

ANALYSE DES INDICATRICES DE REFLEXION DE L'ORGE ET DU BLE :
POSSIBILITES DE LA STEREOADIOMETRIE

Guyot G., Malet P., Baret F. INRA Station de Bioclimatologie
Domaine Saint Paul 84140 Montfavet, France

SOMMAIRE

Les indicatrices de réflexion de différentes variétés de blé et d'orge ont été déterminées dans les quatre bandes de longueur d'onde des satellites Landsat au voisinage du midi solaire, dans deux plans verticaux : le plan parallèle aux rayons solaires et le plan perpendiculaire.

Les cultures étudiées ainsi que le sol nu possèdent des indicatrices de réflexion qui s'écartent nettement de la loi de Lambert. La forme des indicatrices de réflexion des cultures dépend de la bande spectrale considérée et évolue au cours du temps en fonction de leur phénologie.

Les données recueillies au cours de deux années de mesures permettent d'effectuer une première analyse des possibilités de discrimination des cultures et de leurs stades phénologiques grâce à la stéréoradiométrie.

Un certain nombre de travaux théoriques et expérimentaux (Brennan et Bandeen 1970, Egbert et Ulaby 1972, Suits 1972, Smith & al. 1973, Bunnik & Verhoef 1974, Bunnik 1978, Sievers 1977, Kadro & Fischer 1976, Kadro 1978) ont montré que les couverts végétaux ne pouvaient pas être assimilés à des surfaces diffusantes parfaites, répondant à la loi de Lambert. Leur radiance varie à un instant donné en fonction de l'angle sous lequel elles sont visées.

Les propriétés optiques d'un couvert végétal étant liées, entre autres à sa structure géométrique, nous avons commencé une expérimentation sur des céréales (blé et orge) qui donnent des couverts dont la structure et l'évolution biologique sont relativement simples.

Le but des études entreprises est de voir si des mesures radiométriques obliques sont plus sensibles aux changements de structure des couverts que les mesures verticales et si elles peuvent apporter des informations supplémentaires.

I. LA DETERMINATION DES INDICATRICES DE REFLEXION D'UNE SURFACE

Avant de présenter et de discuter les résultats expérimentaux, nous allons rapidement définir ce que nous entendons par indicatrices de réflexion et décrire sommairement le dispositif expérimental utilisé.

1.1 Les indicatrices de réflexion d'une surface

Le facteur de réflectance d'une surface $R(\theta, \phi, \lambda)$ varie en fonction de l'angle zénithal de visée θ , de l'azimut ϕ de la visée et de la longueur d'onde λ (Guyot 1980). Il peut être défini comme le rapport de l'énergie reçue par un détecteur, visant une surface donnée, dans un angle solide Ω_r , à l'énergie qui serait envoyée dans le même angle solide par une surface réfléchissante parfaitement blanche, répondant à la loi de Lambert et recevant la même irradiance.

$$R(\theta, \phi, \lambda) = \frac{\int_{\Omega_r} L_r(\theta, \phi, \lambda) \cos \theta d\Omega_r}{\int_{\Omega_r} L_L(\lambda) \cos \theta d\Omega_r}$$

$L_r(\theta, \phi, \lambda)$ radiance de la surface étudiée

$L_L(\lambda)$ radiance d'une surface répondant à la loi de Lambert. $L_L(\lambda)$ est constant quel que soit l'angle de visée.

Si les mesures du facteur de réflectance d'une surface homogène sont effectuées avec un radiomètre dont l'angle d'ouverture est Ω_r et si cet appareil est déplacé en suivant un cercle dont le centre est situé sur la surface étudiée (Figure 1), l'énergie captée est constante quel que soit θ si la surface répond à la loi de Lambert, car le terme $\int_{\Omega_r} \cos \theta d\Omega_r$ est constant.

Par ailleurs, si l'angle d'ouverture du radiomètre Ω_r est petit, la radiance $L_r(\theta, \phi, \lambda)$ de la surface visée variera peu à l'intérieur de celui-ci ; dans ces conditions

$$R(\theta, \phi, \lambda) = \frac{L_r(\theta, \phi, \lambda)}{L_L(\lambda)}$$

Les indicatrices de réflexion seront les courbes qui représenteront la variation relative du facteur de réflectance en fonction de l'angle de visée.

Pour tracer les indicatrices de réflexion des surfaces étudiées, nous avons rapporté le facteur de réflectance $R(\theta, \phi, \lambda)$ au facteur de réflectance mesuré verticalement $R(0, 0, \lambda)$. La normalisation du facteur de réflectance oblique par le facteur de réflectance mesuré selon la verticale permet de mieux apprécier et de comparer les variations relatives de celui-ci au cours du temps.

D'après la définition qui vient d'être donnée, l'indicatrice de réflexion d'une surface répondant à la loi de Lambert se représentera par un demi-cercle en coordonnées semi polaires.

1.2 Le dispositif expérimental utilisé

1.2.1 La parcelle expérimentale

Les mesures ont été effectuées sur le domaine expérimental de l'INRA à Avignon. La parcelle expérimentale est parfaitement horizontale et forme un rectangle de 65 x 20 m dont la longueur est orientée Est-Ouest. En 1978, elle a été divisée en 6 parcelles élémentaires comportant un blé d'hiver (Talent) avec 2 orientations différentes des lignes de semis (Est-Ouest et Nord-Sud), un blé de printemps (Chrismar) et trois orges de printemps (Aramir, Tosca et Athos). En plus, une parcelle de sol nu se trouvait à

l'extrémité du dispositif. En 1979, la parcelle expérimentale a été divisée en 5 parcelles élémentaires avec 2 blés d'hiver (Talent, Capitole), une orge (Alfa) et un blé dur (Montferrier).

1.2.2 L'appareillage de mesure

Les mesures ont été effectuées à l'aide de 2 radiomètres à 4 canaux correspondant à ceux de Landsat (Exotech 100 A). L'un des radiomètres visait la surface étudiée avec des objectifs de 15° d'ouverture, l'autre était tourné vers le ciel et mesurait l'irradiance avec des objectifs dont l'ouverture était de 2π Sr.

Le radiomètre visant la surface était monté à l'extrémité d'un bras de 2 m de long, pivotant dans un plan vertical. L'axe de rotation pouvait être placé au niveau de la surface supérieure de la culture grâce à des vérins. Ce dispositif permettait de faire des visées toujours centrées sur le même point.

Les radiomètres étaient reliés à une centrale d'acquisition de données qui enregistrerait les mesures sur une minicassette magnétique traitée ensuite par un ordinateur.

Les mesures ont été effectuées dans les 2 heures qui encadraient le midi solaire, dans deux plans verticaux, l'un parallèle ($\Phi = 0$), l'autre perpendiculaire ($\Phi = 90^\circ$) à l'azimut du soleil, de manière à obtenir des indicatrices présentant le maximum et le minimum de distorsion par rapport à la loi de Lambert.

II. LES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les données expérimentales recueillies ont permis de constater que non seulement les caractéristiques propres aux couverts végétaux étudiés agissaient sur la forme des indicatrices de réflexion mais encore des facteurs externes tels que l'azimut du plan de mesure par rapport à celui du soleil, la longueur d'onde considérée et la nébulosité (Guyot 1980). Avant d'analyser les résultats acquis au cours des 2 saisons de végétation, nous allons donc étudier tout d'abord l'influence de ces différents facteurs.

2.1 Influence des facteurs externes au couvert végétal sur la forme des indicatrices de réflexion

2.1.1 Effet de l'orientation par rapport au soleil

La figure 2 représente en coordonnées semi-polaires les indicatrices de réflexion obtenues le même jour sur la même parcelle mais dans 2 plans perpendiculaires ($\Phi = 0^\circ$ et $\Phi = 90^\circ$).

Lorsque le plan de mesure est perpendiculaire à l'azimut du soleil ($\Phi = 90^\circ$) les indicatrices obtenues sont symétriques par rapport au plan vertical ($\theta = 0$). Par contre, lorsque le soleil est dans le plan de mesure, elles présentent une très forte dissymétrie et la figure 2 met bien en évidence le phénomène de "hot spot" surtout sensible pour les canaux 4 et 5 correspondant au domaine visible. Une importante réflexion spéculaire est observée notamment dans le visible pour des angles zénithaux voisin de celui du soleil ($38^\circ 30'$ le 4 avril à midi).

Les mesures effectuées tout au long de 2 saisons de végétation ont permis de constater la constance de ces phénomènes.

2.1.2 Effet de la longueur d'onde

Comme le prévoient les travaux théoriques de Suits (1972) et de Bunnik (Bunnik, Verhoef 1974 ; Bunnik 1978) et comme le montre la figure 2, la forme des indicatrices de réflexion d'une culture dépend de la longueur d'onde.

En effet, de nombreux travaux (Gausman & al. 1973) ont montré que les propriétés optiques des végétaux étaient très différentes dans le visible et dans le proche infra-rouge. Dans le domaine visible, les plantes réfléchissent entre 5 et 15 % du rayonnement incident et ne transmettent que quelques pour cent, alors que dans le proche infra-rouge elles réfléchissent ou transmettent le rayonnement incident sans pratiquement l'absorber.

La figure 2 montre que lorsque les mesures sont effectuées dans le plan parallèle aux rayons solaires, il existe une forte réflexion spéculaire pour les angles zénithaux voisins de celui du soleil ($38^{\circ}30'$ le 4 avril à midi) dans le visible (canal 4 : 500-600 nm, canal 5 : 600-700 nm). Par contre, lorsque la visée se fait sous un angle s'écartant nettement de l'angle d'incidence des rayons solaires, le radiomètre a alors d'importantes zones d'ombre dans son champ de visée et la radiance mesurée est plus faible que celle qui est mesurée verticalement. Dans le proche infra-rouge (canal 6 : 700-800 nm, canal 7 : 800-1100 nm) l'énergie solaire est très peu absorbée par les organes végétaux, elle est ou réfléchiée, ou transmise. Les "zones d'ombre" du domaine visible n'existent pratiquement plus et l'on peut constater sur la figure 2 que la radiance d'un couvert végétal augmente lorsque l'angle zénithal θ s'accroît.

2.1.3 Effet de la nébulosité

Lorsque le ciel est couvert la diffusion du rayonnement solaire par l'atmosphère est fortement accrue ; aussi la distribution spatiale de l'énergie radiative reçue par une surface est fortement modifiée. Une étude effectuée par ailleurs (Guyot 1980) a montré que les valeurs du facteur de réflectance mesurées verticalement ($\theta = 0$) étaient relativement peu affectées par la nébulosité, alors que les valeurs obtenues pour des visées obliques étaient fortement accrues. C'est ce que montre la figure 3 qui correspond à des mesures effectuées à 3 jours d'intervalle avec un ciel clair et un ciel complètement couvert au même endroit, sensiblement à la même heure, sur une culture de blé qui n'avait pratiquement pas évolué entre les 2 dates. Cette figure montre que les valeurs du facteur de réflectance mesurées obliquement peuvent être plus que doublées en lumière diffuse, pour certains angles de visée.

2.1.4 Conditions d'expérience retenues

Pour effectuer des mesures comparables, nous avons, à la suite des remarques qui viennent d'être présentées, choisi de travailler uniquement avec un ciel parfaitement dégagé, aux alentours du midi solaire. La majorité des mesures a également été effectuée dans le plan vertical perpendiculaire à l'azimut du soleil de manière à être placé dans les conditions recommandées pour l'acquisition de données par des scanners multispectraux, car les distorsions par rapport à la loi de Lambert sont alors les plus faibles.

2.2 Les indicatrices de réflexion du sol nu

Les nombreuses mesures effectuées (Guyot & al. 1978) ont permis de constater

que contrairement à la végétation les indicatrices de réflexion obtenues ont pratiquement le même tracé quelle que soit la longueur d'onde dans le visible et dans le proche infra-rouge. Cela est dû à ce que les propriétés optiques du sol dans ces deux domaines spectraux, sont assez semblables.

La figure 4 montre que pour un sol, le facteur de réflectance diminue lorsque l'angle zénithal θ augmente. Pour les visées rasantes, nous avons cependant pu noter dans certaines conditions un accroissement rapide du facteur de réflectance.

Les mesures effectuées sur l'ensemble d'une saison de végétation en 1979 ont permis de constater que la forme des indicatrices de réflexion d'un sol nu évoluait faiblement en fonction de l'évolution de son état de surface. Elles sont également peu différentes d'une année à l'autre comme le montre la figure 4.

2.3 Les indicatrices de réflexion d'un couvert de céréales

2.3.1 Evolution du facteur de réflectance oblique d'un couvert de blé en fonction du temps

L'interaction de la lumière avec un couvert végétal est fonction de la structure géométrique de celui-ci. Une série de mesures effectuées sur les couverts étudiés (Gurnade & al. 1978, Baret & Huet 1979) a permis de montrer que leur structure géométrique évoluait en fonction de leur phénologie. Cette évolution de structure se traduit par une évolution parallèle des facteurs de réflectance spectraux mesurés verticalement. Le but des études d'indicatrices de réflexion était de rechercher si des visées obliques pouvaient apporter des informations complémentaires sur l'évolution des couverts végétaux.

La campagne de mesure de 1979 qui a été plus approfondie sur le plan expérimental que celle de l'année précédente, a malheureusement été effectuée au cours d'une année exceptionnellement sèche et la structure géométrique des couverts de blé a été fortement affectée. Les données de 1978 et 1979 ne sont donc pas tout à fait comparables. Cependant les figures 5 et 6 représentent l'évolution de la valeur relative des facteurs de réflectance dans le visible et le proche infra-rouge en fonction du temps et pour différents angles de visée.

Sur l'échelle des temps, nous avons reporté les principaux stades phénologiques observés G : gonflement, E : épiaison, F : floraison, dpe et fpe (début et fin du palier d'eau, période essentielle de la vie d'une céréale au cours de laquelle s'effectuent les migrations des réserves de la tige et des feuilles vers le grain).

Les figures 5 et 6 montrent que le facteur de réflectance oblique du blé est presque toujours supérieur au facteur de réflectance vertical dans le proche infra-rouge et presque toujours inférieur dans le visible. La figure 5 montre par ailleurs que l'on peut en combinant les visées obliques et les visées verticales assez bien mettre en évidence la phase d'épiaison, la floraison et le début et la fin de la phase de maturation. La figure 6 met les mêmes phénomènes en évidence mais de façon moins nette.

Ces figures montrent également que l'écart à la Loi de Lambert est d'autant plus grand que la valeur de θ est plus élevée. On peut remarquer aussi qu'à certaines phases particulières (épiaison et fin de la période de maturation) le couvert de blé réfléchit la lumière comme une surface répondant à la loi

de Lambert.

2.3.2 Evolution comparée du facteur de réflectance oblique de différents couverts de céréales en fonction du temps

Les mesures effectuées en 1978 avaient permis de constater que les couverts de blé avaient des indicatrices de réflexion de formes assez semblables et qu'elles se distinguaient nettement de celles des couverts d'orge (Guyot & al. 1978). Les mesures effectuées en 1979 ont confirmé ce résultat.

Les figures 7 et 8 représentent l'évolution au cours du temps des valeurs relatives du facteur de réflectance oblique mesuré pour $\theta = 45^\circ$ pour les canaux 5 et 7 de Landsat et pour différentes cultures, ainsi que pour le sol nu. La figure 7 montre que dans la bande spectrale correspondant au canal 5 de Landsat, une culture se distingue nettement : l'orge alpha. Les différentes variétés de blé et le sol nu sont confondus. Pour l'orge, l'épiaison vers le 10 mai apparaît nettement, la réponse du couvert se rapproche de la loi de Lambert. Mais à partir du 20 mai, l'orge apparaît alors nettement différent du blé durant sa phase de maturation.

La figure 8 montre que par contre, les visées obliques dans la bande 7 de Landsat ne fournissent pas d'informations supplémentaires sur les cultures, par rapport aux visées verticales. Par contre, le sol nu se sépare nettement des surfaces cultivées.

CONCLUSION

Les résultats expérimentaux qui viennent d'être présentés montrent tout d'abord que l'on ne peut pas supposer que les surfaces végétales répondent à la loi de Lambert, pour interpréter les données des scanners aéroportés. Il est donc nécessaire d'introduire des corrections qui dépendront de l'angle de visée et du type de la couverture végétale de la zone survolée. Les travaux entrepris actuellement par différentes équipes de recherche devraient apporter les données nécessaires dans un avenir proche.

Par ailleurs, cette étude montre que la stéréoradiométrie peut être un moyen d'étude intéressant pour la surveillance et l'inventaire des cultures. En effet, la combinaison de visées de la même surface sous 2 angles différents semble apporter des informations qui pourraient n'être fournies que par des études chronoséquentielles. De nombreuses recherches sont encore nécessaires pour bien analyser les phénomènes mis en évidence, mais cette orientation des études de télédétection semble très prometteuse.

SUMMARY

The reflexion indicatrix of different wheat and barley varieties have been determined for the 4 Landsat spectral bands, near solar noon and in 2 vertical plans : the plan parallel to the solar beams and the plan perpendicular.

The reflexion indicatrix of the studied crops and of bare soil do not correspond to the Lambert's law. The shape of these indicatrix vary with the wavelength and evolves with the time as a function of their phenology.

An analysis performed on the datas obtained during 2 growing seasons gives

some informations on the capability of the stereoradiometry to discriminate the crops and their phenological stages.

BIBLIOGRAPHIE

- 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 stage INRA Station de Bioclimatologie Avignon-Montfavet, 115 p.
- Bonhomme R., Guyot G., Riom J., 1978. Relations existant entre la réflectance d'un couvert végétal et sa structure, la hauteur du soleil et l'angle de visée. Perspectives de modélisation. In Earth observation from space and management of planetary resources. Proc. Int. Conf. Toulouse E.S.A. SP. 134, 319-325
- Breece H.T., Holmes R.A., 1971. Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybean and corn leaves in vivo. Appl. Opt. 10(1), 119-127
- Brennan B., Bandeen W.R., 1970. Anisotropic reflectance characteristics of natural earth surfaces. Appl. Opt. 9(2) 405-412
- Bunnik N.J.J., Verhoef W., 1974. The spectral directional reflectance of agricultural crops. Niwars Publication n° 23, 123 p.
- Bunnik N.J.J., 1978. The multispectral reflectance of short wave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. Meded. Landbouwhogeschool Wageningen 78-1. 176 p.
- Egbert D.D., Ulaby F.T., 1972. Effect of angles on reflectivity. Photogram. Engng. 38(6), 556-564
- Gausman H.W., Allen W.A., Wiegand C.L., Escobar D.E., Rodriguez R.R., Richardson A.J., 1973. The leaf mesophyll of twenty crops, their light spectra and optical and geometrical parameters. USDA Tech. Bull. 1465, 59 p.
- Gurnade J.C., Bonhomme R., Guyot G., Malet P., 1978. Variation de la structure d'un couvert végétal en fonction de son état physiologique : utilisation possible de la télédétection. Proc. Int. Symp. on Remote Sensing for observation and inventory of earth resources and the Endangered environment. Freiburg. Int. Archiv of Photogram. 22 (7), 1597-1810
- Guyot G., Jacquin C., Malet P., Thouy G., 1978. Evolution des indicatrices de réflexion de cultures de céréales en fonction de leurs stades phénologiques. Proc. Int. Symp. on Remote Sensing for observation and inventory of earth resources and the Endangered environment. Freiburg. Int. Archiv of Photogram. 22(7), 705-718
- Guyot G., 1980. Analysis of factors acting on the variability of spectral signatures of natural surfaces. Paper presented to the ISP Congress. Hamburg Commission VII, W.G. 7
- Kadro A., Fischer W., 1976. Neue Ergebnisse von Reflexions. Messungen in situ an Vegetationsbeständen. Proc. XVI IUFRO Congress Oslo 23-35

- Kadro A., 1978. Spektrale Reflexionseigenschaften von Vegetations Beständen während der Wachstumsperiode. Proc. Int. Symp. on Remote Sensing for observation and inventory of Earth resources and the endangered environment. Freiburg. Int. Archiv. of Photogram., 22(7), 761-770
- Kriebel K.T., 1978. Terminology of reflection. Proc. Int. Symp. I.S.P. IUFRO Freiburg in Br., 2-8 July 1978, 3 p.
- Sievers J., 1977. Density corrections and directional reflectances of terrain objects from black and white aerial photos. Photogrammetria 33, 95-112
- Smith J.A., Oliver R.E., Kilpela O.E., 1973. Effects of changing canopy directional reflectance on feature selection. In Remote Sensing earth resources. II. Select. Pap. 2nd Resourc. Conf. Tublahaoma Tenn. Tublahaoma F. Shakrokhi, 629-641
- Suits G.H., 1972. The calculation of the directional reflectance of vegetative canopy. Remote Sens. Environ., 2, 117-125

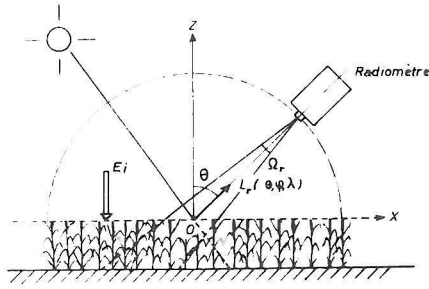


Figure 1. Représentation schématique du dispositif utilisé pour la détermination des indicatrices de réflexion (E_i irradiance à la surface supérieure du couvert)

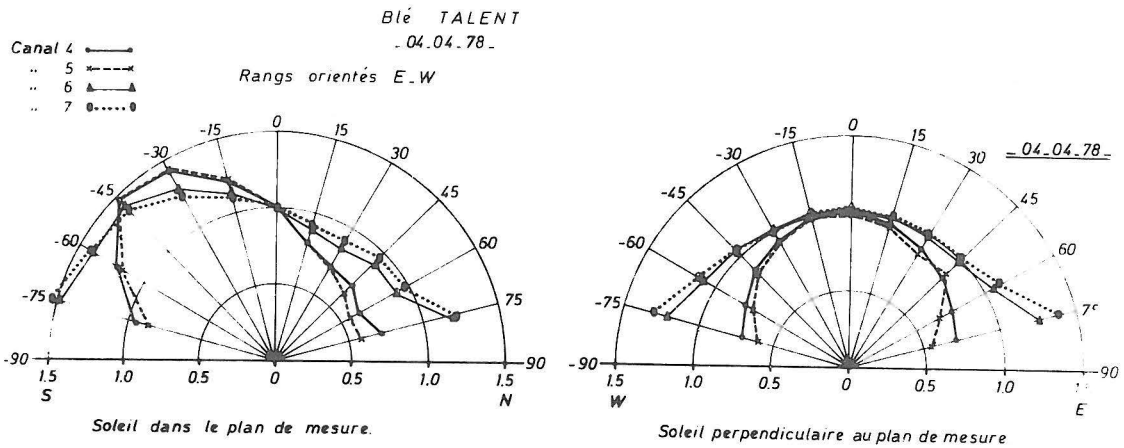


Figure 2. Indicatrices de réflexion d'un couvert de blé dans 2 plans perpendiculaires

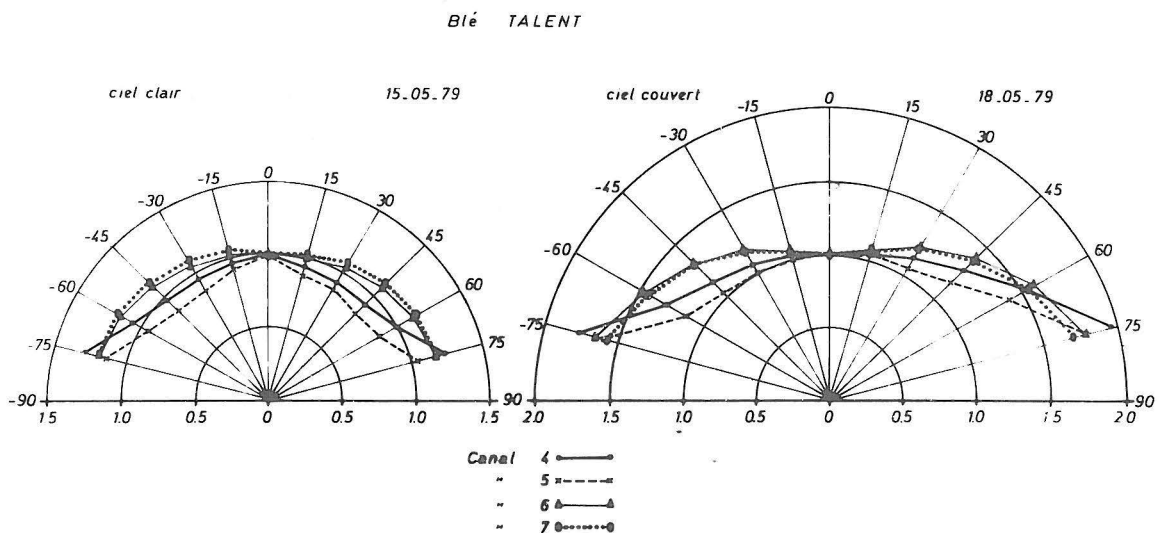


Figure 3. Indicatrices de réflexion d'un même couvert de blé, déterminées au même endroit mais avec deux états du ciel différents

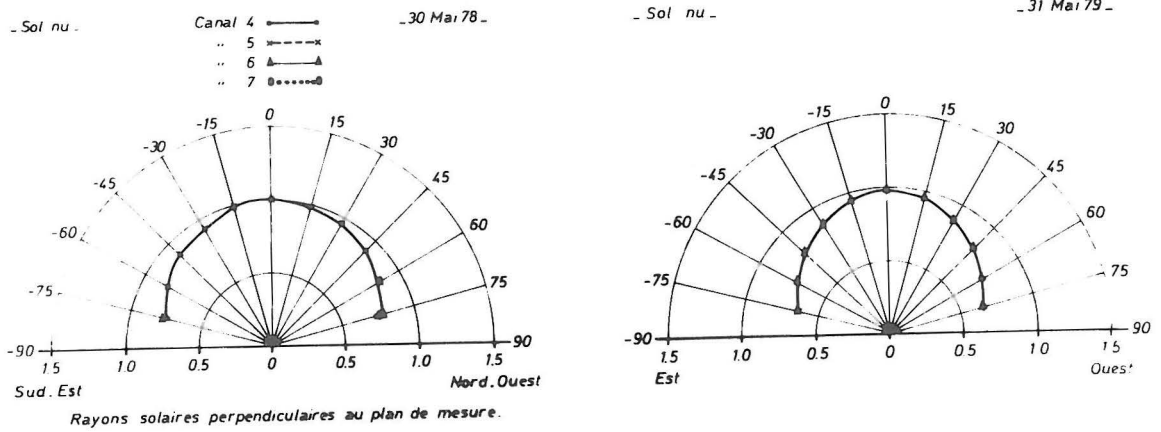
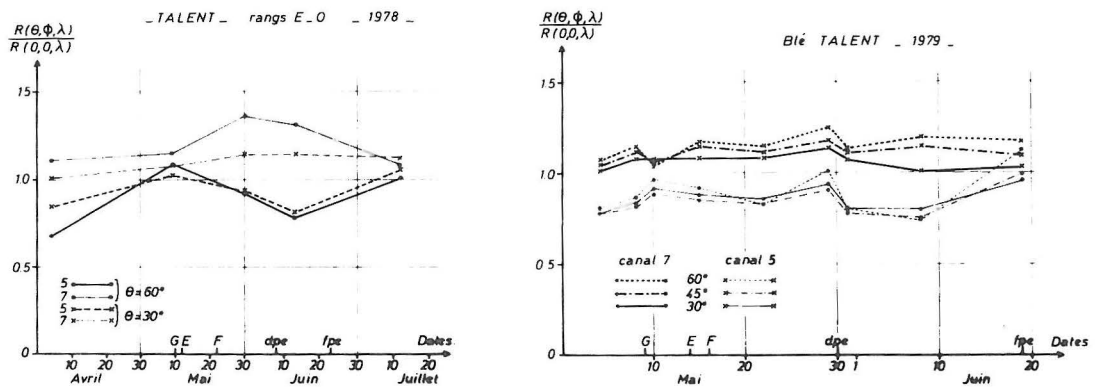
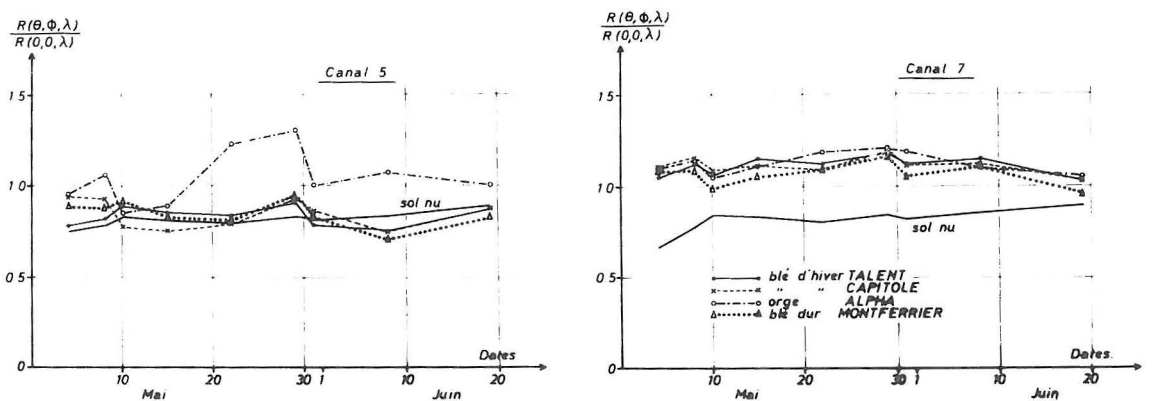


Figure 4. Indicatrices de réflexion d'un même sol nu obtenues à une année d'intervalle



Figures 5 et 6. Evolution relative du facteur de réflectance oblique par rapport au facteur de réflectance vertical d'un couvert de blé en fonction du temps



Figures 7 et 8. Evolution relative au facteur de réflectance oblique ($\theta = 45^\circ$) par rapport au facteur de réflectance vertical en fonction du temps en 1979, pour différents couverts végétaux et pour le sol nu pour le canal 5 et pour le canal 7