroite entre la somme des précipitations et la somme des températures de surface mesurées par satellite, comme l'indique la figure 3.

En utilisant cette relation et en l'appliquant aux données de Météosat, il a été possible de dresser les cartes pluviométriques du Sénégal pour les saisons des pluies

Figure 3

Relations entre pluies cumulées et températures maximales cumulées de la surface du sol (déterminées par Météosat) (d'après Assad et al., 1986).

Relationship between accumulated rains and cumulated maximum soil surface temperatures (determined by Meteosat) (after Assad et al., 1986).

de 1984 et 1985. La figure 4 montre que les isohyètes tracées à partir des données de Météosat sont en bon accord avec celles qui ont été établies à partir du réseau Agrhymet, mais elles semblent apporter une information plus détaillée.

Figure 4

Isohyètes obtenues à partir de Météosat et du réseau Agrhymet au Sénégal pour les saisons des pluies de 1984 et de 1985 (d'après Assad et al., 1986).

Isohyets obtained from Meteosat and Agrhymet network in Senegal for 1984 and 1985 rain seasons (after Assad et al., 1986).

C. Conclusion partielle

Le domaine thermique apporte donc des informations utiles en agrométéorologie pour la caractérisation des climats locaux et l'estimation de l'état hydrique des cultures, en complément des données météorologiques au sol et des modèles de bilan hydrique. Les études méthodologiques ont progressé au cours des dernières années, et l'évolution technologique des chaînes de

traitement, qui facilitent l'accès aux données satellitaires pour les utilisateurs non spécialistes, devrait permettre une multiplication des études de cas au cours des prochaines années.

III. CARACTÉRISATION SPECTRALE DES COUVERTS VÉGÉTAUX DANS LES COURTES LONGUEURS D'ONDES

Dans le visible, le proche et le moyen infrarouge, les résultats de nombreuses expériences effectuées dans le monde montrent que les informations spectrales des satellites peuvent être utilisées pour identifier les couverts végétaux, estimer la phytomasse aérienne chlorophyllienne et déterminer l'état des plantes à un instant donné. Pour bien comprendre ces phénomènes, il est cependant nécessaire de présenter tout d'abord rapidement les propriétés spectrales des couverts végétaux.

Le flux de rayonnement d'origine solaire, qui est réfléchi par un couvert végétal et capté par un radiomètre à balayage, est composé de flux élémentaires qui sont réfléchis par les feuilles et par le sol et qui ont éventuellement traversé un certain nombre de surfaces foliaires. Ainsi, les propriétés optiques d'un couvert végétal sont fortement dépendantes de celles des feuilles et, dans une moindre proportion, de celles du sol.

A. Les propriétés optiques des feuilles

La figure 5 présente, à titre d'exemple, l'évolution de la réflectance d'une feuille de blé, dans différents états, en fonction de la longueur d'onde. Sur cette figure, nous pouvons distinguer 3 domaines spectraux dans lesquels les propriétés optiques des feuilles sont différentes (GAUSMAN & ALLEN, 1973 ; KNIPLING, 1970 ; GUYOT, 1984).

1. Le visible (400-700 nm)

Les feuilles ont, dans ce domaine, une faible réflectance (15 % maximum) et une très faible transmittance. La majeure partie du rayonnement reçu est absorbée par les pigments foliaires. Les principaux d'entre eux sont les chlorophylles a et b qui représentent 65 % des pigments foliaires des plantes supérieures (GATES *et al.*, 1965). La chlorophylle a est la plus abondante et elle présente une intense bande d'absorption dans le rouge et une bande plus faible dans le bleu. La chlorophylle b présente inversement une bande intense d'absorption dans le bleu et une bande plus faible dans le rouge (GATES, 1970).

Ainsi, à cause du spectre d'absorption de ces pigments, les feuilles présentent un maximum de réflectance dans le jaune-vert à 550 nm environ et 2 minimums dans le bleu et dans le rouge.

2. Le proche infrarouge (700-1 300 nm)

Dans ce domaine, les pigments cellulaires ainsi que la cellulose, qui constitue les parois cellulaires, sont

Figure 5

Spectres de réflectance de feuilles de blé déterminés au laboratoire au cours de la phase de sénescence (d'après Guyot, 1984).

Reflectance spectra of wheat leaves determined in the laboratory during senescence (after Guyot, 1984).

transparents ; aussi la quantité de rayonnement qui est absorbée par la feuille est très faible (inférieure ou égale à 10 %). Le rayonnement reçu est soit transmis, soit réfléchi. La réflectance passe ainsi brutalement de valeurs très faibles à près de 50 %. Le niveau du « plateau de réflectance » dépend de la structure interne des feuilles. Il est d'autant plus élevé que les tissus sont constitués de cellules aux formes irrégulières et au contenu hétérogène (GAUSMAN, 1974) et que le nombre d'assises cellulaires est grand (GAUSMAN *et al.*, 1970).

3. L'infrarouge moyen (1 300 nm-2 500 nm)

Dans ce domaine les propriétés optiques des feuilles sont essentiellement affectées par leur teneur en eau (ALLEN *et al.*, 1969 ; TUCKER & GARRATT, 1977). En effet, au-delà de 1 300 nm, il existe des bandes d'intense absorption du rayonnement par l'eau, en particulier à 1 450, 1 950 et 2 500 nm ; mais, même entre ces bandes, l'absorption par l'eau n'est pas nulle, aussi le niveau des 2 maximums relatifs observés à 1 650 et 2 200 nm est-il également influencé par la teneur en eau des feuilles (les bandes 5 et 7 de Thematic Mapper sont centrées sur ces 2 maximums).

Durant la majeure partie de leur existence, les feuilles ont des propriétés optiques stables (GUYOT, 1980). Elles n'évoluent que durant les stades juvéniles et la sénescence. La figure 5 montre ainsi l'évolution de la réflectance d'une feuille de blé durant la sénescence. La disparition des pigments chlorophylliens entraîne un fort accroissement de la réflectance dans le jaune-vert et dans le rouge. Dans le proche-infrarouge, la réflectance évolue seulement lorsque la structure interne de la feuille est désorganisée par son dessèchement. Dans l'infrarouge moyen, l'accroissement de la réflectance est lié au dessèchement de la feuille.

Les propriétés optiques des feuilles sont également affectées par d'autres facteurs, tels que les déficiences minérales et hydriques et les attaques parasitaires. Ces facteurs peuvent modifier la teneur en pigments, la

teneur en eau ou la structure anatomique des feuilles (GUYOT, 1984).

B. Les propriétés optiques des sols

La figure 6 donne un exemple de courbes de réflectance d'un sol (BOWERS & HANKS, 1965) correspondant à différentes humidités. Elle montre que, pour un sol, la réflectance croît progressivement du visible à l'infrarouge moyen. On observe, comme pour la végétation, la présence de bandes d'absorption de l'eau qui sont d'autant plus intenses que le sol est plus humide. On remarque également que la teneur en eau du sol affecte sa réflectance dans tout le domaine spectral considéré et elle est d'autant plus faible que le sol est plus humide (CIERNIEWSKI, 1986).

Figure 6

Evolution du spectre de réflectance d'un limon sableux en fonction de son humidité (mesures au laboratoire) (d'après Bowers et Hanks, 1965).

Variation of the reflectance spectra of a sandy loam as a function of its moisture content (laboratory measurements) (after Bowers and Hanks, 1965).

Les propriétés optiques des sols dépendent également de leur composition minérale et de leur teneur en matière organique. Leur réflectance peut ainsi varier dans de larges proportions, mais la forme générale du spectre reste la même (STONER & BAUMGARDNER, 1981). On peut également noter qu'en général, un sol est plus réfléchissant que la végétation dans le visible et l'infrarouge moyen (sauf s'il est très riche en matière organique ou très humide) et moins réfléchissant dans le proche-infrarouge.

D'autre part, l'état de surface d'un sol en place peut affecter sa réflectance de façon importante. Par exemple, un sol sec et rugueux peut avoir une réflectance sensiblement égale à celle de ce même sol lisse et humide (GIRARD & BIALOUSZ, 1981). De même, un sol clair et lessivé, mais dont la surface est motteuse, peut avoir une réflectance voisine de celle d'un sol lisse et riche en matière organique (CIERNIEWSKI, 1984). Les travaux de HUETE *et al.* (1985) confirment ces résultats. Ils montrent ainsi que les variations de réflectance d'un sol, liées à l'état de surface, peuvent parfois être supérieures à celles qui sont dues à la croissance d'un couvert végétal.

C. La réflectance des couverts végétaux

La figure 7 donne un exemple de l'évolution de la réflectance d'un couvert de blé de printemps au cours du temps (BAUER *et al.*, 1981 ; AHLRICHS & BAUER, 1983). Au semis, on observe le spectre de réflectance d'un sol nu, auquel se superpose progressivement celui des feuilles durant les premiers stades. On peut remarquer que, lorsque la végétation se développe, la réflectance du couvert végétal diminue dans le visible et l'infrarouge moyen, alors qu'elle augmente dans le proche-infrarouge. Cette évolution se poursuit, pour les céréales, jusqu'à la fin de la montaison (VUATHIER, 1979 ; BARET & HUET, 1979). A partir de l'épiaison, on observe une évolution en sens inverse. La réflectance diminue tout d'abord dans le proche infrarouge puis, lorsque les feuilles commencent à jaunir et à se dessécher, elle augmente dans le visible et dans l'infra-

Figure 7

Evolution du spectre de réflectance d'un couvert de blé au cours du temps (d'après Bauer *et al.*, 1981).

Change with time in the reflectance spectra of a wheat canopy (after Bauer *et al.*, 1981).

rouge moyen (AHLRICHS & BAUER, 1981 ; BARET & GUYOT, 1986).

On observe le même type d'évolution pour toutes les cultures annuelles. La réflectance dans les domaines du visible et de l'infrarouge moyen diminue lorsque l'indice foliaire (surface de feuilles par unité de surface de sol) augmente. Par contre, elle augmente dans le proche infrarouge (MILLER *et al.*, 1984 ; LEAMER *et al.*, 1978 ; HINZMAN *et al.*, 1986). Dans le visible et l'infrarouge moyen, la réflectance atteint un palier pour un indice foliaire voisin de 3 et dans le proche-infrarouge pour un indice foliaire voisin de 5 ou 6. C'est ce que montre la figure 8 qui est tracée à partir de simulations effectuées sur modèle par VERHOEF & BUNNIK (1981).

Figure 8

Evolution de la réflectance d'un couvert végétal dans le rouge et le proche infrarouge en fonction de l'indice foliaire. Tracé effectué à partir des données de Verhoef et Bunnik (1981) pour un couvert dont les feuilles font un angle de 40° avec la tige.

Change in the red and near-infrared reflectance of a plant canopy in relation to leaf area index. Figure drawn from Verhoef's and Bunnik's data (1981) for a canopy the leaves of which have a 40° angle with the stem.

Il faut noter que la valeur de l'indice foliaire nécessaire pour atteindre un des paliers dépend également du port des feuilles. Cette valeur sera plus élevée pour un couvert dont les feuilles sont dressées (érectophile) que pour un couvert dont les feuilles sont étalées (planophile). En effet, pour un indice foliaire donné, le taux de couverture du sol est plus élevé pour un couvert planophile que pour un couvert érectophile.

Les propriétés optiques d'un couvert végétal dépendent donc, non seulement de son indice foliaire, mais également de sa structure géométrique. Selon la fonction de distribution des inclinaisons des feuilles, la réponse spectrale peut être très différente pour un même indice foliaire. Le taux de couverture du sol sera d'autant plus important que les feuilles seront moins dressées, comme l'ont montré aussi bien les mesures sur le terrain que les simulations sur modèles (VERHOEF & BUNNIK, 1981 ; GUYOT, 1984 ; BARET, 1986). Il faut d'ailleurs noter que l'effet d'un déficit hydrique ou d'une attaque parasitaire pourra être détecté dans les domaines du visible, du proche et du moyen infrarouge s'il affecte le port des feuilles, sans même affecter leurs propriétés optiques (JACKSON & EZRA, 1985).

D. Les bandes spectrales des satellites

Les études spectrales qui ont été effectuées sur les organes et les couverts végétaux ont permis de définir les bandes spectrales les mieux adaptées pour identifier et suivre l'évolution des cultures par télédétection. La figure 9 présente ainsi les bandes spectrales des satellites Landsat MSS, Landsat T.M., SPOT et NOAA-AVHRR confrontées au spectre de réflectance d'un végétal et d'un sol nu. On peut remarquer sur cette figure que la bande MSS 6 de Landsat est mal adaptée au suivi de la végétation. Par contre, les bandes étroites de Landsat T.M. et de SPOT permettent de suivre l'évolution des couverts végétaux. Les bandes de NOAA-AVHRR sont proches des canaux MSS 5 et 7 de Landsat et permettent de bien distinguer le sol et la végétation.

Les bandes TM 5 et TM 7 de Thematic Mapper, qui sont situées dans le domaine d'absorption de l'eau, étaient tout d'abord destinées à suivre l'état hydrique de la végétation et l'humidité de la surface du sol. Les études effectuées sur le terrain (BARET *et al.*, 1986 ; BONN & CLICHE, 1981 ; SHEFFIELD, 1985 ; CHOU CHEN *et al.*, 1986) ont montré que la teneur en eau des feuilles des plantes, bien alimentées en eau ou déficitaires, varie dans des proportions relativement faibles qui n'affectent pratiquement pas leurs propriétés optiques dans l'infrarouge moyen.

Ainsi, les bandes TM 5 et TM 7 apportent surtout des informations sur le développement de la surface foliaire et le port des plantes, ainsi que sur l'humidité de la surface du sol sous-jacent (BARET *et al.*, 1986). Les analyses de la part d'information contenue dans les différentes bandes spectrales ont montré que près de 90 % de l'information sur un couvert végétal sont

contenus dans les canaux rouge et proche-infrarouge (BARET *et al.*, 1986 ; CHOU CHEN *et al.*, 1986). Cela paraît tout à fait logique, car ce sont les bandes dans lesquelles le contraste entre le sol et la végétation est le plus grand.

IV. UTILISATION DES DONNÉES SPECTRALES POUR SUIVRE L'ÉVOLUTION DE LA VÉGÉTATION

A. Utilisation des profils spectraux

L'évolution au cours du temps de la réflectance d'un couvert végétal dans différentes bandes spectrales constitue ce que l'on appelle son « profil spectral ». Il est évident que ce profil spectral dépendra de l'évolution de la phytomasse aérienne chlorophyllienne et de la phénologie de la culture considérée. BARET (1986) a proposé un modèle simple qui permet de déduire de ce profil spectral un certain nombre de paramètres caractéristiques de l'évolution des surfaces foliaires ou de l'orientation des éléments du couvert. La figure 10 donne un exemple de profil spectral d'une culture de blé prévu par le modèle et mesuré sur le terrain. L'application immédiate de ce modèle est le suivi phénologique des cultures.

Par ailleurs le modèle de BARET (1986) permet, à la suite des travaux de WIEGAND & RICHARDSON (1984), de déterminer la partie photosynthétiquement active du rayonnement solaire qui est absorbée par un couvert végétal. A partir de cet élément, il est alors possible d'estimer la production de matière sèche.

Figure 9

Les bandes spectrales des satellites Landsat MSS, Landsat TM, SPOT et NOAA-AVHRR confrontées au spectre de réflectance d'une feuille et d'un sol nu.

Spectral bands of satellites Landsat MSS, Landsat TM, SPOT and NOAA-AVHRR compared with reflectance spectra of a leaf and of bare soil.

Figure 10

Profil spectral d'un couvert de blé dans le proche infrarouge (bande XS3 de SPOT). Les cercles correspondent aux points expérimentaux et le trait continu au modèle (d'après Baret, 1986).

Near-infrared (SPOT channel XS3) spectral profile of a wheat canopy. Circles correspond to experimental data and solid line to model simulation (after Baret, 1986).

B. Les indices de végétation

Comme les données de réflectance dans le rouge (r) et dans la proche infrarouge (pIR) contiennent le maximum d'information sur la végétation, il est logique que différentes combinaisons de ces canaux aient été proposées (BARIOU *et al.*, 1985). C'est ainsi que PEARSON & MILLER (1972) ont proposé l'utilisation du rapport :

$$R = (pIR)/(r)$$

qui amplifie les écarts entre sol et végétation. ROUSE *et al.* (1974) ont ensuite proposé d'utiliser la différence normalisée ND :

$$ND = [(pIR) - (r)] / [(pIR) + (r)]$$

Ces 2 indices sont fonctionnellement équivalents (MALET, 1986) puisque l'on peut passer de l'un à l'autre en utilisant la relation :

$$ND = (R - 1)/(R + 1)$$

Ces 2 indices sont relativement peu sensibles aux propriétés optiques du sol. En effet, les points correspondant à différents états de la surface d'un sol nu donné s'alignent, dans le plan (rouge) — (proche-infrarouge), selon une droite que l'on appelle la droite du sol (fig. 11) (RICHARDSON & WIEGAND, 1977) :

$$(pIR) = a(r) + b$$

avec a et b : constantes caractéristiques d'un type de sol donné.

La constante b est petite devant le produit $a(r)$ aussi pour une zone agricole correspondant à un type de sol et à un mode d'exploitation bien défini, on a :

$$R = a \quad \text{et} \quad ND = (a - 1)/(a + 1)$$

Les variations de R ou ND qui sont alors observées, dépendent essentiellement des variations de la couverture végétale.

Pour éviter d'avoir dans certains cas des valeurs négatives de ND , certains auteurs utilisent parfois l'indice de végétation transformé TVI (IDSO *et al.*, 1980) :

$$TVI = \sqrt{0,5 + ND}$$

Figure 11

Définition du PVI et évolution de la réflectance de couverts de blé dans le plan rouge — proche-infrarouge, (1) phase d'établissement de la végétation, (2) sol complètement couvert (épiaison, floraison), (3) phase de sénescence (droite de sénescence) (d'après Baret, 1986).

PVI definition and change in the reflectance of wheat canopies in the red — near-infrared plane, (1) vegetation establishment, (2) soil completely covered (heading-flowering), (3) senescence (senescence line) (after Baret, 1986).

Cet indice peut être établi à partir des données des canaux MSS 5 (rouge : 500-600 nm) et 6 (pIR : 700-800 nm) ou 7 (pIR : 800-1 100 nm) de Landsat pour donner les indices TVI6 ou TVI7 qui sont fonctionnellement équivalents à ND (BARET & GUYOT, 1986).

D'autres indices proposés sont également basés sur la distinction sol-végétation. Un des plus simples et des plus utilisés est l'indice perpendiculaire de végétation PVI proposé par RICHARDSON & WIEGAND (1977). Il correspond à la distance orthogonale d'un point représentatif d'un couvert végétal à la droite des sols (fig. 11). Cet indice permet théoriquement d'avoir des informations indépendantes de l'effet du sol. En fait, cet indice peut être influencé par l'humidité de surface du sol liée aux précipitations (ou aux irrigations) lorsque la couverture du sol par la végétation n'est pas totale (JACKSON *et al.*, 1983 ; HUETE *et al.*, 1985).

KAUTH & THOMAS (1976) proposent un indice de construction différente, déterminé pour les canaux MSS de Landsat, qui est à la fois très sensible à la végétation et indépendant des propriétés optiques du sol : l'indice de végétation verte GVI. Il est bâti de la même manière que le PVI mais en introduisant 2 dimensions supplémentaires qui correspondent aux canaux MSS 4 et 6 de Landsat. Il s'agit ensuite de trouver des axes orthogonaux représentant respectivement : le sol, la végétation verte, la végétation sénescence et le résidu. Ce concept a été étendu aux 6 canaux de Thematic Mapper par JACKSON (1983).

En réalité, l'accroissement du nombre de canaux entrant dans le calcul des indices apporte relativement

peu d'informations supplémentaires sur la végétation par rapport à la combinaison des seuls canaux rouge et proche-infrarouge (WIEGAND & RICHARDSON, 1982 ; JACKSON, 1983 ; PERRY & LAUTENSCHLAGER, 1984 ; ELVIDGE & LYON, 1985).

C. Utilisation des indices pour suivre l'évolution de la végétation

La variation des indices de végétation en fonction du développement des cultures a généralement une allure asymptotique (TUCKER, 1977a, 1979 ; RIPPLE, 1985) (fig. 12), comme on pouvait le supposer en examinant la figure 8. Aussi, leur utilisation pour déterminer un paramètre d'un couvert est-elle plus facile lorsque l'indice foliaire a des valeurs relativement faibles mais cependant suffisamment élevées pour masquer partiellement le sol (POLLOCK & KANEMASU, 1979 ; RICHARDSON *et al.*, 1982). Ainsi HUETE *et al.* (1985) montrent que le taux de couverture du sol doit être compris entre 20 et 75 % pour que les indices de végétation fournissent des informations précises.

Ainsi, les indices de végétation peuvent être utilisés pour suivre l'évolution de couverts végétaux, soit à l'échelle locale avec les satellites à haute résolution spatiale (GUYOT *et al.*, 1985), soit à l'échelle régionale à l'aide des données de NOAA-AVHRR (voir, par exemple, JUSTICE, 1985).

Figure 12

Relation entre l'indice de végétation ND et la biomasse (d'après Tucker, 1979).

Relationship between ND vegetation index and biomass (after Tucker, 1979).

1. Estimation de la biomasse chlorophyllienne

L'estimation de la matière sèche totale de la partie aérienne d'un couvert végétal, à partir des données radiométriques est, le plus souvent, beaucoup plus facile que celle de la partie récoltée. Pour passer de l'une à l'autre, il faut donc généralement utiliser un indice de récolte qui dépendra de la culture considérée et des conditions locales.

De nombreux travaux montrent que la réflectance spectrale des couverts végétaux est liée à la biomasse chlorophyllienne totale de la partie aérienne au moment de la mesure. De très fortes corrélations entre la biomasse chlorophyllienne et différents indices de végétation ont ainsi été mises en évidence pour de nombreuses cultures : graminées fourragères (TUCKER, 1977b, 1978a, 1978b), sorgho (GERBERMAN *et al.*, 1984), maïs et soja (TUCKER *et al.*, 1979) blé (AHLRICHS & BAUER, 1983).

Les relations qui sont ainsi établies varient en fonction de la phénologie et de la nature des espèces cultivées, ce qui rend leur utilisation difficile en dehors du contexte dans lequel elles ont été définies. Il faut donc être très prudent lorsqu'on envisage d'utiliser de telles relations et savoir qu'elles ne sont valables que pour une gamme limitée de variation de la matière sèche par unité de surface pour une culture donnée.

2. Estimation du rendement final des cultures

L'estimation du rendement des cultures à partir de relations statistiques directes avec les indices de végétation à une date donnée a souvent été utilisée car elle permettait des applications immédiates. Ces relations statistiques peuvent être établies dans un but prévisionnel en reliant les mesures effectuées à un stade phénologique particulier, à la production finale (BARNETT & THOMPSON, 1983). Il faut cependant noter que, compte tenu des remarques précédentes, la précision de ces relations est souvent médiocre.

Par ailleurs les études qui conduisent à des résultats satisfaisants correspondent à des niveaux de production faibles, comparativement à ce que l'on peut observer en Europe. En effet, dans ces conditions, la couverture du sol étant faible les valeurs des indices de végétation sont assez éloignées de leur niveau asymptotique (RICHARDSON *et al.*, 1982 ; BARNETT & THOMPSON, 1983 ; AASE *et al.*, 1984 ; SASHIKUMAR *et al.*, 1984 ; KAMAT *et al.*, 1985). Par contre les essais effectués sur des cultures à niveau de production plus élevé ne permettent pas l'établissement d'aussi bonnes corrélations (KLEMAN & FAGERLUND, 1981) à cause de la saturation de la réponse radiométrique lorsque l'indice foliaire est maximum (HATFIELD, 1984 ; CHASSERAY, 1984).

3. Utilisation de données multitemporelles

Lorsque la végétation se développe, l'indice ND croît progressivement pour atteindre un palier pour un indice foliaire de 3 à 4 (fig. 13).

Il décroît ensuite durant la phase de sénescence des plantes (AHLRICHS & BAUER, 1983 ; BARET & GUYOT, 1986).

A l'échelle locale, l'indice ND (ou l'indice TVI6 qui lui est étroitement corrélé) permet ainsi de suivre la mise en place des cultures et leur sénescence. Les travaux de IDSO *et al.* (1980) et de BARET & GUYOT (1986) ont ainsi permis de montrer que l'on pouvait utiliser la vitesse d'évolution de TVI6 (ou ND), durant la phase de sénescence du blé pour déterminer les dates de début et de fin du palier hydrique des grains (période critique durant laquelle s'effectue le remplissage des grains et

Figure 13

Evolution au cours du temps de la différence normalisée (ND) pour différents couverts de céréales (d'après Baret et Guyot, 1986).

Progress with time of the normalized difference (ND) for different cereal canopies (after Baret and Guyot, 1986).

durant laquelle les risques d'échaudage sont maximaux). La vitesse d'évolution de ND peut également être utilisée pour prévoir la production finale (fig. 14).

A l'échelle régionale, l'évolution temporelle de l'indice ND, calculé sur les pixels de NOAA-AVHRR, permet de caractériser globalement l'évolution de la couverture végétale qui est fonction des conditions pédo-climatiques locales. L'analyse de cette évolution peut apporter des informations très intéressantes sur l'influence des facteurs hydriques sur la production (LAGOUARDE *et al.*, 1986), notamment dans les régions sahéliennes (TUCKER *et al.*, 1986).

— d'identifier l'extension des avances ou des retards dans la phénologie de la couverture végétale,
— d'évaluer, en cas de sécheresse importante, l'impact sur la production de phytomasse aérienne chlorophyllienne.

Les informations globales ainsi obtenues pourraient alors être complémentaires de celles fournies par les satellites à haute résolution spatiale. La figure 15 donne à titre d'exemple l'évolution de l'indice ND pour 2 stations du Sénégal qui ont reçu des quantités de pluie très différentes durant l'hivernage en 1984. Elle met bien en évidence l'évolution de la couverture végétale dans ces 2 zones (SEGUIN *et al.*, 1987).

Il faut noter cependant que, si NOAA-AVHRR permet d'avoir chaque jour des informations sur tous les points du globe, c'est grâce à son grand angle de

Figure 14

Relation entre la production du blé et la vitesse d'évolution de l'indice de végétation TVI6 (étroitement corrélé à ND). Les mesures effectuées en France sont comparées aux résultats de Idso *et al.* (1980) (d'après Baret et Guyot, 1986).

Relationship between wheat production and change of the rate of TVI6 vegetation index (closely correlated to ND). Measurements performed in France are compared with results of Idso *et al.* (1980) (after Baret and Guyot, 1986).

Dans ces régions, le suivi de certaines zones, où la couverture végétale peut être considérée comme relativement homogène (compte tenu de la résolution spatiale du satellite), pourrait permettre :

Figure 15

Comparaison de l'évolution de l'indice ND et des pluies pour 2 stations au Sénégal au cours de l'année 1984. Matam a reçu 148 mm durant la saison des pluies (normale 535 mm) et Linguéré 370 mm (normale 536 mm) (d'après Seguin *et al.*, 1987).

Comparison of change in the ND index and of rains for two stations of Senegal during 1984. Matam received 148 mm during the rainy season (standard value 535 mm) and Linguéré 370 mm (standard value 536 mm) (after Seguin *et al.*, 1987).

balayage (55° de part et d'autre de la verticale). Lorsque le sol est visé obliquement, on accroît le trajet optique du rayonnement réfléchi à l'intérieur de l'atmosphère et donc la perturbation de la mesure (absorption par les aérosols et luminance propre du trajet optique). De plus la réponse spectrale du sol varie en fonction de l'angle de visée (GUYOT, 1984). Il faut donc appliquer des corrections aux données de NOAA-AVHRR qui seront fonction de l'angle de visée et de l'état de l'atmosphère (HOLBEN *et al.*, 1986).

4. Déclenchement d'alarmes

Si les indices de végétation ne sont pas encore des indicateurs « quantitatifs » très fiables de la production végétale, ils sont sensibles, par contre, aux différentes contraintes subies par la végétation (déficits hydriques, déficiences minérales, attaques parasitaires) et notamment dans les régions de culture extensive où la couverture du sol n'est pas totale (JACKSON & EZRA, 1985). Dans les régions de culture intensive, les indices ne sont affectés que lorsqu'il s'agit d'une contrainte sévère.

Cette modification du niveau des indices peut être utilisée pour le déclenchement d'alarmes ou pour fournir des informations à des modèles de prévision de rendement que l'on peut appeler des modèles agrométéorologiques de risque. Ces modèles utilisent les seuils d'alarme fournis à la fois par un indice de végétation et les données météorologiques au sol pour choisir parmi plusieurs possibilités de calcul du rendement (TAYLOR & RAVETT, 1981). Ces modèles nécessitent la connaissance des stades de développement atteints par la culture afin de connaître sa sensibilité aux contraintes diverses. Il faut donc adjoindre aux modèles de risque des modèles météorologiques de développement des plantes.

V. CONCLUSION

La télédétection offre, comme nous venons de le voir, de nouvelles possibilités dans le domaine de l'agrométéorologie. A l'heure actuelle, les données satellitaires permettent surtout de généraliser et d'étendre à l'échelle régionale les observations qui sont effec-

tuées localement au sol, mais elles ne permettent pas de les remplacer. Toutefois l'amélioration de la résolution spatiale des satellites d'observation de la terre et des méthodes de traitement des données de télédétection (analyse structurale, correction des effets atmosphériques) devraient permettre de réduire de plus en plus le volume des mesures au sol qui sont et seront toujours nécessaires.

Par ailleurs, le traitement des données satellitaires nécessite l'utilisation de techniques particulières dont l'usage pourrait se vulgariser rapidement grâce au développement explosif de la micro-informatique auquel nous assistons à l'heure actuelle. Des systèmes de traitement d'image performants et d'un prix modéré, utilisant des équipements standards de bureau, devraient ainsi favoriser la diffusion des techniques de télédétection auprès des utilisateurs.

Il est ainsi possible d'envisager la mise en place de systèmes opérationnels de surveillance des conditions climatiques et des cultures. De tels systèmes devront combiner les informations fournies par les satellites météorologiques, les satellites d'observation de la terre ainsi que les informations obtenues au sol.

Le suivi ou la prévision de l'état des cultures au cours du temps, ainsi que la prévision des récoltes, devront s'appuyer sur des modèles utilisant les données des satellites météorologiques. Pour caler ces modèles, il sera nécessaire d'utiliser des données des satellites d'observation de la terre qui fourniront des informations statistiques détaillées sur la répartition des cultures et sur leur état dans une zone déterminée et à un instant particulier.

Il faut cependant noter qu'une des importantes limitations à l'utilisation des satellites, fonctionnant dans le domaine optique, est la couverture nuageuse. Les nuages empêchent l'observation de la surface de la terre et ainsi, par exemple, dans les régions tropicales ou nordiques il est souvent difficile d'avoir des mesures régulièrement réparties dans le temps. Cela limite les possibilités d'application pratique des méthodologies qui ont été exposées ; mais dans les prochaines années les satellites radar, qui permettront d'effectuer des observations quel que soit l'état de l'atmosphère, pourront fournir des informations complémentaires qui seront utilisées dans les modèles d'interprétation.

Reçu le 20 novembre 1986.

Accepté le 13 septembre 1987.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aase J. K., Siddoway F. H., Millard J. P., 1984. Spring wheat leaf phytomass and yield estimates from airborne scanner and hand-held radiometer measurements. *Int. J. Remote Sensing*, 5 (5), 771-781.
- Ahlrichs J. S., Bauer M. E., 1983. Relation of agronomic and multispectral reflectance characteristics of spring wheat canopies. *Agron. J.*, 75, 987-993.
- Allen W. A., Gausman H. W., Richardson A. J., Thomas J. P., 1969. Interaction of isotropic light with a compact plant leaf. *J. Opt. Soc. Am.*, 59, 1376-1379.
- Assad E., Seguin B., Kerr Y., Freteau J. P., Lagouarde J. P., 1986. Approche quantitative de la pluviométrie au Sénégal à l'aide d'images infrarouge thermique du satellite Météosat. *Veille climatique satellitaire*, 13 juillet 1986, 21-29.
- Baret F., 1986. Contribution au suivi radiométrique de couverts de céréales. *Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud Orsay*, N° d'ordre : 98, 182 pp.
- Baret F., Guyot G., 1986. Suivi de la maturation de couverts de blé par radiométrie dans les domaines visible et proche infrarouge. *Agronomie*, 6 (6), 509-516.
- Baret F., Huet M., 1979. Contribution à l'utilisation agronomique de la télédétection : analyse des relations entre la structure d'un couvert végétal, son état physiologique et les données radiométriques. *Rapport de fin de stage. I.N.R.A., Station de Bioclimatologie, 84140 Montfavet (France)*, 115 pp.
- Baret F., Guyot G., Bégué A., Maurel P., Podaire A., 1986. Etude de la complémentarité du moyen infrarouge avec le visible et le pro-

- che infrarouge pour le suivi de la végétation. In *Proc. 3rd Int. Coll. on spectral signatures of objects in remote sensing*, Les Arcs, France, 16-20 Dec. 1985 (ESA SP-247), 409-412.
- Bariau R., Lecamus D., Le Henaff F.**, 1985. Indices de végétation. *Dossiers de Télédétection* N° 2, Centre Régional de Télédétection, Université de Rennes 2, 151 pp.
- Barnett T. L., Thompson D. R.**, 1983. Large area relation of Landsat MSS and NOAA-AVHRR spectral data to wheat yield. *Remote Sens. Environ.*, 13, 277-290.
- Bauer M. E., Daughtry C. S. T., Vanderbilt V. C.**, 1981. Spectral agronomic relationships of maize, soybean and wheat canopies. In *Proc. Int. Colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing*, Avignon, Sept. 08-11 1981, *Les Colloques de l'I.N.R.A.* N° 5, 261-272.
- Becker F.**, 1981. Angular reflectivity and emissivity of natural media in the thermal infrared bands. In *Proc. Int. Colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing*, Avignon, Sept. 08-11 1981, *Les Colloques de l'I.N.R.A.* N° 5, 57-72.
- Becker F., Ramanantsizhena P., Stoll M. P., Fisher J.**, 1984. Comparison between spectral emissivities and backscattering coefficients for various soil types in the thermal infrared bands. In *Proc. 2nd Int. Colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing*, Bordeaux, Sept. 12-16 1983, *Les Colloques de l'I.N.R.A.* N° 23, 503-517.
- Bonn F., Cliche G.**, 1981. Une étude préliminaire de l'information contenue dans la bande Thematic Mapper 5 (1,55-1,75 μm) de Landsat D à partir d'un vol de simulation. In *Proc. Int. Colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing*, Avignon, Sept. 08-11 1981, *Les Colloques de l'I.N.R.A.* N° 5, 315-322.
- Bowers S. S., Hanks R. J.**, 1965. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Sci.*, 100 (2), 130-138.
- Chasseray E.**, 1984. Etude du stress hydrique du blé par télédétection ; application à l'avertissement à l'irrigation en zone aride par radiothermométrie. *Thèse Docteur Ingénieur, ENSA Rennes*, 84/4 F2, 91 p.
- Choisnel E.**, 1977. Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol. *La Météorologie*, numéro spécial « Evapotranspiration », VI^e série, 11, 103-133.
- Chou Chen S., Batista G. T., Tardin A. T.**, 1986. Landsat TM band combinations for crop discrimination. In *Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management*, *Proc. 7th Int. Symp. ISPRS Commission VII*, Enschede 25-29 Aug. 1986, *Int. Arch. Photogram. and Remote Sens.*, Vol. 26.7/1, (M. C. J. Damen, G. Sicco Smit, H. Th. Verstaappen Ed.), A. A. Balkema/Rotterdam/Boston, 211-214.
- Cierniewski J.**, 1984. Influence of surface soil clod structure on spectral response of soil cover. In *Proc. 2nd Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Bordeaux, France, 12-16 Sept. 1983, *Les Colloques de l'I.N.R.A.* N° 23, 141-148.
- Cierniewski J.**, 1986. Relation between soil moisture tension and spectral reflectance of different soil in visible and near-infrared range. In *Proc. 3rd Int. Coll. on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing*, Les Arcs, France, 16-20 Dec. 1985, ESA SP-247, 429-432.
- Dedieu G.**, 1983. Evaluation de quelques termes du bilan énergétique de surface à l'aide des données du satellite Météosat. In « *Applications de la télédétection à l'agriculture* », *Les Colloques de l'I.N.R.A.* N° 32, 167-173.
- Deschamps P. Y., Phulpin T.**, 1980. Atmospheric correction of infrared measurements of sea surface temperature using channels at 3.7, 11 and 12 μm . *Boundary Layer Meteorol.*, 18, 131-143.
- Elvidge C. D., Lyon R. J. P.**, 1985. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass. *Remote Sens. Environ.*, 17, 265-279.
- Fischer M.**, 1983. Télédétection des gelées dans le Sud-Est. In « *Application de la télédétection à l'agriculture* », *Les Colloques de l'I.N.R.A.* N° 32, 173-177.
- Gates D. M.**, 1970. Physical and physiological properties of plants. In « *Remote sensing with special reference to agriculture and forestry* », *National Academy of Science*, Chap. V, 224-252.
- Gates D. M., Keegan H. J., Schleter J. C., Weidner V. R.**, 1965. Spectral properties of plants. *Appl. Optics*, 4 (1), 11-20.
- Gausman H. W.**, 1974. Leaf reflectance of near infrared. *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 40 (2), 57-62.
- Gausman H. W., Allen W. A., Cardenas R., Richardson A. J.**, 1970. Relation of light reflectance to histological and physical evaluation of cotton leaf maturity. *Appl. Optics*, 9 (3), 545-552.
- Gausman H. W., Allen W. A.**, 1973. Optical parameters of leaves of 30 plant species. *Plant. Physiol.*, 52, 57-62.
- Gerberman A. H., Cuellar J. A., Gausman H. W.**, 1984. Relationship of sorghum canopy variables to reflected infrared radiation for 2 wavelengths and 2 wavebands. *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 50 (2), 209-214.
- Girard M. C., Bialousz J.**, 1981. Caractéristiques spectrales des sols en fonction de leurs propriétés. *Troisième Colloque I.S.S.S., « Pédologie, Télédétection, Informatique », Jablonna (Pologne)*.
- Guyot G.**, 1980. Analysis of factors acting on the variability of spectral signatures of natural surfaces. In *Proc. Int. Symp. I.S.P. Hamburg, Int. Arch. Photogram.* XXII (B7), Commission VII, 382-393.
- Guyot G.**, 1984. Caractérisation spectrale des couverts végétaux, application à la télédétection. *Bul. Soc. Franc. Photogram. et Télédétection*, 95 (3), 5-22.
- Guyot G., Campagne P., Verbrugghe M.**, 1985. Mise en évidence expérimentale des nouvelles potentialités de Spot pour identifier les cultures et suivre leur évolution. In *Télédétection et gestion des ressources, l'aspect opérationnel*, Association Québécoise de Télédétection, Vol. 5 (Bernier, Lessard and Gagnon Ed.), 139-146.
- Hatfield J. L.**, 1984. Spectral behaviour of wheat variety trials. *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 47 (10), 1487-1491.
- Hinzman L. D., Bauer M. E., Daughtry C. S. T.**, 1986. Effect of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. *Remote Sens. Environ.*, 19 (1), 47-61.
- Holben B., Kimes D. S., Fraser R. S.**, 1986. Directional reflectance response in AVHRR red and near-IR bands for three cover types and varying atmospheric conditions. *Remote Sens. Environ.*, 19 (3), 213-236.
- Huete A. R., Jackson R. D., Post D. F.**, 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. *Remote Sens. Environ.*, 17, 37-53.
- Idso S. B., Pinter P. J., Jackson R. D., Reginato R. J.**, 1980. Estimation of grain yield by remote sensing of crop senescence rates. *Remote Sens. Environ.*, 9, 87-91.
- Jackson R. D.**, 1983. Spectral indices in n-space. *Remote Sens. Environ.*, 13, 409-421.
- Jackson R. D., Ezra C. E.**, 1985. Spectral response of cotton to suddenly induced water stress. *Int. J. Remote Sens.*, 6 (1), 177-185.
- Jackson R. D., Reginato R. J., Idso S. B.**, 1977. Wheat canopy temperature : a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resource Res.*, 13 (3), 651-656.
- Jackson R. D., Slater P. N., Pinter P. J.**, 1983. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmospheres. *Remote Sens. Environ.*, 13, 187-208.
- Justice C.**, 1985. Analysis of phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. J. Remote Sens.*, 6 (8), 1271-1318.
- Kamat D. S., Gopalan A. K. S., Ajai, Shashikumar M. N., Sinha S. K., Chaturvedi G. S., Singh A. K.**, 1985. Assessment of water stress on crop. *Int. J. Remote Sens.*, 6, 577-589.
- Kauth R. J., Thomas G. S.**, 1976. The tasseled cap. A graphic description of the spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proc. Machine Remotely Sensed Data. IEE Catalog N° 761103-1 MPBSD New York*.
- Kleiman J., Fagerlund E.**, 1981. Spectral signature measurements of barley crops. The influence of irrigation and fertilisation. In *Proc. Int. Colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing*, Avignon, Sept. 08-11 1981, *Les Colloques de l'I.N.R.A.* N° 5, 417-424.
- Knipling E. B.**, 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 1, 155-159.
- Lagouarde J. P., Clinet S., Gandia S., Kerr Y., Roy S., Seguin B., Vidal A.**, 1986. On the use of NOAA-AVHRR data in the lower Rhone Valley (France). In *Proc. EARSeL Symp., « Europe from space », Lingby (Denmark)*, 1986/06/23-27. ESA SP 258, 69-74.
- Lagouarde J. P., Seguin B., Kerr Y., Gandia S., Roy S.**, 1985. Analyse des images NOAA dans la région du Sud-Est de la France. In *Télédétection et gestion des ressources, l'aspect opérationnel*

Association Québécoise de Télédétection, Vol. 5 (Bernier, Lessard and Gagnon Ed.), 147-157.

Lagouarde J. P., Valery P., Belluomo P., Soulier A. M., 1983. Cartographie des topoclimats forestiers. Mise au point d'une méthodologie d'analyse de l'effet du relief sur les thermographies : application aux données HCMM sur le nord-est du Massif Central. *Agronomie*, 3 (10), 1011-1018.

Leamer R. W., Noriega J. R., Wiegand C. L., 1978. Seasonal changes in reflectance of two wheat cultivars. *Agron. J.*, 70 (1), 113-118.

Malet Ph., 1986. Utilisation des satellites « LANDSAT » et « SPOT » pour le suivi biologique des cultures. *Réunion CEE-DG VI sur la prévision des rendements par satellite*, Bruxelles, 14-15/04/86, 15 p.

Miller G. P., Fuchs M., Hall M. J., Asrar G., Kanemasu E. T., Johnson D. E., 1984. Analysis of seasonal multispectral reflectances of small grains. *Remote Sens. Environ.*, 14, 153-157.

Pearson R. L., Miller L. D., 1972. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass prairie, Pawnee National Grasslands, Colorado. *Proc. 8th Int. Symp. on Remote Sens. of Environ.*, Ann Arbor, 1357-1381.

Perry C. R., Lautenschlager L. F., 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, 14, 169-182.

Pollock R. B., Kanemasu E. T., 1979. Estimating leaf area index of wheat from Landsat data. *Remote Sens. Environ.*, 18, 307-312.

Richardson A. J., Wiegand C. L., 1977. Distinguishing vegetation from soil-background information. *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 43, 1541-1542.

Richardson A. J., Wiegand C. L., Arkin G. F., Nixon P. R., 1982. Remotely sensed spectral indicators of sorghum development and their use in growth modeling. *Agric. Meteorol.*, 28, 11-23.

Ripple W. J., 1985. Asymptotic reflectance characteristics of grass vegetation. *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 51 (12), 1915-1921.

Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., Harlan J. C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. *NASA/GSFC, Type III Final Report, Greenbelt, MD*, 371 p.

Sashikumar M. N., Ajai, Kamat D. S., Chaturvedi G. S., Singh A. K., Sinha S. K., 1984. Relationship of spectral and crop growth variables. In *Proc. Crop growth conditions & remote sens. (D. S. Kamat, S. K. Sinha Ed.) ICAR-ISRO-New-Delhi, 22-23 June 1984*, 2.1.1-2.1.17.

Seguin B., 1984. Estimation de l'évapotranspiration à partir de l'infrarouge thermique. In *Proc. 2nd Colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing, Bordeaux, Sept. 12-16 1983, Les Colloques de l'I.N.R.A. N° 23*, 427-446.

Seguin B., Baelz S., Monget J. M., Petit V., 1982. Utilisation de la thermographie IR pour l'estimation de l'évapotranspiration régionale. *Agronomie*, 2 (1), 7-16 et 2 (2), 113-118.

Seguin B., Lagouarde J. P., Kerr Y., 1986. Estimation of regional evaporation using midday surface temperature from satellite thermal IR data. In *Proc. ISLSCP Conference, Rome, Italy, 2-6 December 1985, ESA SP-248*, 339-344.

Seguin B., Assad E., Fréteau J. P., Lagouarde J. P., 1987. Water balance monitoring in sahelian regions with thermal IR and vegetation index data from meteorological satellites. *Proc. 20th Int. ERIM Symp., Nairobi, Kenya, 4-11 Dec. 1986* (sous presse).

Sheffield C., 1985. Selecting band combinations from multispectral data. *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 51 (6), 681-687.

Stoner E. R., Baumgardner M. F., 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 1161-1165.

Sutherland R. A., Langford J. L., Bartholic J. F., Bill R. G., 1979. A real time satellite data acquisition, analysis and display system : a practical application of the GOES network. *J. Appl. Meteor.*, 18, 353-360.

Taylor T. W., Ravett F. W., 1981. A meteorological driven maize stress indicator model. *AGRISTARS Technical Report EW-UI-04119, NASA Lyndon B. Johnson Space Center, Houston Texas*, 10 p. + appendices.

Tucker C. J., 1977a. Asymptotic nature of grass canopy spectral reflectance. *Appl. Optics*, 16 (5), 1151-1157.

Tucker C. J., 1977b. Spectral estimation of grass canopy variables. *Remote Sens. Environ.*, 6, 11-26.

Tucker C. J., 1978a. Post senescent grass canopy spectral reflectance. *Remote Sens. Environ.*, 7, 203-210.

Tucker C. J., 1978b. Are two photographic infrared sensors required ? *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 44 (3), 289-295.

Tucker C. J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 8, 127-150.

Tucker C. J., Elgin J. H., McMurthey J. E., 1979. Temporal spectral measurements of corn and soybean crops. *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 45 (5), 643-653.

Tucker C. J., Garratt M. W., 1977. Leaf optical system modeled as a stochastic process. *Appl. Optics*, 16, 635-642.

Tucker C. J., Miller L. D., 1977. Soil spectra contributions to grass canopy spectral reflectance. *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, 43 (6), 721-726.

Tucker C. J., Vanpraet C. L., Sharman M. J., Van Ittersum G., 1985. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel : 1980-1984. *Remote Sens. Environ.*, 17, 233-249.

Verhoef W., Bunnik N. J. J., 1981. Influence of crop geometry on multispectral reflectance determined by the use of canopy reflectance models. In *Proc. Int. Colloquium on spectral signatures of objects in remote sensing, Avignon, Sept. 08-11 1981. Les Colloques de l'I.N.R.A. N° 5*, 273-290.

Vidal A., Kerr Y., Lagouarde J. P., Seguin B., 1987. Télédétection et bilan hydrique : utilisation combinée d'un modèle agrométéorologique et des données de l'IR thermique du satellite NOAA-AVHRR. *Agric. and Forest Meteorol.*, 39, 155-175.

Vuathier J., 1979. Analyse de la structure du végétal en relation avec les variations de réflectance. *Mémoire ENSA de Rennes, Note interne I.N.R.A. Bioclimatologie, Montfavet (France)*, 81 p.

Wiegand C. L., Richardson A. J., 1982. Comparison among a new soil index and other 2 and 4 dimensional vegetation indices. *Technical Papers of the American Society of Photogrammetry, ACSM-ASP Convention, 14-20 March 1982, Denver, Colorado*, 210-227.

Wiegand C. L., Richardson A. J., 1984. Leaf area, light interception, and yield estimates from spectral components analysis. *Agron. J.*, 76, 543-548.