

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PARIS VII

Spécialité:

METHODES PHYSIQUES EN TELEDETECTION

présentée par:

Xingfa GU

**ETALONNAGE ET INTERCOMPARAISON
DES DONNEES SATELLITAIRES
EN UTILISANT LE SITE TEST
DE LA CRAU**

(Appliqué aux images
SPOT1-HRV, LANDSAT5-TM, NOAA11-AVHRR)

BIBLIOTHEQUE

30 AOUT 1991

Soutenue le 17 juin 1991 devant le Jury composé de :

| | |
|----------------|---------------------------------|
| M. C. KLAPISZ | Président |
| M. M. HERMAN | Rapporteur |
| M. M. LEROY | Rapporteur |
| M. P.N. SLATER | Examineur |
| M. G. GUYOT | Directeur de Thèse et Examineur |
| M. F. BARET | Examineur |

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
I. N. R. A.
Station de Bioclimatologie
B.P. 91 - Domaine Saint-Paul
84143 MONTFAVET CEDEX
FRANCE

AH TH 21

A mes parents,

A ma femme,

A mon fils.

BIBLIOTHEQUE

REMERCIEMENTS

Je tiens, tout d'abord, à remercier Monsieur **G. Guyot**, Directeur de Recherche à l'INRA (station de bioclimatologie) de Montfavet, qui a dirigé et suivi mon travail de thèse avec une bienveillance constante. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance pour les soutiens très précieux et les encouragements qu'il m'a prodigués tout au long de ces trois années de thèse.

Je remercie Monsieur **C. Klapisz**, Professeur de l'Université Paris VII, qui me fait l'honneur de présider ce jury: il a suivi mon travail depuis le DEA avec une gentillesse inoubliable.

Je tiens à remercier, Monsieur **M. Herman**, Professeur, Directeur du Laboratoire d'Optiques Atmosphériques (LOA) de l'Université des Sciences et Techniques de Lille, qui m'a réservé un accueil chaleureux pendant mon stage au LOA et a bien voulu être rapporteur de ma thèse.

J'adresse mes remerciements à Monsieur **M. Leroy**, Directeur du Département de Qualité d'Image du CNES, qui a accepté d'être rapporteur de ma thèse et m'a donné beaucoup de conseils concernant la caractérisation du site d'étalonnage.

M. P.N. Slater, Professeur de l'Université d'Arizona (USA) a bien voulu accepter de faire ce long déplacement et participer au jury de ma thèse. Qu'il soit assuré de mes plus sincères remerciements.

Je remercie également **M. F. Baret**, Chargé de Recherche à l'INRA (station de bioclimatologie) de Montfavet, qui a bien voulu sacrifier de son temps à la lecture de ma thèse et juger ce travail.

J'ai beaucoup apprécié l'aide de **M. M. Verbrugge**, Ingénieur d'études à l'INRA (station de bioclimatologie) à Montfavet, tout au long de la thèse. Sans lui, je n'aurais pas pu accomplir les campagnes de mesures que nous avons faites. Je l'en remercie profondément.

Mes remerciements vont aussi à **M. B. Seguin**, Directeur de Recherche à l'INRA (station de bioclimatologie) à Montfavet et responsable du groupe de télédétection, qui fut mon premier contact avec l'INRA et me donna une multitude de conseils tout au long de l'avancement de mes travaux. Sa gentillesse m'a permis de réaliser ma thèse dans de bonnes conditions.

J'exprime aussi mes remerciements à **Mme M. Guerif** et à **M. R. Delecolle**, de la station de bioclimatologie de l'INRA, pour l'aide précieuse qu'ils m'ont accordée.

Je ne peux pas oublier **M. A. Baille**, Directeur de la station de bioclimatologie de l'INRA à Montfavet, **M. P.G. Schoch**, Président du Centre de Recherches de l'INRA à Avignon, et enfin les membres du secrétariat de la station de bioclimatologie **Mme O. Lusa**, **Mme J.Casteau** et **Mme R. Olivier**. Que toutes ces personnes trouve ici mes sincères remerciements pour avoir accepté de m'aider dans les démarches administratives que j'ai du accomplir.

Je reste très reconnaissant à toutes les personnes de la station de bioclimatologie et plus particulièrement à:

Mme J. Saumade pour la création de toutes les illustrations de la thèse,

M. J.F. Hanocq pour son rôle de pilote lors du survol de la Crau et pour son aide pendant les sessions de mesures au sol,

M. C. Sarouy pour le montage mécanique des supports de radiomètre,

Mme E. Larue, **MM. J.P. Guinot** et **P. Clastre** pour leur assistance en informatique.

Enfin, je remercie **MM R. Santer** et **J.L. Deuzé**, du LOA, pour leur aide précieuse lors de mon stage dans les locaux du LOA.

RESUME

L'étalonnage absolu des capteurs satellitaires et la mise au point de méthodes d'intercomparaison de leurs données, sont indispensables pour les analyses qualitatives des images. La bibliographie montre que ces deux problèmes ont été peu abordés. Par ailleurs, les corrections actuelles des effets instrumentaux ne tiennent pas compte de la fonction de transfert de modulation (F.T.M.) qui modifie les données numériques des images. Ces trois problèmes sont abordés dans cette thèse.

Afin d'avoir une bonne précision sur l'étalonnage et l'inter-comparaison des données satellitaires, nous avons défini un site test (la Crau sèche, Sud-Est de la France). Notre choix a été validé à partir de mesures radiométriques au sol et aéroportées et d'images SPOT. Les mesures au sol nous ont amenées à mettre au point une méthodologie de mesure de la réflectance bidirectionnelle qui minimise les erreurs. Nous avons également validé expérimentalement le modèle de transfert atmosphérique 5S, permettant de simuler le signal au niveau du satellite. Le signal simulé à partir de mesures au sol (réflectance et caractéristiques de l'atmosphère) et les données numériques des images du site nous ont permis de déterminer les coefficients d'étalonnage avec une incertitude de 3%.

L'inter-étalonnage des capteurs SPOT-HRV, LANDSAT-TM, NOAA-AVHRR, s'appuie sur des images acquises le même jour sur le site test. Les méthodologies développées et validées fournissent des résultats stables et comparables à ceux obtenus par d'autres équipes dans le monde. Par ailleurs, les différents facteurs affectant l'intercomparaison des images acquises par des capteurs différents, sont discutés et leur poids relatif est analysé. Enfin, les effets de la F.T.M. sur les images de SPOT-HRV ont été mis en évidence expérimentalement et une méthode de correction est proposée et validée.

Mots clés : satellite, SPOT-HRV, LANDSAT-TM, NOAA-AVHRR, étalonnage, inter-étalonnage, radiométrie, fonction de transfert de modulation.

ABSTRACT

The absolute calibration of satellite sensors and the development of intercomparison methods, are necessary for quantitative image analysis. A review of the literature shows that these two problems are little addressed. Moreover the corrections of instrumental effects that are usually done, do not take into account the influence of the modulation transfer function (M.T.F.) which introduces large modifications of image digital counts. These three problems are discussed in this thesis.

In order to have good accuracy for satellite calibration and intercalibration, we have selected and validated a test site (La Crau sèche, south-east of France) using ground level and airborne radiometric measurements and SPOT images. For the ground level measurements we have developed a methodology minimizing the errors on bidirectional reflectance. We have also validated experimentally the 5S atmospheric code, used for the simulation of the signal at the satellite level. The calibration coefficients of the satellite were determined with less than 3% error with data simulated from ground level measurements (for reflectance and atmospheric characteristics) and digital counts of the test site images.

The intercalibration of the sensors SPOT-HRV, LANDSAT-TM and NOAA-AVHRR is based on data obtained on the same day from the test site. The methodologies developed and validated give stable results comparable to those obtained by other research teams in the world. Moreover the different factors affecting the intercomparison of images corresponding to different sensors are discussed and their relative weight is analysed. Finally, the M.T.F. effects on SPOT-HRV images are experimentally established and a correction method is proposed and validated.

Key words: Satellite, SPOT-HRV, LANDSAT-TM, NOAA-AVHRR, Calibration, intercalibration, radiometry, modulation transfer function.

PLAN DE LA THESE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION GENERALE | 1 |
| PREMIERE PARTIE | |
| PROBLEMES POSES PAR L'ETALONNAGE DES SATELLITES ET L'INTERCOMPARAISON DE LEURS DONNEES | 5 |
| I - POSITION DU PROBLEME | 7 |
| <i>I-1 Les facteurs qui affectent le signal satellitaire et les traitements nécessaires pour déduire la réflectance au sol d'une surface, à partir de la valeur numérique de l'image</i> | <i>7</i> |
| <i>I-2 Les méthodes utilisées pour l'étalonnage des satellites</i> | <i>16</i> |
| <i>I-3 Situation de l'étude relative à l'intercomparaison des données satellitaires</i> | <i>18</i> |
| <i>I-4 Conclusion du paragraphe</i> | <i>21</i> |
| II - EFFETS ATMOSPHERIQUES SUR LES IMAGES SATELLITAIRES | 22 |
| <i>II-1 Interaction entre le rayonnement solaire et l'atmosphère dans les domaines du visible et du proche infrarouge</i> | <i>22</i> |
| <i>II-2 Calcul du signal mesuré par satellite - le modèle de "Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire" (5S)</i> | <i>27</i> |
| <i>II-3 Détermination des paramètres atmosphériques d'entrée du modèle transfert radiatif</i> | <i>35</i> |
| <i>II-4 Conclusion du paragraphe</i> | <i>39</i> |

| | |
|---|-----------|
| III - LA CARACTERISATION DE LA REFLECTANCE AU SOL | 40 |
| <i>III-1 Les mesures radiométriques au sol</i> | 40 |
| <i>III-2 Etalonnage des mesures radiométriques avec un radiomètre de terrain multibande</i> | 41 |
| <i>III-3 Les facteurs qui perturbent les mesures au sol</i> | 44 |
| IV CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE | 48 |

DEUXIEME PARTIE

| | |
|--|-----------|
| CARACTERISATION DES PROPRIETES OPTIQUES DU SITE D'ETALONNAGE DES SATELLITES - LA CRAU | 51 |
|--|-----------|

| | |
|---------------------|-----------|
| INTRODUCTION | 53 |
|---------------------|-----------|

| | |
|---|-----------|
| I - ETALONNAGE DES MESURES DE LA REFLECTANCE | 53 |
|---|-----------|

| | |
|--|----|
| <i>I-1 Réflectance bidirectionnelle des panneaux</i> | 53 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| <i>I-2 Influence de l'éclairement diffus, nouveau modèle pour calculer la réflectance d'un panneau</i> | 61 |
|--|----|

| | |
|-----------------------|----|
| <i>I-3 Validation</i> | 66 |
|-----------------------|----|

| | |
|---|-----------|
| II - CARACTERISATION DES PROPRIETES OPTIQUES DU SITE | 71 |
|---|-----------|

| | |
|------------------------------------|----|
| <i>II-1 Les mesures effectuées</i> | 71 |
|------------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| <i>II-2 Choix de la zone de l'étalonnage et analyse de la variabilité spatiale du site</i> | 81 |
|--|----|

(Article 1 : "Analyse de la variabilité spatiale d'un site-test, Exemple de la Crau (France)" (publié dans Photo-Interprétation))

| | |
|---|-----|
| <i>II-3 Variabilité spectrale de la réflectance du site</i> | 111 |
| <i>II-4 Variabilité angulaire de la réflectance du site</i> | 112 |
| <i>II-5 Variabilité temporelle de la réflectance du site</i> | 125 |
| III - EVALUATION DES ERREURS DE MESURE DE LA REFLECTANCE SUR LA CRAU | 131 |
| (Article 2 : "Evaluation of measurement errors on the reflectance of "La Crau", the French SPOT calibration area" (accepté par Int. J. of Remote Sensing)) | |

TROISIEME PARTIE

| | |
|---|-----|
| ETALONNAGE ET INTER-COMPARAISON DES IMAGES SATELLITAIRES DANS LES BANDES HOMOLOGUES DU CAPTEUR HRV | 155 |
| INTRODUCTION | 157 |
| I - VALIDATION EXPERIMENTALE DU MODELE 5S ET D'UNE METHODE DE CORRECTION DE L'EFFET DE LA FTM SUR L'IMAGE SPOT1-HRV | 159 |
| (Article 3 : "Utilisation de l'opération "ART*SPOT" pour tester le modèle 5S et la F.T.M. du satellite SPOT", (publié dans Cinquième Coll. Int. Mesures Physiques et Signatures en Télédétection, 14-18 Jan. 1991, Courchevel (France) Ed ESA Publ. Div.)) | |
| | 161 |
| (Article 4 : "Correction de la FTM sur les images de SPOT", (accepté par Photo-Interprétation)) | |
| | 172 |
| II - ETALONNAGE DU CAPTEUR HRV DE SPOT1 | 187 |
| (Article 5 : "SPOT calibration on the test site "La Crau" (France)", (soumis à Remote Sensing of Environnement)) | |

| | |
|---|----------------|
| III - INTER-ETALONNAGE DES INSTRUMENTS SATELLITAIRES HRV, TM ET AVHRR | 211 |
| (Article 6 : "Inter-étalonnage de SPOT1-HRV, LANDSAT5-TM, et NOAA11- AVHRR dans les domaines du visible et du proche infrarouge", (publié dans Cinquième Coll. Int. Mesures Physiques et Signatures en Télédétection, 14-18 Jan. 1991, Courchevel (France) Ed ESA Publ. Div.)) | |
| IV - MISE EN EVIDENCE DES FACTEURS PERTURBATEURS SUR L'INTER-COMPARAISON DES DONNEES SATELLITAIRES | 224 |
| <i>IV-1 Les facteurs affectant l'intercomparaison des données satellitaires</i> | <i>224</i> |
| <i>IV-2 La relation entre les valeurs numériques des images obtenues par deux capteurs</i> | <i>224</i> |
| <i>IV-3 Phénomène de dispersion sur la relation entre les valeurs numériques des images de deux capteurs</i> | <i>227</i> |
| <i>IV-4 Effet spectral sur l'inter-comparaison des images</i> | <i>227</i> |
| <i>IV-5 Effet de l'angle de visée et effet temporel sur l'inter-comparaison des images</i> | <i>232</i> |
| <i>IV-6 Les effets combinés</i> | <i>235</i> |
| V - CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE | 238 |
| CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES | 240 |
| LISTE DES PUBLICATIONS ET DES PRIX OBTENUS | 243 |
| BIBLIOGRAPHIE | 249 |

INTRODUCTION GENERALE

Depuis le premier lancement du satellite TIROS-1 en 1960 qui acquit la première génération d'images de la terre depuis l'espace, un grand nombre de satellites météorologiques et d'observation de la Terre ont été mis en orbite ; les images satellitaires sont maintenant largement diffusées et utilisées pour les besoins météorologiques, géologiques, agronomiques, hydrologiques, urbains, etc... Dans le domaine du visible et du proche infra-rouge, beaucoup de progrès ont été faits depuis ces 20 dernières années, et parallèlement de nombreux problèmes se posent. L'un des problèmes posés le plus récemment, et pour lequel des solutions sont recherchées actuellement, est l'étalonnage des données satellitaires qui permet de relier les valeurs numériques des images aux flux de rayonnement réfléchis par le système terre-atmosphère correspondant, et l'intercomparaison qui permet de comparer les images provenant de différents instruments.

L'étalonnage et l'inter-comparaison des données satellitaires présentent une grande importance dans nombre de domaines :

a: Pour l'étude du bilan énergétique du système terre-atmosphère, on doit quantifier en absolu l'énergie sortant de ce système : la connaissance précise des coefficients d'étalonnage des satellites est indispensable pour estimer ces énergies à partir des images qui sont acquises;

b: On a souvent besoin de connaître la réflectance apparente de surface au niveau des satellites. Elle est nécessaire pour estimer la réflectance au sol de la cible visée en utilisant un modèle inverse du transfert radiatif pour décrire l'atmosphère. Elle permet également d'évaluer les effets atmosphériques si elle correspond à une surface dont la réflectance du sol est bien connue ou nulle comme celle de la mer, dans la bande du proche infrarouge. Cela ne peut se réaliser que si on dispose des coefficients d'étalonnage absolu du satellite utilisé;

c: Les images multi-temporelles apportent une information sur l'évolution du type et de l'état des surfaces. L'utilisation de ces images nécessite d'éliminer non seulement les effets de la variation de l'illumination, de l'état de l'atmosphère, mais également ceux qui sont introduits par la variation de la réponse radiométrique de l'instrument embarqué à bord d'un satellite au cours du temps (de quelques mois à plusieurs années). Dans ce cas là, on doit également étalonner le satellite avec une bonne précision temporelle;

d: Nombre de satellites en orbite offrent la possibilité d'utiliser des images provenant de différents systèmes pour augmenter la répétitivité temporelle des données acquises sur

une zone ou obtenir des visées sous des angles différents. Sans connaître les coefficients d'inter-étalonnage des systèmes satellitaires utilisés, il sera très difficile d'obtenir de bons résultats. De plus, les différences de réponse spectrale et de résolution spatiale, au moment de passage de ces satellites créent également des problèmes au niveau de l'interprétation des images.

L'étalonnage et l'inter-comparaison des données satellitaires ont fait l'objet de nombreuses études. Différentes méthodes ont été essayées : étalonnage des instruments au laboratoire avant le vol ; utilisation d'une lampe standard embarquée dans le satellite; visée du soleil ou de la lune; visée d'une cible terrestre, etc... Les coefficients d'étalonnage établis avant le vol changent une fois que le satellite est mis en orbite; la luminance de la lampe interne du satellite se dégrade temporellement; la méthode de visée du soleil ou de la lune pose des problèmes liés à la différence des trajets optiques comparativement à la lumière provenant de la terre..., et c'est finalement la méthode du site test avec des mesures de vérité terrain qui est souvent considérée comme la plus efficace pour obtenir une bonne précision absolue pour l'étalonnage aussi bien que pour l'inter-étalonnage et l'inter-comparaison des données satellitaires.

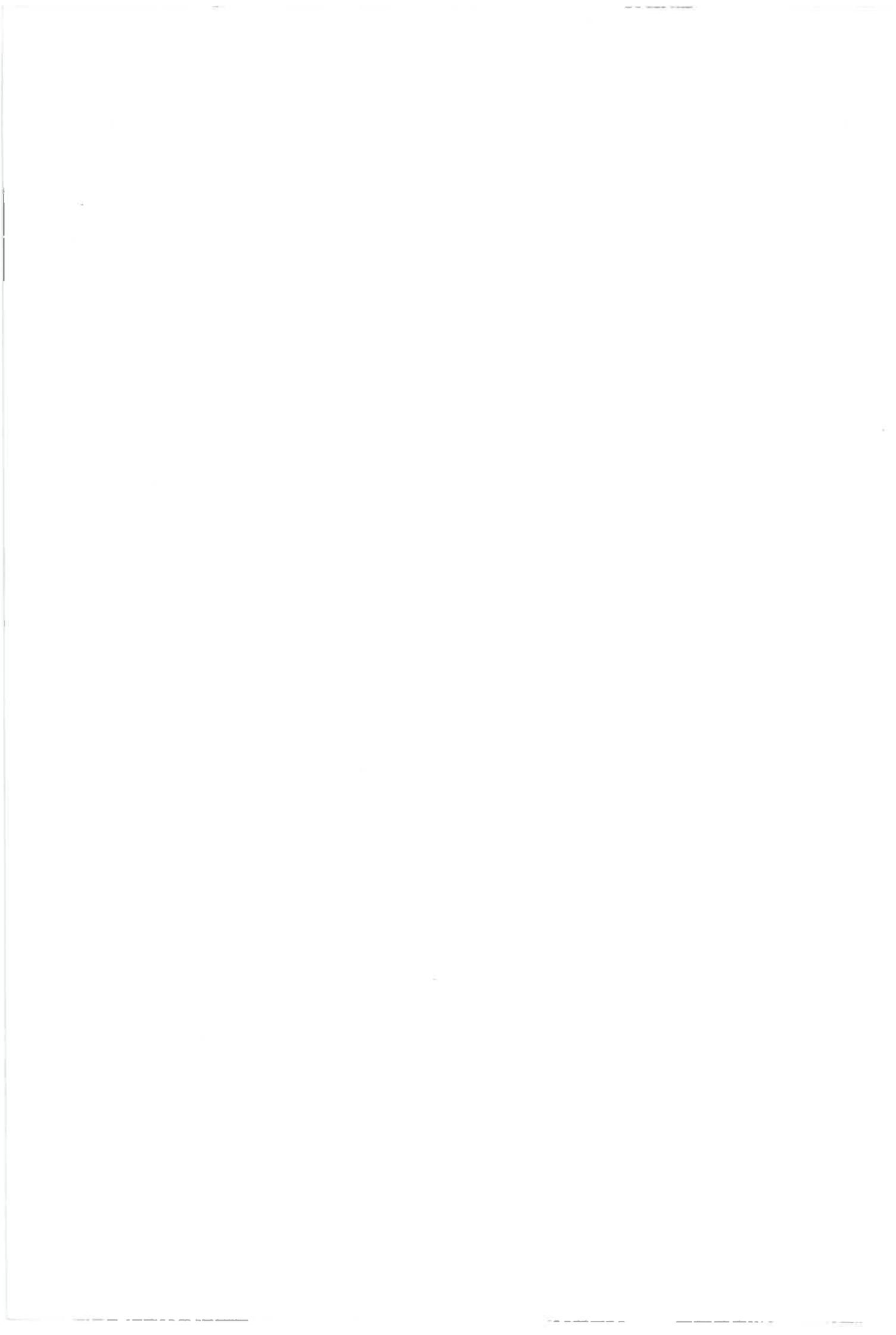
Cependant, ces mesures étant très complexes et délicates, un seul site test, White Sands (Nouveau Mexique), existe actuellement pour l'étalonnage opérationnel des satellites plus particulièrement du Landsat-TM, par l'équipe de P. N. Slater. Il semble donc souhaitable d'avoir un autre site test d'étalonnage pour compléter ce qui est fait à White Sands, surtout en tenant compte des besoins d'étalonnage réguliers de la série des satellites SPOT. C'est pour cela, que le CNES a demandé à l'INRA de caractériser un site potentiel pour l'étalonnage de satellites - la Crau. Grâce aux résultats favorables obtenus sur ce site, des essais préliminaires d'étalonnage de SPOT ont été réalisés par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) de l'Université des Sciences et Techniques de Lille et par la Station de Bioclimatologie de l'INRA d'Avignon. Parallèlement, un programme orienté vers l'inter-étalonnage des données satellitaires a été mis en place par l'INRA en utilisant ce site préparé. C'est dans ce cadre, que les travaux de thèse se sont déroulés.

La méthode du site test s'appuie sur la connaissance de la réflectance du sol, sur la simulation des signaux au niveau du satellite en tenant compte des perturbations introduites par l'atmosphère et sur la connaissance des perturbations radiométriques au niveau des images. C'est pour cela, que nous avons présenté une analyse bibliographique en 3 points correspondant à ces 3 problèmes dans le premier chapitre. Celui-ci rappelle les bases nécessaires et les principaux résultats existants qui permettent, par la suite, de mettre en évidence l'originalité de ce travail de thèse et d'interpréter les résultats obtenus.

Le deuxième chapitre est consacré aux mesures au sol. Il présente la procédure développée pour l'étalonnage des radiomètres, l'ensemble des méthodes mises au point pour caractériser le site test de la Crau, les propriétés optiques du site, et la méthode proposée pour la mesure de la réflectance avec une haute précision, ainsi qu'un bilan des erreurs.

Le chapitre 3 présente la méthodologie utilisée pour valider expérimentalement le modèle de transfert radiatif "5S" et une méthode de correction de l'effet de la Fonction du Transfert de Modulation (FTM), les résultats de l'étalonnage des capteurs HRV, TM et AVHRR dans les bandes homologues de celles de HRV, et les résultats de l'inter-étalonnage des satellites et de l'inter-comparaison de leurs données.

Enfin une conclusion générale fait une analyse critique des résultats obtenus et montre les acquis et les perspectives offertes par ce travail.



PREMIERE PARTIE

**PROBLEMES POSES PAR L'ETALONNAGE
DES SATELLITES ET
L'INTERCOMPARAISON DE LEURS DONNEES**

I - POSITION DU PROBLEME

I-1 Les facteurs qui affectent le signal satellitaire et les traitements nécessaires pour déduire la réflectance au sol d'une surface, à partir de la valeur numérique de l'image

Le signal provenant d'une surface terrestre et capté par un satellite, est enregistré sous forme de valeurs numériques. Mais la relation entre une valeur numérique sur une image et la réflectance correspondante au sol, est perturbée par nombre de facteurs. Il est ainsi nécessaire d'effectuer 4 séries de traitements pour déduire la réflectance au sol à partir de la valeur numérique de l'image (figure 1.1):

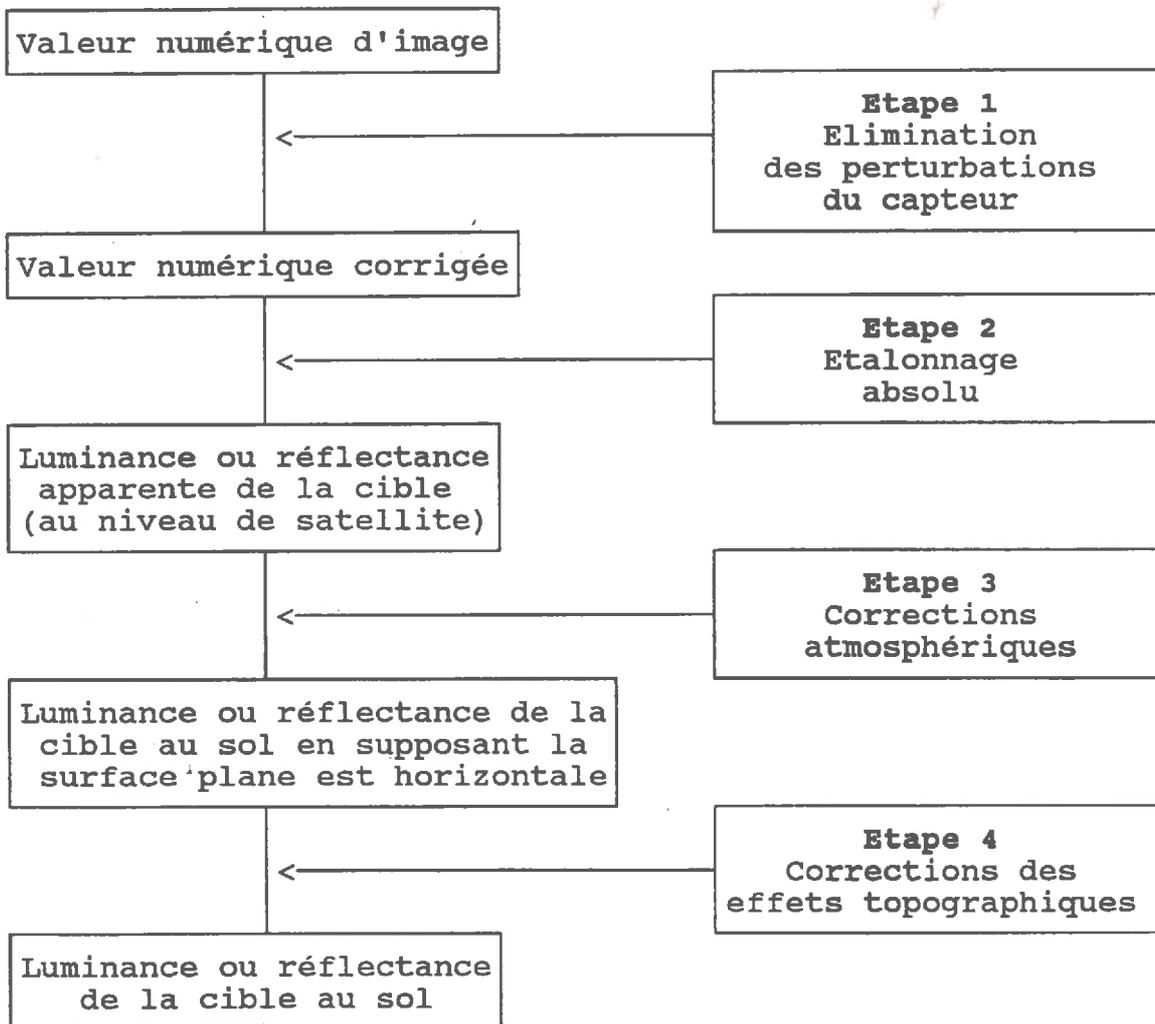


Figure 1.1.: Les quatre étapes des traitements nécessaires pour déduire la réflectance ou la luminance au sol d'une surface à partir d'une image satellitaire.

- d'éliminer totalement ou partiellement ces perturbations avant d'utiliser l'image (étape 1);
- pour connaître la signification physique de ces valeurs numériques, il faut étalonner les mesures du capteur, c'est-à-dire connaître les coefficients qui permettent de relier la valeur numérique à la luminance correspondante. A ce niveau, on déduit souvent la réflectance correspondante (étape 2).
- pour transformer le signal capté par le satellite en signal au sol, correspondant à une surface plane et horizontale, nous devons corriger les effets atmosphériques (étape 3).
- si la surface considérée est située sur une pente ou dans une zone avec un relief accentué, l'éclairement reçu est différent de celui reçu par une surface plane et horizontale. Nous devons alors prendre en compte les effets topographiques (étape 4).

I-1-1. Les facteurs perturbateurs propres aux capteurs

Les perturbations pouvant affecter la qualité radiométrique se retrouvent dans toutes les parties de l'instrument (SPOT IMAGE, 1986): système optique, détecteur, électronique d'amplification etc... On peut considérer que les perturbations radiométriques sur une image peuvent être classées en cinq catégories:

- (1) bruit classique du détecteur photo-électrique et celui de quantification qui sont quasiment aléatoires;
- (2) effet de la non-linéarité de l'instrument qui dépend du niveau de luminance à l'entrée;
- (3) effet strié en ligne ou/et en colonne qui est produit par l'inégalité des réponses des détecteurs et par le système de balayage;
- (4) déformation non striée dépendant de la position du pixel;
- (5) déformation dépendant du contraste entre la luminance du pixel et celle de ses voisins (effet de FTM de l'instrument).

• Bruit classique du détecteur et bruit de quantification

Le bruit classique d'un détecteur photo-électrique est dû au bruit d'agitation thermique et au bruit des photons. Il est généralement aléatoire. Il est caractérisé généralement par le rapport Signal/Bruit et est contrôlé soigneusement au niveau de la conception du détecteur.

La luminance transformée en valeur analogique par le détecteur est ensuite retransformée linéairement ou non linéairement en une valeur numérique entière de 0 à N_{max} (N_{max} valant 255 pour l'image HRV et TM, 1023 pour l'image AVHRR). Cette valeur numérique correspond à un intervalle de luminance qui dépend du gain du détecteur et du pas de quantification. De plus Kieffer et al.(1985) ont montré que la quantification du signal à bord peut produire un effet de "peigne" sur l'histogramme de l'image TM.

Ces deux "bruits" ne peuvent pas être corrigés. Ils peuvent être par contre réduits en travaillant sur la valeur moyenne d'un ensemble de pixels.

• *Effet de la non-linéarité de l'instrument*

Dans le domaine des niveaux de luminance que l'instrument peut mesurer, sa réponse n'est pas forcément parfaitement linéaire. Si on considère un courant d'obscurité nul, on peut caractériser le défaut de linéarité par le rapport:

$$\frac{V(L+L') - [V(L)+V(L')]}{V(L + L')} \quad (1.1)$$

$V(L)$, $V(L')$, $V(L+L')$ sont des tensions de sortie correspondant aux luminances, L , L' et $L+L'$. Dans le cas idéal, ce rapport est nul.

En prenant le cas des instruments HRV de SPOT1, ce rapport vaut environ $\pm 1\%$ (SPOT IMAGE, 1986)

• *Effet strié*

L'effet strié sur l'image est lié d'une part à l'inégalité de réponse des détecteurs, d'autre part au mode ou à la configuration de balayage.

Le capteur TM de LANDSAT fournit en une seule fois 16 lignes d'une image en utilisant 16 détecteurs balayant dans le sens Est-Ouest ou Ouest-Est (Chevrel et al., 1981), et le capteur HRV utilise une barre de 3000 détecteurs en mode XS (6000 pour le mode PA) pour acquérir une ligne d'image (Cassanet, 1984). A cause des difficultés de fabrication, la réponse de ces détecteurs n'est pas identique: leurs gains et leurs courants d'obscurité sont différents. Ainsi, pour une même luminance, la valeur numérique délivrée sera différente selon le détecteur utilisé. Comme une ligne d'une image TM (ou une colonne pour HRV) est acquise par un seul détecteur, l'inégalité de réponse des détecteurs crée des phénomènes de stries dans le sens des lignes (ou des colonnes pour HRV) notamment pour l'image d'une zone homogène. Ces stries seront périodiques avec une période de 16 lignes pour l'image TM mais non périodiques pour l'image HRV.

Un autre type de stries est lié au mode ou à la configuration du balayage. TM balaye une fois dans le sens est-ouest, une fois dans le sens ouest-est. Ce changement induit des changements de réponse des 16 détecteurs utilisés et produit des différences de valeur entre les groupes de 16 lignes d'images dans le sens est-ouest et ouest-est. Tandis que pour acquérir une image HRV, on n'a pas besoin de balayage dans le sens est-ouest. Mais si les deux modes d'acquisition (XS et PA) fonctionnent en même temps dans un même instrument HRV, on peut observer un autre phénomène de stries verticales mais avec une période de 7 pixels (Begni, 1988). Un troisième type de stries est apparu sur les images panchromatiques de HRV. Il se manifeste dans le sens horizontal avec une période de 2 pixels (Begni et al., 1986; Westin, 1990).

L'effet strié peut atteindre 3 unités digitales sur les valeurs numériques de l'image et est plus ou moins corrigé par le pré-traitement radiométrique. Les méthodes de correction sont nombreuses: l'utilisation de la connaissance des réponses des détecteurs obtenue avant le vol (Singh 1985), l'égalisation radiométrique des paramètres statistiques (moyennes et écart-types) des images provenant du même détecteur (Algazi et Ford, 1981; Rohde et Pohl, 1978), la modification des histogrammes des images provenant des différents détecteurs (Horn et Woodham, 1979; Kautsky et al., 1984; Desachy et al., 1985), l'utilisation de filtres dans le domaine de fréquence (Peli et Verly, 1983; Srinivasan et al., 1988) ou dans le domaine spatial (Crippen 1989, Westin, 1990) etc..

• *Déformation non striée dépendant de la position du pixel;*

Deux bruits dépendant de la position du pixel ont été observés sur les images TM. Le premier correspond à une diminution exponentielle de la réponse du détecteur dans le sens du balayage (Metzler et Malila, 1985). Le deuxième type de perturbation non striée est observé lors du passage d'une cible blanche: le détecteur aura une réponse plus faible après être passé au dessus d'une cible très réfléchissant comme la neige, ce qui crée des ombres dans le sens du balayage (Murphy et al., 1985). La correction de ces bruits paraît difficile, la solution consiste à améliorer la qualité radiométrique de l'instrument.

• *Déformation dépendant du contraste de la luminance d'un pixel avec ses voisins - Effet de la FTM du capteur*

La réponse du capteur est différente pour différentes fréquences de l'image. Elle est caractérisée généralement par la Fonction du Transfert de Modulation (FTM) du système Optique-Détecteur-Electronique du capteur, qui peut être définie comme la transformée de Fourier de sa réponse impulsionnelle. La valeur de la FTM décroît lorsque la fréquence augmente, ce qui introduit un autre type de perturbation radiométrique pour une zone hétérogène. Ainsi, la valeur du pixel dépend du contraste qui existe avec ses voisins (Justice et al., 1989; Grunblatt, 1987; Dosièrè, 1983; Carnahan et Zhou, 1986). A titre d'exemple, la FTM du système LANDSAT-TM est présentée sur la figure 1.2.

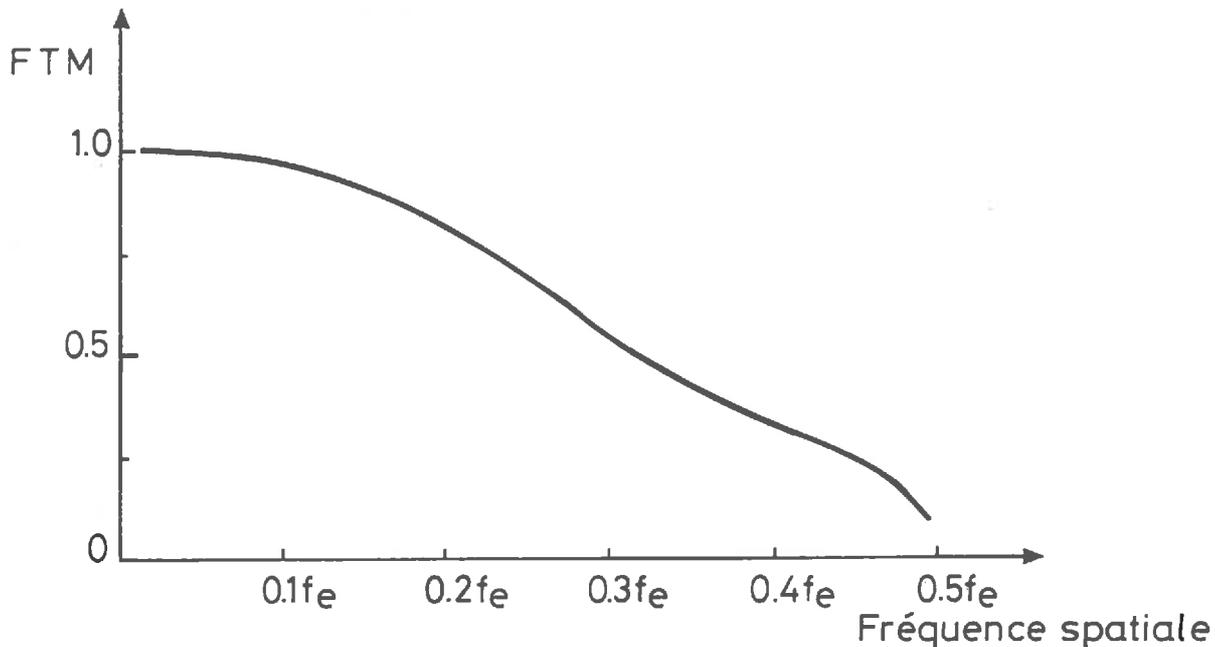


Figure 1.2.: Variation de la FTM du capteur TM de Landsat4 en fonction de la fréquence spatiale (d'après Schowengerdt et al., 1985)

La FTM de l'instrument peut être mesurée avant le vol ou/et évaluée à partir d'images de cibles artificielles présentant un fort contraste avec leur environnement, ou en comparant l'image satellitaire et une autre image de la même zone, acquise en même temps avec un autre instrument dont la FTM est connue (Schowengerdt et al., 1985).

Avant leur distribution, les images satellitaires subissent des prétraitements radiométriques dans lesquels certains bruits qui peuvent être corrigés comme les stries, ont été pratiquement supprimés. Cependant, l'influence des effets de la FTM n'a pas été prise en compte lors des prétraitements. Cela est très gênant si on travaille sur une image d'une zone hétérogène.

I-1-2 Coefficients d'étalonnage du capteur satellitaire

En l'absence de bruits instrumentaux, on suppose que la relation entre la sortie numérique instrumentale, V , et la luminance correspondante de la scène observée à l'entrée du télescope (luminance hors atmosphère), L , est linéaire, et qu'on peut modéliser la réponse instrumentale par une relation du type : (SPOT IMAGE, 1986)

$$V = AL + B \quad (1.2)$$

dans laquelle A est le coefficient d'étalonnage absolu correspondant à la valeur numérique de l'image par unité de luminance, B est la valeur numérique de sortie du capteur correspondant à une luminance nulle en entrée (en anglais offset) qui, dans la pratique, ne pose pas de gros problème (la précision de mesure est typiquement meilleure que 0.5%, Leroy, 1990). Comme les capteurs HRV² de SPOT peuvent avoir

des gains différents et que la valeur de l'offset a été déjà retranchée de l'image, on peut utiliser une présentation du coefficient d'étalonnage, pour les capteurs du SPOT1, indépendante du gain, A' :

$$V = A' (1.3)^{m-3} L \quad (1.3)$$

dans laquelle m est le numéros du gain du capteur. Ainsi A' correspond à la valeur numérique de l'image par unité de luminance avec un gain égal à 3.

Le coefficient d'étalonnage est un des facteurs les plus importants. Il détermine la résolution radiométrique et la dynamique de la mesure. En effet, les valeurs numériques d'une images ne peuvent prendre que des valeurs entières entre 0 et N_{max} (N_{max} vaut 255 pour les image HRV et TM, 1023 pour l'image AVHRR). Sur une image, deux cibles ayant la même valeur numérique peuvent présenter une différence de réflectance apparente égale à δR :

$$\delta R = \pi / (A E_0 \cos \theta_s) \quad (1.4)$$

avec E_0 éclairement du soleil dans la bande considérée, θ_s angle entre la direction des rayons du soleil et la normale à la surface. Il faut noter également que les sources de bruits autres que la quantification peuvent augmenter sensiblement le δR . La réflectance maximale mesurable est donnée par:

$$R_{max} = \pi (N_{max} - \text{offset}) / (A E_0 \cos \theta_s) \quad (1.5)$$

Supposons que A soit égal à 1, pour le capteur HRV et que θ_s soit égal à 45° . Alors, δR vaut 0.0024 pour XS1, 0.0041 pour XS3, et R_{max} vaut 0.61 pour XS1 et 1.04 pour XS3.

Pour les applications dans lesquelles on a besoin de connaître la luminance correspondante de l'image (comme les études du bilan énergétique, déduit de la réflectance au sol à partir d'un modèle du transfert radiatif ou l'estimation des paramètres atmosphériques en utilisant les surfaces d'eau etc...) les coefficients d'étalonnage sont indispensables et la précision avec laquelle ils sont connus influe directement les résultats recherchés.

Les coefficients d'étalonnage d'un capteur peuvent varier en fonction du temps (Slater et al., 1987; Santer et al., 1991), ce qui est très gênant quand on effectue une analyse temporelle des images. En effet, même si l'on corrige les effets de hauteur du soleil et de l'atmosphère, la variation temporelle de la réflectance d'une surface n'est pas forcément liée au changement de l'état de celle-ci mais peut-être simplement due à la variation de la sensibilité radiométrique du capteur.

I-1-3. Effets atmosphériques

En l'absence d'atmosphère, pour une surface horizontale et lambertienne, la luminance captée par un satellite sera:

$$L_{\text{sat}} = L_{\text{sol}} = \frac{E}{\pi} R_{\text{sol}} \cos(\theta_s) \quad (1.6)$$

Avec E : Eclairement solaire extraterrestre
 θ_s : Angle solaire zénithal

Dans les conditions naturelles, ce signal est fortement perturbé par l'atmosphère de différentes manières. Tout d'abord, l'éclairement qui arrive à la surface n'est plus $E \cdot \cos(\theta_s)$, mais composé de 3 parties qui viennent, (1) directement du soleil, (2) de la diffusion du ciel, (3) de la diffusion due à l'environnement. De plus la luminance mesurée par le satellite comporte également plusieurs composantes: (1) le rayonnement qui provient de la cible, (2) le rayonnement qui provient de l'environnement de la cible et qui a été diffusé par l'atmosphère, (3) le rayonnement solaire qui est diffusé par

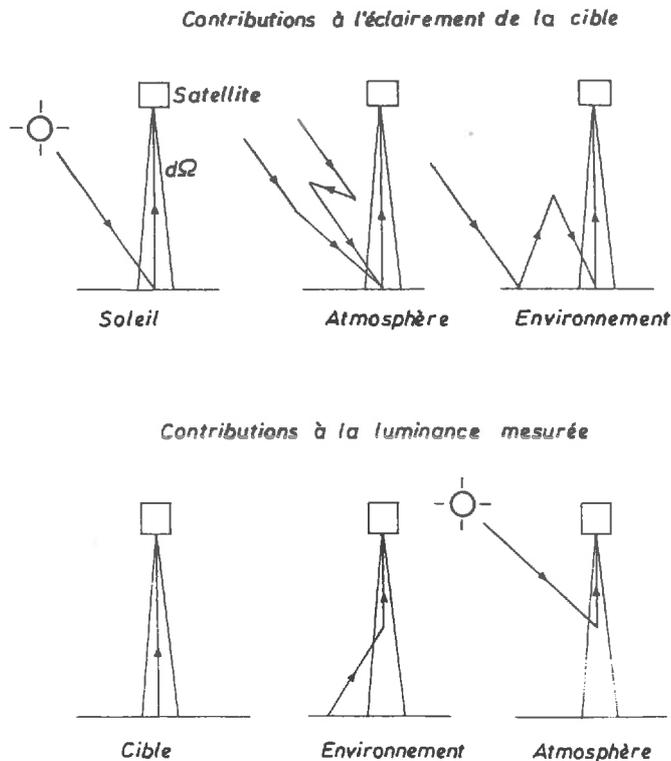


Figure 1.3.: Influences atmosphériques sur le signal satellitaire (d'après Deschamps et al., 1983)

l'atmosphère (luminance propre du trajet optique; Deschamps et al., 1983) (figure 1.3). La correction des effets atmosphériques nécessite donc de comprendre en détail l'interaction entre la lumière et l'atmosphère (absorption et diffusion). Nous allons les voir en détail dans le deuxième paragraphe de ce chapitre.

I-1-4. Effets du relief

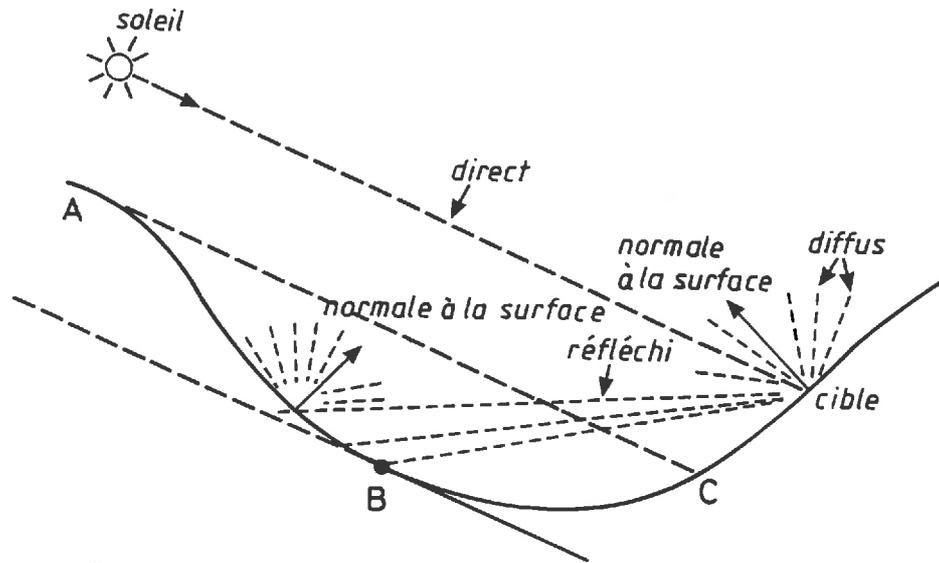


Figure 1.4.: Eclaircements reçus par une cible en terrain accidenté (adapté de Proy, 1986)

Les effets topographiques peuvent avoir trois origines (Proy, 1986) (figure 1.4):

- L'orientation de la normale au terrain par rapport à la position du soleil. L'éclaircissement direct et l'éclaircissement diffus sont modulés suivant l'orientation du terrain ou plutôt l'angle d'incidence des rayons solaires par rapport à la normale à la surface. Si le pixel tourne le dos au soleil (partie AB, ombre propre), l'éclaircissement direct sera complètement supprimé.
- Le relief environnant, qui peut également cacher le soleil à un élément de surface, en supprimant alors complètement l'éclaircissement direct du soleil (partie BC, ombre portée), et en diminuant l'éclaircissement diffus en occupant une partie de l'angle solide sous lequel est vu le ciel qui a une luminance supérieure à celle des surfaces terrestres.
- Les variations d'altitude modifient la couche d'atmosphère traversée et par conséquent les phénomènes de diffusion et d'absorption du rayonnement solaire.

De plus, par rapport à un même type d'objet situé dans une zone plane et horizontale, les propriétés directionnelles de la réflectance vont changer à cause du relief (Hugli et Frei, 1983).

La correction des effets topographiques nécessite un modèle numérique de terrain qui sert à calculer la direction de la normale à la surface, à déterminer les ombres etc... La difficulté principale est la détermination de la quantité d'éclaircissement diffus (la diffusion du ciel et la réflexion de l'environnement) et sa distribution directionnelle. Différentes méthodes de correction ont été proposées par Kawata et al. (1988), Civco (1989), Le

Men (1989), Ranson et al. (1986), Dave et Bernstein (1982), Eliason et al. (1981), Dozier et Frew (1981), Proy (1986).

I-1-5. Problèmes posés par l'utilisation d'images provenant de différents capteurs

Plusieurs satellites sont actuellement en orbite pour acquérir les images de la Terre. L'utilisation combinée des images satellitaires provenant de ces différents capteurs nous permet de réaliser des analyses d'une surface terrestre à différentes échelles spatiales et avec différents angles de visée. Elle peut également permettre de réduire l'intervalle d'acquisition entre les images d'une même zone et améliorer ainsi la précision des analyses multitemporelles (Cicone et Metzler, 1984).

Dans le cas idéal, la valeur numérique de l'image d'une surface sera indépendante des capteurs utilisés. Il est bien évident que les facteurs perturbateurs que nous avons discutés précédemment interviennent lors de l'utilisation des images multi-systèmes, mais plusieurs autres problèmes particuliers se posent également:

- (1) La sensibilité radiométrique des capteurs n'est pas la même dans les bandes spectrales homologues, c'est à dire, pour la même luminance d'entrée la valeur numérique correspondante sur l'image sera différentes suivant le capteur rencontré. Pour égaliser les sensibilités radiométriques des capteurs il est donc nécessaire de connaître les coefficients d'inter-étalonnage, c'est-à-dire la valeur du rapport du coefficient d'étalonnage d'un instrument dans une bande spectrale donnée et du coefficient d'étalonnage d'un autre instrument dans la bande spectrale homologue (qui n'est pas forcément strictement identique) (Leroy, 1990; Dinguirard et al., 1990; Teillet et al., 1990).
- (2) Les centres et les largeurs des bandes spectrales homologues des capteur sont plus ou moins différents. Suivant la variation spectrale de la réflectance d'une surface rencontrée, les réflectances dans les bandes spectrales des capteurs seront différentes, et cette différence varie en fonction de la forme du spectre de la cible.
- (3) L'inclinaison de la visée d'une surface peut être différente selon les capteurs utilisés. Cela peut apporter une information supplémentaire si le changement d'inclinaison est corrélé avec les paramètres ou les phénomènes recherchés, et ce sera un facteur perturbateur si on utilise les images multi-système pour les besoins d'une analyse temporelle.
- (4) Les heures de passage des satellites ne sont pas les mêmes, aussi la direction de l'illumination est-elle différente. Cela peut causer une variation de la réflectance de surfaces comme, par exemple, des parcelles agricoles avec des effets de rang, ou une surface située sur une pente ou/et dans une zone montagneuse où les effets d'ombre dépendent fortement la direction de l'illumination. De plus, la réflectance de surface peut avoir évoluée (pluie, rosée, vent etc...), et aussi et surtout l'atmosphère peut avoir changé.

I-1-6. Conclusion

Parmi les 5 types de problèmes que nous avons présentés dans ce paragraphe, l'évaluation de la plupart des effets instrumentaux est généralement effectuée au niveau de la conception du capteur. Certaines perturbations sont corrigées au cours de l'étape de pré-traitement radiométrique avant la distribution des images, mais les effets de la FTM n'ont pas été assez évalués et corrigés, ce qui peut être très gênant pour les analyses d'image d'une zone hétérogène dans lesquelles les pixels sont traités indépendamment de leurs voisins.

Pour les quatre problèmes restants, les effets atmosphériques et topographiques sont largement discutés et analysés par nombre de scientifiques. Actuellement on est capable d'effectuer des corrections de ces effets avec des précisions compatibles avec les autres mesures. Par contre, les travaux d'étalonnage et d'inter-étalonnage sont relativement peu abordés et les coefficients d'inter-étalonnage ont pratiquement pas été publiés. Il est donc nécessaire de chercher des méthodes efficaces pour l'étalonnage et l'inter-étalonnage des capteurs des satellites, et de les valider sur les capteurs existant actuellement, afin que tous les facteurs soient pris en compte pour les analyses quantitatives des images satellitaires.

I-2. Les méthodes utilisées pour l'étalonnage des satellites

Les méthodes d'étalonnage qui ont été utilisées peuvent être classées en 4 catégories: étalonnage avant lancement, utilisation de systèmes d'étalonnage embarqués, étalonnage sur cible terrestres avec ou sans vérité terrain.

I-2-1. Etalonnage avant lancement

Tous les capteurs sont étalonnés avant lancement. L'étalonnage est réalisé généralement en utilisant une source de lumière standard stable, uniforme comme une sphère ou hémisphère intégrante dont l'intérieur est muni de lampes bafflées et tapissé d'une peinture très réfléchissante (Leroy, 1990; Leroy et al., 1990). Malheureusement, les coefficients d'étalonnage resteront qualitatifs et peu utilisables une fois le satellite mis en orbite à cause du passage air-vide du capteur. Par exemple, on a observé une rétrécissement des bandes de 5 à 20% dû à une désorption d'humidité des filtres pour les capteurs HRV de SPOT1, cela introduit une modification importante des coefficients d'étalonnage (Leroy, 1990).

I-2-2. Systèmes d'étalonnage embarqués

L'idée du système d'étalonnage embarqué est de faire viser par le capteur une source standard dont la luminance spectrale est connue. La source peut être le soleil, la lune ou une lampe interne.

• *Méthode du capteur solaire :*

Appliquée par les satellites SPOT, cette méthode consiste à collecter la lumière du soleil en utilisant un faisceau de fibres optiques, et à éclairer les détecteurs. Une très bonne précision multitemporelle de l'étalonnage (de l'ordre de $\pm 2\%$) a été obtenue pendant les deux premières années du vol de SPOT1, mais le résultat d'étalonnage absolu est peu précis dû fait de la méconnaissance de la transmission de l'optique du capteur. (SPOT IMAGE, 1986; Leroy, 1990)

• *Méthode basée sur la visée de la lune*

Cette méthode a été testée par Kieffer et Wildey (1985) pour les satellites LANDSAT 4 et 5. Le principe est d'obtenir une image de la Lune (194 pixels de diamètre sur l'image TM) en orientant le satellite vers la lune. La luminance de la lune est déterminée en utilisant les connaissances de la luminance du soleil et la réflectance de la lune qui est très stable dans le temps. La précision obtenue est de 1 à 2% en absolu. Les difficultés rencontrées sont essentiellement dues au changement de l'orientation du satellite et aux besoins de communication dans les bandes S et L pour cette attitude du satellite (Kieffer et Wildey, 1985).

• *Méthode de la lampe interne*

Embarquée dans les satellites LANDSAT et SPOT, la lampe interne peut être utilisée comme une source standard dont la luminance spectrale a été mesurée avant le vol du satellite. Cette méthode ne permet pas d'obtenir des coefficients d'étalonnage absolu fiables, parce que l'émission de la lampe change une fois en orbite à cause de passage air-vide, et des fortes vibrations subies au moment du lancement du satellite qui introduisent des déformations mécaniques des systèmes concernés (Leroy, 1990). Mais elle peut donner une bonne précision multitemporelle (de l'ordre de $\pm 2\%$) (Leroy, 1990)

I-2-3. Etalonnage sur cible terrestres (sans vérité terrain)

Pour des canaux situés dans le domaine des courtes longueurs d'ondes ($0.4-0.5\mu\text{m}$), il est possible d'étalonner un capteur en visant l'océan, sans aucune mesure radiométrique de surface. En effet, parmi les composantes du signal au niveau de satellite, la diffusion Rayleigh est dominante, et peut être calculée théoriquement avec une très bonne précision. Les contributions de l'océan et des aérosols sont faibles, et peuvent être estimées en utilisant la réflectance de surface de l'océan (calculée en tenant compte de la direction et de la vitesse du vent), et l'épaisseur optique des aérosols (obtenue en analysant le signal dans une bande spectrale de plus grande longueur d'onde comme le proche ou le moyen infra-rouge). Cette méthode a été utilisée, dans le domaine des courtes longueurs d'ondes, pour les images GOES-VISSR par Fraser et Kaufman (1986), les images NIMBUS7-CZCS par Gordon (1987), et sera appliquée pour les images SPOT4-VGT (Leroy, 1990; Vermote, 1990). Mais cette méthode n'est pas valable pour les bandes de plus grandes longueurs d'ondes.

I-2-4. Etalonnage sur cible terrestres (avec vérité terrain)

L'étalonnage d'un satellite à partir d'une cible terrestre avec vérité terrain consiste à modéliser la luminance vue par le satellite qui lui parvient depuis la cible terrestre, à partir d'un modèle de transfert radiatif à travers l'atmosphère, en mesurant la réflectance ou la luminance du sol et les paramètres atmosphériques. Ces valeurs sont ensuite comparées aux données numériques correspondant à chaque pixel de l'image pour calculer les coefficients d'étalonnage. (William et David, 1986; Slater et al, 1987; Frouin et Gautier, 1987; Chavez, 1989)

Cette méthode peut fournir une très bonne précision absolue de l'étalonnage (autour de 5%), et a été appliquée pour les images TM et HRV avec succès. En plus elle offre des possibilités d'inter-étalonnage des satellites. Cependant, cette méthode est relativement lourde. Elle nécessite un site-test uniforme spatialement et de grandes dimensions, dont les propriétés optiques doivent être bien caractérisées, des possibilités d'acquisition d'image, ainsi que l'utilisation de nombreux dispositifs permettant de connaître avec une bonne précision les paramètres atmosphériques qui sont nécessaires à la modélisation du transfert radiatif. Actuellement, il existe un seul site (White Sands au Nouveau-Mexique aux Etats Unis) et une seule équipe (celle de l'Université de l'Arizona dirigée par P. Slater) capable de faire des mesures opérationnelles. La croissance du nombre de satellites en orbite en même temps que la demande de possibilités de comparaison des résultats, montrent qu'il est nécessaire de mettre au point d'autres sites test.

I-3. Situation de l'étude relative à l'intercomparaison des données satellitaires

I-3-1. Inter-étalonnage

Les coefficients d'inter-étalonnage peuvent être déduits directement des coefficients d'étalonnage. Mais leur précision dépend des méthodes et des équipements utilisés ainsi que des conditions expérimentales dans lesquelles ils ont été obtenus. On peut inter-étalonner les instruments avant le lancement des satellites en utilisant une source standard, mais ces mesures sont délicates à mettre en oeuvre et les coefficients obtenus changent quand les instruments se trouvent dans le vide spatial et peuvent également varier au cours du temps comme nous l'avons vu précédemment (Leroy, 1990).

La méthode la plus efficace consiste à effectuer des mesures simultanément ou presque simultanément sur une cible terrestre avec les instruments à inter-étalonner. Pour les instruments embarqués à bord d'un même satellite, cela est facile. Pour les instruments qui se trouvent sur des satellites différents, on doit obtenir des images d'un site test, le même jour, quand les conditions atmosphériques sont favorables et stables. On doit alors connaître la réflectance du site test ainsi que les paramètres atmosphériques au moment du passage du satellite afin d'assurer une bonne précision à l'inter-étalonnage.

Cette méthode nécessite, en plus de tout ce qui est nécessaire à l'étalonnage absolu d'un capteur, que tous les satellites passent au dessus du site test le même jour lorsque les conditions atmosphériques sont favorables. Ce qui n'est pas facile à obtenir. C'est probablement une des raisons pour lesquelles il n'y a pratiquement pas de données d'inter-étalonnage disponibles.

I-3-2. Inter-comparaison

L'inter-comparaison, plus que l'inter-étalonnage, consiste à comparer les valeurs numériques des images provenant de différents instruments, dans des bandes spectrales homologues. Les comparaisons des informations fournies par différents instruments, pour des applications thématiques, ont été discutées par de nombreux auteurs (Cicone et Metzler, 1984; Cowlwell et Poulton, 1985; Crist et Cicone, 1984; Bildgen et al., 1989; Royer et al., 1987). Ils se contentent le plus souvent, de chercher la droite de regression entre les valeurs des pixels de bandes homologues pour chacune des images. Les comparaisons beaucoup plus générales qui s'attachent à analyser la signification des valeurs numériques sont, par contre, peu abordées.

Cinq facteurs doivent être pris en compte au niveau de l'intercomparaison :

- les coefficients d'inter-étalonnage
- la différence de résolution spatiale
- la différence des conditions atmosphériques
- la différence des bandes spectrales
- les différences de géométries de visée et d'éclairement

En dehors de l'inter-étalonnage, ce sont les deux derniers facteurs qui sont les plus gênants.

- Non coïncidence des bandes spectrales

La réponse spectrale des capteur SPOT1-HRV, LANDSAT5-TM et AVHRR-NOAA11 est différente (figure 1.5). La luminance mesurée par satellite est, dans une bande spectrale limitée par les longueurs d'onde λ_1 et λ_2 , la luminance équivalente qui est définie par:

$$L = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda} \quad (1.7)$$

avec : $L(\lambda)$: luminance spectrale
 $S(\lambda)$: réponse spectrale du capteur

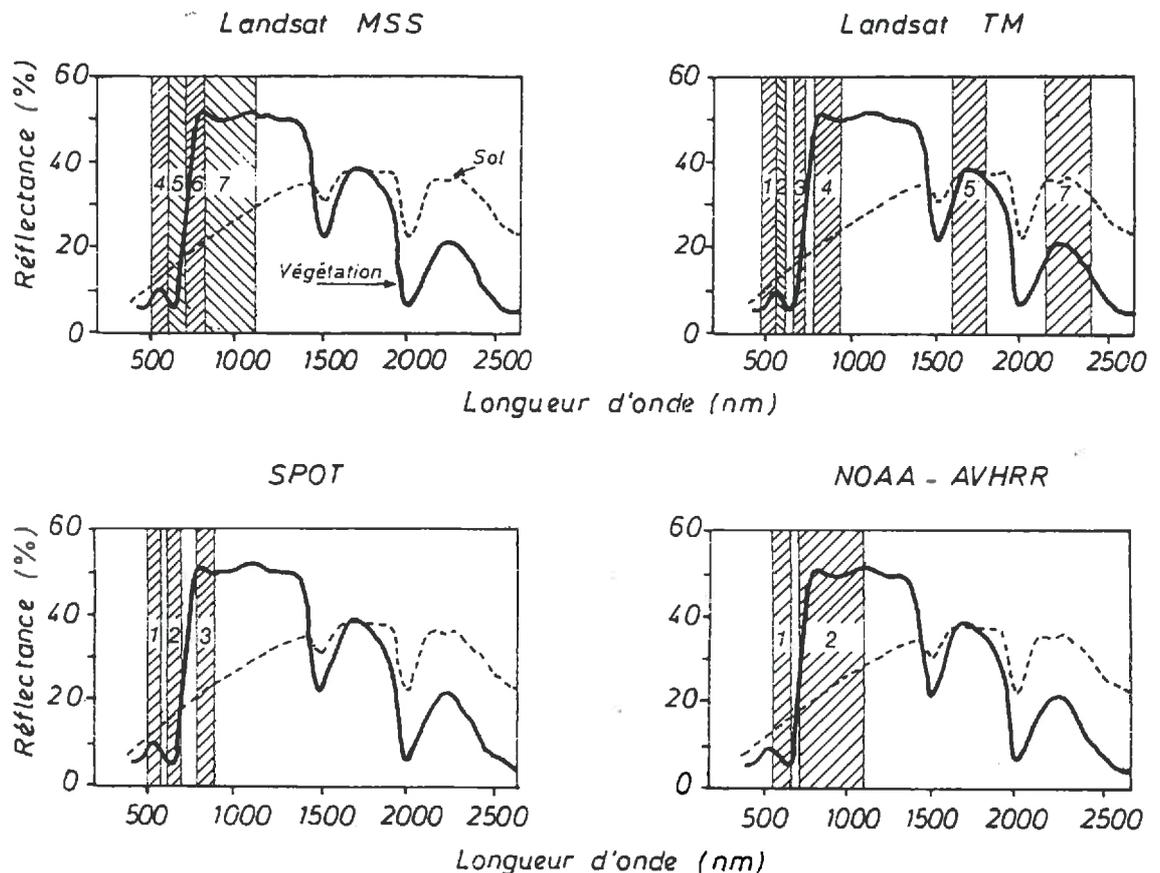


Figure 1.5.: Bandes spectrales des capteurs Landsat MSS et TM, SPOT HRV et AVHRR de NOAA superposés à un spectre de sol et un spectre de végétation. (d'après Guyot, 1989)

Comme la luminance de la cible visée par les satellites varie en fonction de la longueur d'onde, la différence des réponses spectrales des détecteurs va produire une différence au niveau des luminances équivalentes qu'ils mesurent. Ces différences de luminances équivalentes ne sont pas constantes. Elles dépendent non seulement des différences de réponses spectrales des deux instruments mais aussi de la réflectance spectrale de l'objet visé, des effets atmosphériques, etc...

• *Différences de géométries d'observation et d'éclairement*

Les différences de géométries d'observation et d'éclairement influencent le signal satellitaire de deux façons: d'une part par les propriétés généralement non lambertiennes de la surface visée et d'autre part en modifiant l'éclairement au sol et les effets atmosphériques.

Actuellement, les heures de passages des satellites ne sont pas les mêmes (9h30 pour SPOT, 10h30 pour LANDSAT et 12h30 pour NOAA). La position du soleil,

correspondant à chaque passage de satellite sera donc différente. De plus, les directions de la visée du satellite (angles zénithaux et azimutaux) sont également différentes. Comme une surface naturelle n'est pas lambertienne, sa réflectance varie en fonction de la distribution directionnelle de l'éclairement et de la direction de visée ; la réflectance observée par les satellites sera donc différente.

L'absorption et la diffusion atmosphériques dépendent de la longueur du trajet de lumière dans l'atmosphère. De plus l'azimut des lignes de balayage du satellite par rapport au soleil affecte également les effets de diffusion. Ainsi, le signal reçu au niveau de chaque satellite sera affecté différemment.

I-4. Conclusion du paragraphe

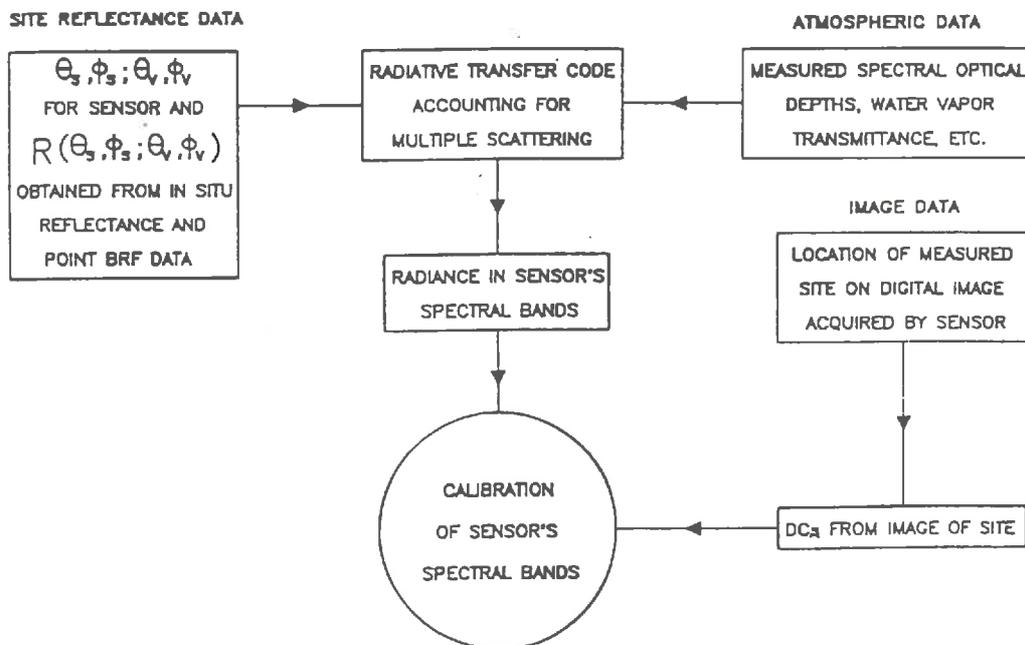


Figure 1.6.: Procédure typique utilisée pour l'étalonnage des satellites à partir d'un site test. (d'après Slater, 1990)

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, l'étalonnage et l'inter-comparaison des données satellitaires sont très importants pour les analyses quantitatives, multitemporelles et multisystèmes. Parmi l'ensemble des méthodes possibles pour l'étalonnage des capteurs du type SPOT-HRV ou LANDSAT-TM, la méthode du site-test est la plus efficace pour obtenir les coefficients d'étalonnage absolus. Les analyses précédentes montrent ainsi la nécessité de la mise en place d'un site-test destiné à l'étalonnage et l'inter-étalonnage des satellites.

La clé de cette méthode est l'évaluation de la luminance du site-test au niveau du satellite avec une bonne précision. Cela nous demande de connaître, au moment du passage du satellite, la réflectance ou la luminance du sol et sa variation spectrale pour

la géométrie de visée du satellite, et les paramètres atmosphériques.. On peut alors simuler la luminance au niveau du satellite, en utilisant un modèle de transfert radiatif (figure 1.6). Pour cela, nous devons donc analyser les facteurs affectant les mesures de la réflectance, ainsi que les effets de l'atmosphère sur le signal capté par le satellite.

II - EFFETS ATMOSPHERIQUES SUR LES IMAGES SATELLITAIRES

II-1. Interaction entre le rayonnement solaire et l'atmosphère dans les domaines du visible et du proche infrarouge

Dans l'atmosphère, on peut distinguer l'air sec, la vapeur d'eau, les aérosols, les nuages et les précipitations (Lenoble, 1986).

Un air sec est composé de différents gaz : N_2 , O_2 , Ar_2 , et O_3 . Les concentrations des quatre premiers sont considérées comme stables. La teneur en ozone (situé entre 20 et 50 kms d'altitude) varie dans le temps et dans l'espace, mais elle est bien définie à un endroit et un moment donné.

La vapeur d'eau qui s'ajoute à l'air sec est surtout concentrée dans les basses couches. On peut considérer que la teneur de l'atmosphère décroît exponentiellement en fonction de l'altitude avec une hauteur de décroissance de 2 km. Mais ceci est extrêmement variable dans le temps et l'espace.

Les aérosols sont des petites particules en suspension dans l'air et se trouvent principalement dans les basses couches, Leurs dimensions vont de $10^{-3}\mu m$ à plusieurs dizaines de μm . Celles qui jouent le rôle le plus important du point de vue radiatif, ont des dimensions comprises entre 0.1 et $1\mu m$.

Les nuages sont constitués de gouttelettes d'eau (10 à 100 μm) ou de cristaux de glace; *Les précipitations* contiennent des particules de plusieurs mm. Ces deux composantes peuvent être négligées car les images satellitaires ne sont utilisables que lorsque le ciel est parfaitement dégagé ou lorsque l'influence des nuages est négligeable.

II-1-1. Absorption par les gaz atmosphériques

L'interaction entre le rayonnement solaire et l'atmosphère présente deux phénomènes: absorption et diffusion. En général, les aérosols sont considérés comme non absorbants ou très peu absorbants, et l'effet d'absorption est dû essentiellement aux gaz.

L'absorption des gaz dépend de la pression, de la température et de la densité des gaz (la vapeur d'eau, l'ozone et les autres gaz permanents comme CO_2 , O_2). Elle est très variable avec la longueur d'onde puisqu'elle correspond à un spectre de raies très riche. On est alors amené à définir une transmission moyenne dans un intervalle spectral plus

ou moins large. A titre d'exemple, la figure 1.7 donne la transmission moyenne sur un intervalle de 5 nm et calculée pour un trajet vertical entre le sol et le sommet de l'atmosphère, d'après le programme 5S (Tanré et al., 1986). Les gaz atmosphériques intervenant entre 0,3 et 4 μm sont par ordre d'importance :

- La vapeur d'eau qui présente plusieurs bandes d'absorption aux longueurs d'ondes supérieures à 0,7 μm et limite l'observation dans le domaine proche infra-rouge à quelques fenêtres atmosphériques bien définies autour de 1,06-1,22-1,6 et 2,2 μm ;
- L'ozone qui élimine toute possibilité d'observation aux longueurs d'onde inférieures à 0,32 μm et présente une faible bande d'absorption autour de 0,6 μm ;
- Le gaz carbonique dont les bandes d'absorption se mélangent à celles de la vapeur d'eau dans le proche infra-rouge ;
- L'oxygène qui a une bande d'absorption étroite (4 nm) mais très intense centrée sur 0,76 μm ;

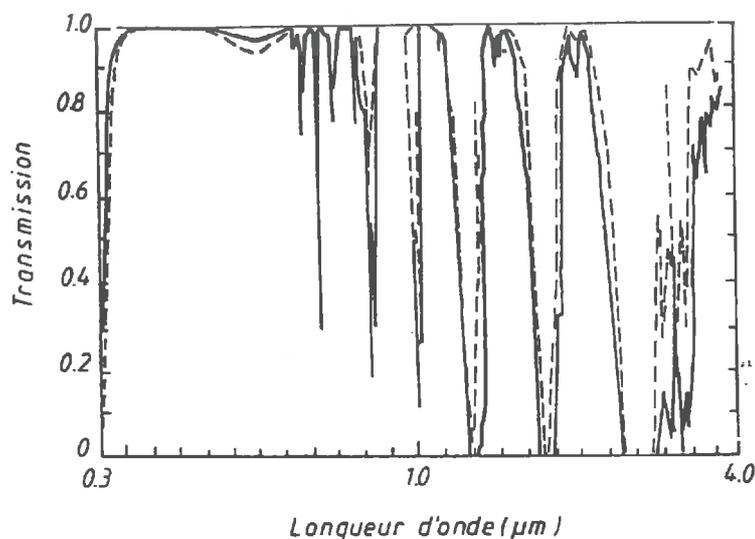


Figure 1.7: Transmission par les gaz atmosphériques pour un trajet vertical, de la surface à l'espace, entre 0,3 et 4 μm pour deux atmosphères extrêmes, polaire en hiver (---) et tropicale (—). (d'après Tanré et al., 1986)

II-1-2. Diffusion moléculaire (Diffusion de Rayleigh)

La diffusion moléculaire (Diffusion de Rayleigh) est due à l'interaction des photons avec les petites particules dont la taille est inférieure à la longueur d'onde. Elle est caractérisée par une épaisseur optique et une fonction de phase qui définit la probabilité relative de diffusion d'un photon dans une direction. (Deschamps et al. 1983).

Épaisseur optique pour la diffusion moléculaire: Elle est bien définie. Elle varie fortement avec la longueur d'onde (en λ^{-4}), et dépend du profil de pression. (Deschamps et al., 1983;). Au dessus d'un site où la pression atmosphérique est P on aura:

$$\tau_m = (84.35 \lambda^{-4} - 1.255 \lambda^{-5} + 1.40 \lambda^{-6}) / 10^{-4} P/P_0 \quad (1.8)$$

avec $P_0 = 1013.25$ mb, λ est en μm

La fonction de phase (figure 1.8a), qui est indépendante de la longueur d'onde, peut être calculée par l'équation (Tanré et al., 1986) :

$$P_m(\theta) = 0.75 [1 + \cos^2(\theta)] \quad (1.9)$$

$$\cos(\theta) = \mu_s \mu_v + \cos(\phi_s - \phi_v) \sqrt{(1 - \mu_s^2)(1 - \mu_v^2)} \quad (1.10)$$

avec :

- $\mu_s = \cos \theta_s$
- $\mu_v = \cos \theta_v$
- θ_s, θ_v : angles zénithaux du soleil et de la visée
- ϕ_s, ϕ_v : azimuts du soleil et de la visée
- θ : angle de phase

On peut constater que la diffusion moléculaire est une diffusion sélective, symétrique, c'est-à-dire que les diffusions en avant et en arrière, suivant le sens de propagation des photons, sont égales. L'intensité diffusée en avant et en arrière est d'ailleurs deux fois plus importante que celle diffusée perpendiculairement au rayonnement incident (Deschamps et al. 1983).

II-1-3. Diffusion par les aérosols (Diffusion de Mie)

Les paramètres physiques qui permettent de caractériser les aérosols, du point de vue radiatif sont : leur forme (généralement considérée comme sphérique), leur indice de réfraction, m_{jk} , leur granulométrie, $n(r)$ et leur densité. La diffusion par les grosses particules, ou diffusion de Mie, est très différente de la diffusion de Rayleigh. Les trois paramètres optiques qui permettent de caractériser les aérosols sont leur épaisseur optique, la fonction de phase et l'albédo de simple diffusion.

L'épaisseur optique des aérosols dépend du type d'aérosol. Les résultats expérimentaux sont généralement bien représentés par la loi d'ANGSTRÖM:

$$\tau_p(\lambda_2) / \tau_p(\lambda_1) = (\lambda_2/\lambda_1)^{-\alpha} \quad (1.11)$$

avec : $0.5 \leq \alpha \leq 1.5$

Pour 3 types d'aérosols standards, les variations de l'épaisseur optique normalisée à celle qui est déterminée à 550 nm, sont présentées sur la figure 1.9 (Tanré et al., 1986)

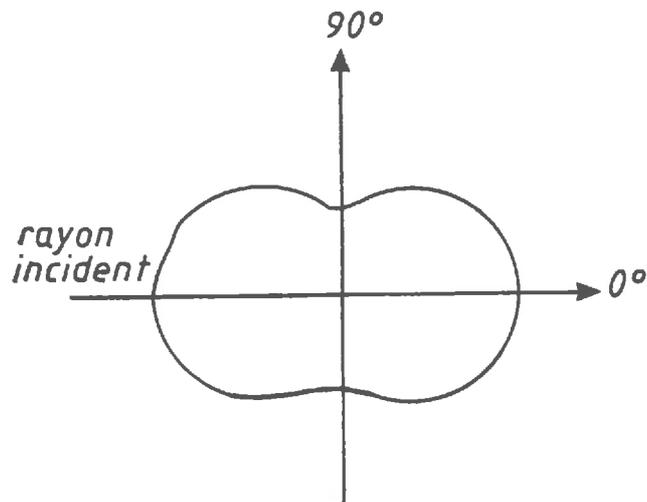


Figure 1.8.a.: Variation de l'intensité du rayonnement diffusée par de petites particules (diffusion de Rayleigh).

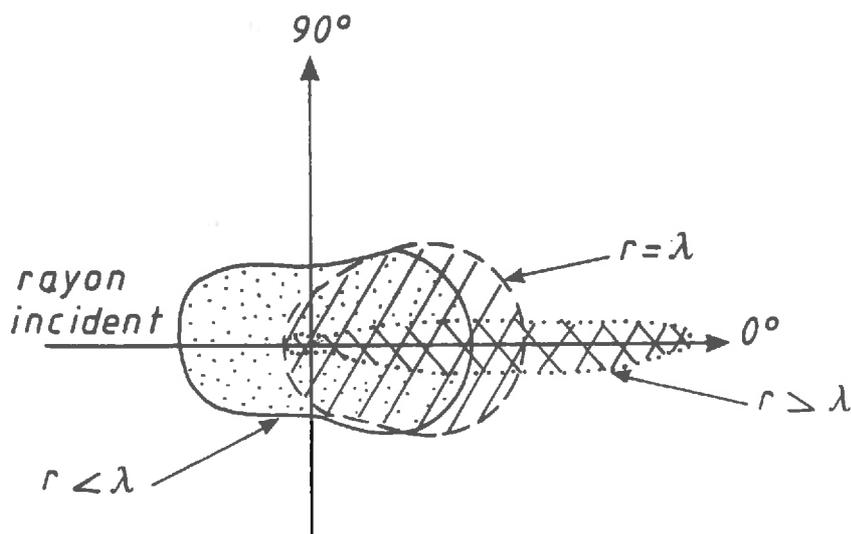


Figure 1.8.b.: Variation de l'intensité du rayonnement diffusé par des particules de taille (r) comparable à la longueur d'onde λ (diffusion de Mie).

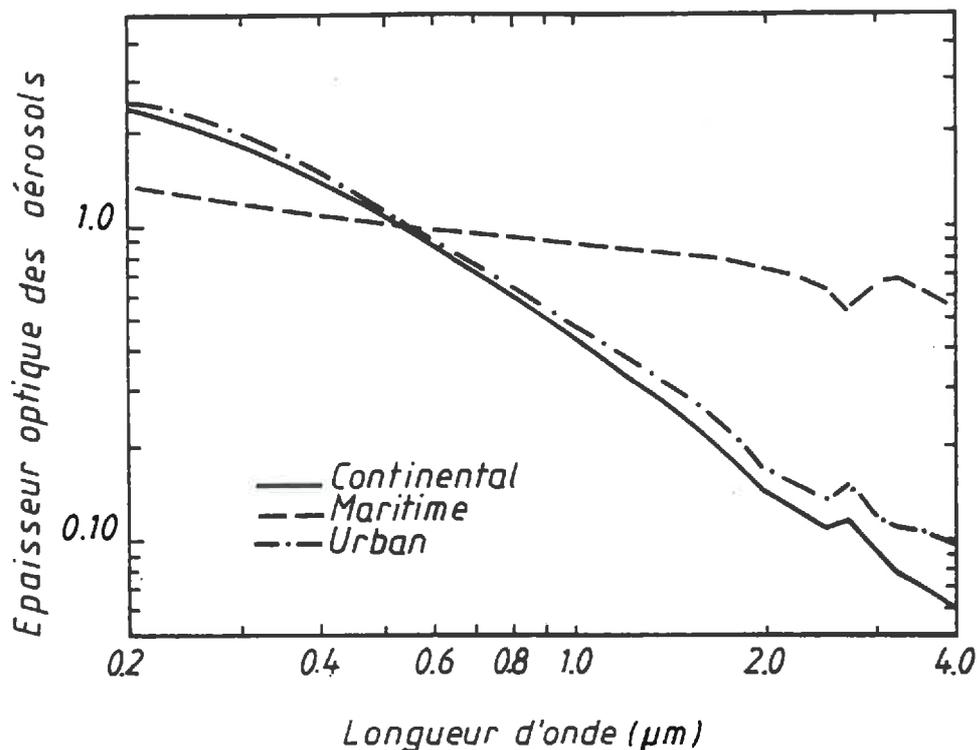


Figure 1.9.: Variation spectrale de l'épaisseur optique des aérosols. (d'après Tanré et al., 1986)

La fonction de phase des aérosols n'est pas très bien connue expérimentalement, et est souvent calculée théoriquement (Deschamps et al., 1983). Elle dépend du type d'aérosol, et peu de la longueur d'onde. C'est une diffusion sélective et anisotrope, car concentrée vers l'avant (figure 1.8b). En effet, pour les aérosols les plus courants, 95% de l'énergie est diffusée vers l'avant, avec la presque totalité dans un cône de 4° autour du rayon incident.

Pour les modèles standards, on peut avoir :

$$P_A(\theta) = 1 + 3g \cos(\theta) \quad (1.12)$$

avec : $\cos(\theta)$ défini par l'équation (1.10)

g est le facteur d'asymétrie des aérosols, et dépend peu de la longueur d'onde. Dans le domaine de longueur d'onde allant de $0.4\mu\text{m}$ à $1.3\mu\text{m}$, il vaut 0.636, 0.751, 0.587 pour les modèles d'aérosol Continental, Maritime et Urbain respectivement. (Tanré et al., 1986).

L'albédo de simple diffusion des aérosols représente le rapport du coefficient de diffusion du rayonnement à son coefficient d'atténuation. A partir de cette définition, pour les aérosols non absorbants, l'albédo de simple diffusion vaut 1. Il dépend du type

d'aérosols et de la longueur d'onde. Sa mesure directe est difficile et peu précise, mais on peut l'estimer théoriquement, pour des aérosols sphériques dont la granulométrie, la nature chimique et l'indice de réfraction complexe sont connus (Deschamps et al., 1983; Tanré et al., 1986). Pour les 3 modèles standards d'aérosols (Continental, Maritime et Urbain), les albédos de simple diffusion correspondants sont égaux respectivement à 0.864, 0.988, 0.612 (Tanré et al., 1986) (Figure 1.10).

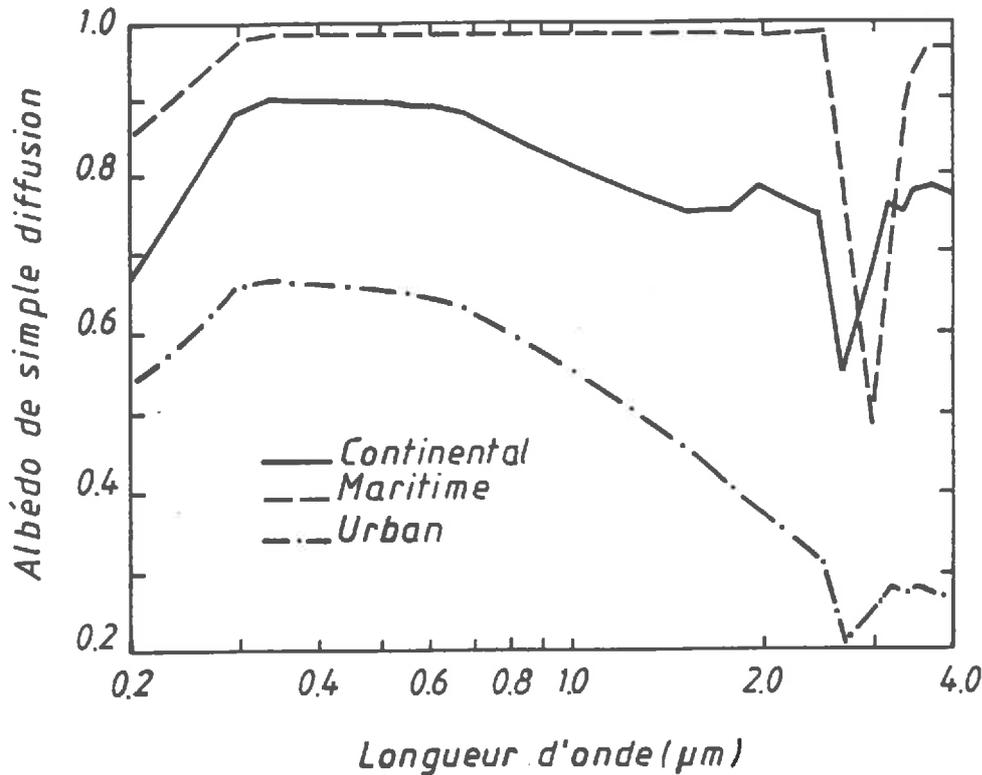


Figure 1.10.: Variation spectrale de l'albédo de simple diffusion pour 3 modèles d'aérosols. (d'après Tanré et al., 1986)

II-2. Calcul du signal mesuré par le satellite - le modèle de "Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire" (5S)

Il existe actuellement un certain nombre de modèles de transfert radiatif dans l'atmosphère. Les modèles directs simulent le signal au niveau du satellite, et sont basés sur les méthodes de Monte-Carlo, des harmoniques sphériques, des ordres successifs de diffusion, etc... Le temps de calcul est généralement long, et ces modèles ne fournissent pas une formulation analytique de la solution permettant une appréhension directe des paramètres sensibles du problème (Vermote, 1990). Les modèles inverses permettent de déduire la luminance ou la réflectance de la cible au sol en prenant la luminance de la cible au niveau du satellite. Ils utilisent des formules simplifiées, mais la précision de la solution est relativement limitée. Pour chercher le meilleur compromis, le Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) de l'Université de Lille a développé un modèle de "Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire" (5S), qui permet de simuler

rapidement le signal au niveau du satellite avec une bonne précision. Grâce aux formules analytiques utilisées dans ce modèle, on peut également l'employer pour corriger les effets atmosphériques sur les images satellitaires.

II-2-1. Luminance mesurée par un satellite en l'absence d'atmosphère

En l'absence d'atmosphère, la luminance d'une surface observée par le satellite dans une bande spectrale, L_{sat} , est donnée par l'équation 1.6 :

$$L_{\text{sat}} = R_{\text{sol}} E_0 \cos(\theta_s) / \pi$$

dans laquelle, R_{sol} est la réflectance de la surface et θ_s est l'angle entre la direction du soleil et le normale à la surface. E_0 est l'éclairement solaire équivalent dans la bande spectrale du capteur considéré, Il dépend de l'éclairement spectral solaire et de la réponse spectrale du capteur.

• Eclairement spectral solaire hors de l'atmosphère

En l'absence d'atmosphère, l'énergie totale reçue par unité de surface, sur un plan perpendiculaire au soleil pour une distance moyenne terre-soleil, est donnée par la **constante solaire** qui vaut 1367 W.m^{-2} avec une incertitude de 0.2% (Fröhlich et Brusa, 1981). Sa distribution spectrale est bien définie et proche de l'émission d'un corps noir dont la température est de 5777K. Le maximum de l'émission est situé vers 0.5 m (Iqbal, 1983) (figure 1.11).

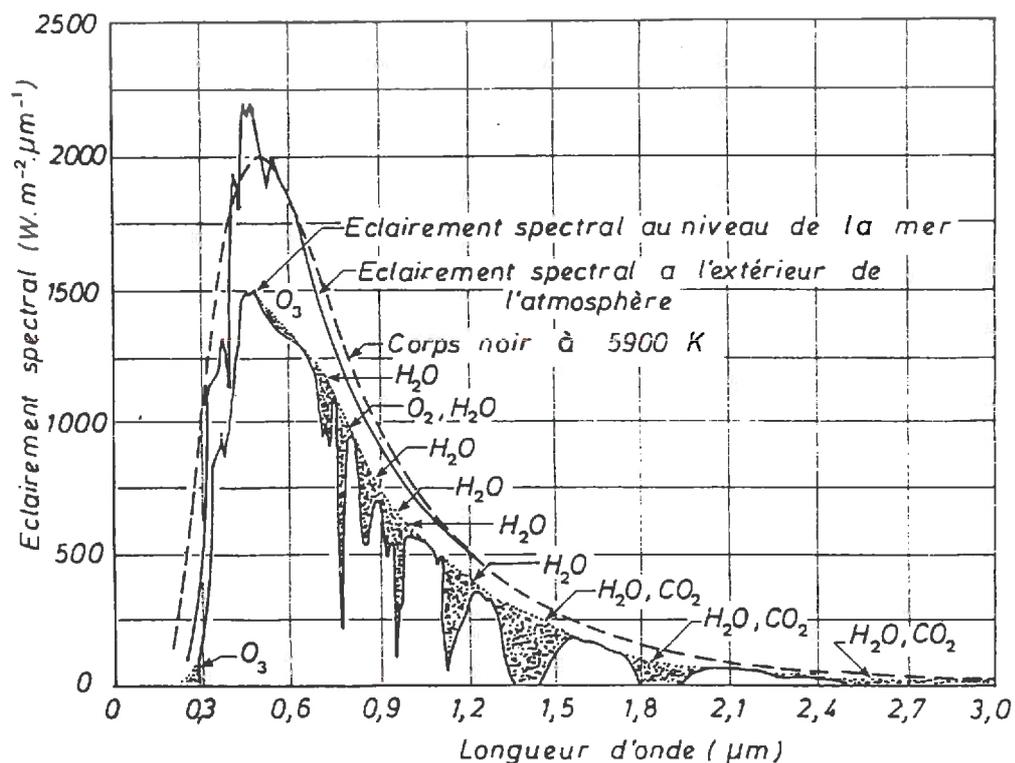


Figure 1.11.: Spectres solaires à l'extérieur de l'atmosphère et au sol, comparés à celui d'un corps noir à 5900K.

Durant une année, l'énergie qui arrive en dehors de l'atmosphère varie de $\pm 3\%$ autour de la constante solaire à cause de la variation de la distance terre-soleil. Le facteur correctif, appliqué à la constante solaire, D_s , peut être calculé par l'équation (Paltridge et Platt 1977, cité par Tanré et al. 1986):

$$D_s = \frac{1}{(1 - 0.01673 \cos(0.9856(J-4) * \pi/180))^2} \quad (1.13)$$

d'où J est le numéro du jour à partir du 1er janvier.

• *Eclairement équivalent*

Dans des bandes spectrales satellitaires, l'éclairement équivalent du soleil dans la bande spectrale considérée, E_0 , est l'intégration du produit de l'éclairement spectral du soleil par la réponse spectrale du capteur.

$$E_0 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S(\lambda) d\lambda} \quad (1.14)$$

avec :

$E(\lambda)$: éclairement solaire spectral hors de l'atmosphère

$S(\lambda)$: réponse spectrale du capteur

Les éclairements équivalents des capteurs des satellites SPOT1, LANDSAT5, NOAA11 sont donnés dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1. Eclairagements équivalents pour les différents capteurs satellitaires (d'après Slater et al., 1990)

| Capteurs | | Bandes spectrales | | |
|-------------------|---|-------------------|--------|--------|
| | | vert | rouge | P.I.R. |
| SPOT1 (HRV1) | Bandes | XS1 | XS2 | XS3 |
| | Centre des bandes μm | 0.545 | 0.638 | 0.819 |
| | Largeur des bandes μm | 0.088 | 0.064 | 0.100 |
| | $E_0 \text{ w m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ | 1860 | 1628 | 1083 |
| LANDSAT5 (TM) | Bandes | TM2 | TM3 | T34 |
| | Centre des bandes μm | 0.571 | 0.661 | 0.838 |
| | Largeur des bandes μm | 0.076 | 0.066 | 0.121 |
| | $E_0 \text{ w m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ | 1827 | 1545 | 1043 |
| NOAA11 (AVHRR) | Bandes | | AVHRR1 | AVHRR2 |
| | Centre des bandes μm | | 0.635 | 0.851 |
| | Largeur des bandes μm | | 0.113 | 0.229 |
| | $E_0 \text{ w m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ | | 1622 | 1044 |

II-2-2. Luminance apparente d'une cible homogène Lambertienne en l'absence d'absorption gazeuse

II-2-2-1. Eclairage au sol et luminance d'une cible au sol

On suppose la réflectance de tout le site uniforme et lambertienne, de valeur R . Chaque point du sol reçoit un éclairage qui est l'addition des processus suivants (figure 1.3):

a) *un éclairage direct*, qui correspond à l'éclairage solaire en haut de l'atmosphère atténué lors de sa traversée de l'atmosphère;

b) *un éclairage diffus intrinsèque à l'atmosphère*, qui correspond aux photons arrivant au sol uniquement après diffusion par l'atmosphère;

c) *un éclairage diffus traduisant l'influence de la réflexion du sol*, et qui correspond aux réflexions puis diffusions successives des photons par le sol et l'atmosphère;

L'éclairage total reçu par la surface est :

$$\frac{\mu_s E_s (e^{-\tau/\mu_s} + t_d(\theta_s))}{1 - R_e S} \quad (1.15)$$

avec :

- $\mu_s = \cos(\theta_s)$ et θ_s étant l'angle zénithal du soleil
- E_s : Eclairage solaire hors de l'atmosphère
- τ : Epaisseur optique de l'atmosphère
- $t_d(\theta_s)$: Facteur de transmission diffuse entre le sol et le soleil
- R_e : Réflectance de l'environnement
- S : Albédo sphérique de l'atmosphère

Dans ces conditions, la luminance réfléchiée par le sol en bas de l'atmosphère est donnée par :

$$L_{\text{sol}} = \frac{R}{\pi} \mu_s E_s (e^{-\tau/\mu_s} + t_d(\theta_s)) \frac{1}{1 - R_e S} \quad (1.16)$$

II-2-2-2. Luminance en haut de l'atmosphère

La luminance en haut de l'atmosphère se décompose en 3 parties (figure 1.3):

a) la luminance intrinsèque de l'atmosphère, qui correspond au rayonnement rétrodiffusé par l'atmosphère sans avoir touché le sol. On peut l'exprimer à l'aide d'une réflectance atmosphérique R_a ;

b) le signal réfléchi provenant du sol, et affecté du facteur de transmission direct;

c) le signal provenant de l'environnement par la diffusion de l'atmosphère, et affecté du facteur de transmission diffus;

Au total, la luminance apparente d'une cible homogène lambertienne en l'absence d'absorption gazeuse, L^* s'écrit:

$$L^* = \frac{\mu_s E_s}{\pi} [R_a(\theta_s, \theta_v, \phi_v) + R \frac{e^{-\tau/\mu_s + t_d(\theta_s)}}{1 - R S} (e^{-\tau/\mu_v + t_d(\theta_v)})] \quad (1.17)$$

avec : $\mu_v = \cos(\theta_v)$ et
 θ_v : Angle zénithal de la visée
 ϕ_v : Angle azimutal de la visée par rapport au soleil
 $t_d(\theta_v)$: Facteur de transmission diffuse entre le sol et le satellite

Si on note que $T(\theta_v)$ est égal à la somme de $e^{-\tau/\mu_v}$ et de $t_d(\theta_v)$, que $T(\theta_s)$ est égal à la somme de $e^{-\tau/\mu_s}$ et de $t_d(\theta_s)$, on a :

$$L^* = \frac{\mu_s E_s}{\pi} [R_a(\theta_s, \theta_v, \phi_v) + R \frac{T(\theta_s) T(\theta_v)}{1 - R S}] \quad (1.18)$$

La réflectance apparente au niveau du satellite peut alors s'exprimer sans absorption gazeuse par :

$$R^* = R_a(\theta_s, \theta_v, \phi_v) + R \frac{T(\theta_s) T(\theta_v)}{1 - R S} \quad (1.19)$$

II-2-2-3. Calcul de R_a , $T(\theta_s)$, $T(\theta_v)$ et S

Dans la formule de la réflectance apparente, R est la réflectance de la cible. Les méthodes de détermination de R_a , $T(\theta_s)$, $T(\theta_v)$ et S sont les suivantes :

• *Détermination de R_a*

La réflectance intrinsèque de l'atmosphère, R_a , est l'addition de la réflectance de l'atmosphère due à la diffusion de Rayleigh, R_m et celle qui est due à la diffusion des aérosols, R_A .

R_m peut être calculé avec une bonne précision en ne tenant compte que du premier ordre de diffusion.

$$R_m = \frac{\tau_m P_m(\theta)}{4 \mu_s \mu_v} \quad (1.20)$$

avec $\tau_m, P_m(\theta)$ calculés par les équations (1.8) et (1.9) .

Le calcul de R_A est très complexe. Il est difficile d'avoir une formule analytique pour le cas général. Pour les aérosols non absorbants, R_A peut être exprimé par l'équation (Tanré et al., 1986):

$$R_A = 1 - \frac{R(\tau_A, \mu_s) R(\tau_A, \mu_v)}{0.75 + g \tau_A} + 0.75 [(3+3g)\mu_s\mu_v - 2(\mu_s + \mu_v) + P_A(\theta)] \frac{1 - e^{-\tau(1/\mu_v + 1/\mu_s)}}{\mu_s + \mu_v} \quad (1.21)$$

avec :

$$R(\tau, \mu) = (0.75 + \mu) + (0.75 - \mu) e^{-\tau/\mu} \quad (1.22)$$

$P_A(\theta), g$ sont la fonction de phase de diffusion et le facteur d'asymétrie des aérosols, qui sont discutés dans la paragraphe II-1-3 (équation 1.12).

• *Détermination de $T(\theta_s), T(\theta_v)$*

Dans la logiciel 5S, $T(\theta)$ est déterminé par une équation semi-empirique :

$$T(\theta) = 1 / (1 + b\tau / \mu) \quad (1.23)$$

avec :

$$b\tau = b_m \tau_m + b_p \tau_p \quad (1.24)$$

b_m, b_p sont des coefficients de rétrodiffusion, qui peuvent être calculés de la manière suivante :

$$b_x = 0.5 (1 - g_x) \quad (1.25)$$

Comme nous avons vu dans le paragraphe précédent, la transmittance totale de l'atmosphère est la somme de la transmittance directe et de la transmittance diffuse aussi bien pour l'éclairement solaire que pour la visée :

$$T(\theta) = e^{-\tau/\mu} + t_d(\theta) \quad (1.26)$$

d'où on peut déduire :

$$t_d(\theta) = T(\theta) - e^{-\tau/\mu} \quad (1.27)$$

• Détermination de S

L'albédo sphérique de l'atmosphère est calculé, dans le logiciel 5S, par l'équation:

$$S = b'\tau \frac{1 - e^{-4b'\tau}}{1 + b'\tau} \quad (1.28)$$

avec : $b' = 1 - g$ (1.29)

II-2-3. Influence de l'environnement

Dans le cas où la réflectance de l'environnement, R_e , est différente de celle de la cible, la réflectance apparente doit être modifiée et se met sous la forme:

$$R^* = R_a(\theta_s, \theta_v, \phi_v) + R \frac{T(\theta_s) e^{-\tau/\mu_v}}{1 - R_e S} + R_e \frac{T(\theta_s) t_d(\theta_v)}{1 - R_e S} \quad (1.30)$$

Si la réflectance de l'environnement n'est pas homogène, on doit définir R_e en tenant compte de la fonction d'environnement $F(r)$ et la distribution spatiale de la réflectance de l'environnement $R(r, \phi)$. $R(r, \phi)$ est la réflectance du sol en un point de coordonnées polaires r, ϕ , le point visé étant pris comme origine. Soit :

$$R_e = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} R(r, \phi) \frac{dF(r)}{dr} dr d\phi \quad (1.31)$$

avec :

$$F(r) = \frac{t_{dm}(\theta_v) F_m(r) + t_{dp}(\theta_v) F_p(r)}{t_{dm}(\theta_v) + t_{dp}(\theta_v)} \quad (1.32)$$

Où $t_{dm}(\theta_v)$ et $t_{dp}(\theta_v)$ sont les fonctions de transmission diffuse respectivement pour les diffusions de Rayleigh et de Mie. $F_m(r)$ et $F_p(r)$ sont les fonctions d'environnement pour ces deux types de diffusion (Deschamps et al., 1984):

$$F_m(r) = 1 - (0.930 e^{-0.082r} + 0.070 e^{-1.102r}) \quad (1.33)$$

$$F_p(r) = 1 - (0.375 e^{-0.202r} + 0.625 e^{-1.832r}) \quad (1.34)$$

II-2-4. Prise en compte de l'absorption gazeuse

L'effet de l'absorption gazeuse se manifeste dans le calcul du signal d'une cible au niveau du satellite le long des trajets soleil-sol et sol-satellite. Théoriquement cet effet est combiné avec les effets de la diffusion moléculaire et de la diffusion par les aérosols, ce qui est très gênant pour les calculs. On peut heureusement simplifier le problème, et traiter séparément ces différents effets tout en maintenant une bonne précision dans les estimations.

Parmi les gaz atmosphériques, l'ozone est localisé à des altitudes où les molécules et les aérosols sont déjà très raréfiés, on peut considérer que la lumière traversant cette couche ne subit pratiquement pas de diffusion. Pour les autres gaz, leurs bandes d'absorption n'apparaissent qu'à des longueurs d'onde où la diffusion moléculaire est négligeable et il ne subsiste plus que la diffusion par les aérosols. Par conséquent, la modélisation du signal, au niveau du satellite, peut se faire tout d'abord sans tenir compte de l'effet d'absorption gazeuse et en multipliant ensuite le résultat par le coefficient de transmission gazeuse, calculé le long des doubles trajets soleil-sol et sol-satellite.

Dans le logiciel 5S, la transmission spectrale des quatre gaz est calculée avec un intervalle spectral de 5nm en appliquant le modèle de bande aléatoire de Goody et les modèles de bande régulière de Malkmus pour la vapeur d'eau et les autres gaz respectivement. La transmission totale des gaz est le produit des transmissions de chacun des gaz considérés.

II-3. Détermination des paramètres atmosphériques d'entrée du modèle transfert radiatif

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, pour calculer la réflectance apparente d'une cible, on doit connaître les caractéristiques de l'atmosphère, les types d'aérosols présents et leurs concentrations. Dans un modèle atmosphérique, les profils

de température et de pression sont peu importants, ceux des gaz sont bien déterminés et stables dans le temps et dans l'espace sauf pour la vapeur d'eau et l'ozone. De plus, Tanré et al. (1981) ont montré qu'on pouvait ne tenir compte que de la quantité intégrée de vapeur d'eau et d'ozone avec une très bonne précision. Donc la détermination du modèle atmosphérique devient celle des quantités intégrées de vapeur d'eau et d'ozone et des aérosols.

II-3-1. Détermination de la quantité intégrale de vapeur d'eau et d'ozone

La quantité de vapeur d'eau varie dans le temps et dans l'espace. Elle peut être déterminée précisément à partir d'un radiosondage (Bartell, 1987) ou estimée en utilisant l'humidité au sol et un profil relatif moyen de teneur en vapeur d'eau (Bartell, 1987).

La quantité d'ozone varie également dans le temps et dans l'espace, mais elle est bien déterminée en un endroit et à un moment donnés (Junge 1963). Deux méthodes peuvent être utilisées pour la déterminer. La première consiste à utiliser les résultats de mesures climatologiques comme les tableaux présentés par King et Byrnr (1976), London et al. (1976) (tableau 1.2). Il y a peu de différence entre ces différents tableaux. La deuxième méthode consiste à mesurer le flux direct du soleil dans la bande étroite centrée sur $0.6\mu\text{m}$. L'influence de l'ozone sur l'atténuation du rayonnement direct du soleil peut être considérée comme une épaisseur optique de plus, qui s'ajoute à celles qui sont dues aux diffusions de Rayleigh et de Mie. L'épaisseur optique de l'ozone est proportionnelle à la quantité d'ozone multipliée par un coefficient (coefficient d'absorption) qui a été déterminé par Kastner (1985).

Tableau 1.2.: Quantité d'ozone (en atm.cm) (d'après London et al., 1976)

| Latitudes | J. | F. | M. | A. | M. | J. | J. | A. | S. | O. | N. | D. |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 25-35N | .28 | .30 | .20 | .30 | .30 | .28 | .27 | .26 | .26 | .26 | .26 | .26 |
| 35-45N | .32 | .34 | .34 | .34 | .32 | .31 | .29 | .28 | .27 | .26 | .28 | .30 |
| 45-55N | .35 | .38 | .40 | .38 | .36 | .33 | .31 | .29 | .28 | .28 | .30 | .32 |

Dans le cas où il n'y a pas de mesures effectuées, on peut utiliser les quantités de vapeur d'eau et d'ozone proposées dans les modèles standards d'atmosphères. (Tableau 1.3)

Tableau 1.3: Quantités de vapeur d'eau et d'ozone utilisées dans la version standard du modèle "5S".

| Modèle d'atmosphère | H ₂ O (g/cm ²) | O ₃ (atm.cm) |
|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| Tropicale | 4.12 | 0.247 |
| Latitudes moyennes été | 2.93 | 0.319 |
| Latitudes moyennes hiver | 0.853 | 0.395 |
| Subarctique été | 2.102 | 0.346 |
| Subarctique hiver | 0.419 | 0.480 |
| US Standard 62 | 1.424 | 0.344 |

II-3-2. Détermination de la concentration des aérosols Détermination de l'épaisseurs optiques spectrales des aérosols

Les aérosols sont caractérisés par leur forme qui est supposée en général sphérique, leur granulométrie $n(r)$, leur indice de réfraction complexe m_{-jk} et leur épaisseur optique. Les 3 premiers facteurs dépendent du type d'aérosol et sont difficiles à déterminer expérimentalement. Les épaisseurs optiques sont, par contre, directement mesurables.

Les épaisseurs spectrales des aérosols sont généralement déterminées à l'aide de mesures de rayonnement direct du soleil. Elles sont réalisées en utilisant un radiomètre visant directement le soleil.

D'après la loi de Beer, le rayonnement direct monochromatique du soleil, en l'absence d'absorption gazeuse, est donné par:

$$E = E_0 e^{-\tau m} \quad (1.35)$$

$$m = 1/[\cos(\theta_s) + 0.15(93.885 - \theta_s)^{-1.253}] P/1013 \quad (1.36)$$

avec :

- m : Masse d'air (calculée d'après Suckling et Hay, 1976)
- $m = \sec(\theta_s)$ lorsque $\theta_s < 70^\circ$
- P : Pression au sol en mb
- E : Eclairement direct mesuré
- E_0 : Eclairement solaire hors de l'atmosphère
- τ : Epaisseur optique de l'atmosphère

Sous forme logarithmique, l'équation (1.35) s'écrit :

$$\ln(E) = \ln(E_0) - \tau m \quad (1.37)$$

Si on trace une courbe en prenant m comme abscisse et $\ln(E)$ comme l'ordonnée, on aura une droite, la droite de Langley-Bouguer, avec la pente $-\tau$.

Ainsi on peut décomposer l'épaisseur optique totale de l'atmosphère, τ , en épaisseurs optiques de Rayleigh (τ_m) et des Aérosols (τ_p) :

$$\tau = \tau_m + \tau_p \quad (1.38)$$

et τ_m peut être calculé à partir de l'équation (1.8) .

Pour avoir une bonne précision de mesures de τ , différents facteurs doivent être pris en compte. Le radiomètre utilisé doit avoir des réponses parfaitement linéaires et indépendantes de la température. Les bandes spectrales doivent être bien choisies pour éviter l'absorption des gaz et doivent être suffisamment étroites (une dizaine de nm) pour éviter les effets dus à la réponse spectrale du détecteur. Le radiomètre doit avoir une ouverture de champ assez faible (de l'ordre 2°) pour éviter de capter le rayonnement diffus autour du soleil. Les mesures doivent être effectuées à différentes hauteurs du soleil pour avoir une grande variation de la masse d'air, et les conditions atmosphériques doivent être stables du début jusqu'à la fin des mesures.

Si on utilise un radiomètre bien étalonné en absolu, et si on connaît E_0 pour la distance moyenne terre-soleil, on peut effectuer une seule mesure pour calculer τ , soit:

$$\tau = [\ln(E_0) + \ln(D_s) - \ln(E)]/m \quad (1.39)$$

II-3-3. Détermination du type d'aérosol

En s'appuyant sur certaines hypothèses et théories, la granulométrie et l'indice de réfraction sont estimées en utilisant les paramètres optiques des aérosols comme les épaisseurs optiques spectrales, la fonction de phase, et le taux de polarisation.

• *Modèle de King*

La granulométrie $n(r)$ est en général caractérisée par la loi de Junge (1955) nécessitant deux paramètres:

$$n(r) = C r_0^{-\nu} \quad \text{si } r < r_0 \quad (1.40)$$

$$n(r) = C r^{\nu} \quad \text{si } r > r_0 \quad (1.41)$$

où C est une constante.

En utilisant la dépendance spectrale des épaisseurs optiques, King et al. (1978) ont développé une méthode numérique pour l'estimation de $n(r)$ pour $r < 4\mu\text{m}$. La relation entre $\tau_m(\lambda)$ et $n(r)$ peut s'écrire :

$$\tau_m(\lambda) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{\text{ext}}(r, \lambda, m) n(r) dr \quad (1.42)$$

où $Q_{\text{ext}}(r, \lambda, m)$ est le coefficient d'extinction calculé par la théorie de Mie (Yamamoto et Tanaka, 1969, cité par King et al., 1978). En remplaçant l'intégrale par une somme de série en r , on peut avoir une relation linéaire entre $\tau_m(\lambda)$ et $n(r)$, et ensuite minimiser l'écart entre la partie gauche ($\tau_m(\lambda)$ mesurée) et la partie droite calculée en utilisant la méthode des moindres carrés pour calculer $n(r)$.

• *Modèle de Santer*

La méthode développée par Santer (1984) permet d'estimer la granulométrie pour les grosse particules et l'indice de réfraction. Elle est basée sur les mesures de la fonction de phase des aérosols et du taux de polarisation de la lumière.

La diffusion des grosse particules des aérosols est concentrée autour du soleil. La connaissance de la fonction de phase des aérosols permet d'estimer la granulométrie des grosses particules ($r > 2\mu\text{m}$). Sur ce principe, Santer (1983) a développé une méthode pour ce calcul. Les mesures ayant été réalisées à une longueur d'onde égale à $0.85\mu\text{m}$ pour éviter la diffusion de Rayleigh, le signal mesuré est alors proportionnel à

$$e^{-(\tau_p m)} \tau_m m P_p(\theta) \quad (1.43)$$

En prenant τ_p déterminé à partir de l'équation (1.38), $P_p(\theta)$ est alors déterminé. L'inversion de $P_p(\theta)$ donnera le $n(r)$ pour les grosse particules.

La détermination de l'indice de réfraction complexe m_{-jk} peut se faire à partir de mesures de rayonnement diffus et du taux de polarisation dans le plan vertical contenant le soleil, à deux longueurs d'ondes ($0.85\mu\text{m}$ et $1.65\mu\text{m}$). Le principe consiste à faire varier les valeurs de m_{-jk} et de $\tau_p(1.65\mu\text{m})$, et à calculer la fonction de phase et le taux de polarisation. Les valeurs de m_{-jk} et de $\tau_p(1.65\mu\text{m})$ correctes seront obtenues quand l'écart entre les données mesurées et celles qui sont calculées, est minimum.

II-4 Conclusion du paragraphe

Ce paragraphe montre qu'il existe trois phénomènes d'interaction, entre l'atmosphère et le rayonnement dans le visible et le proche infrarouge: l'absorption (essentiellement par les gaz), la diffusion Rayleigh (causée par les molécules et les particules de petite taille) et la diffusion de Mie (causée par les aérosols). Ainsi l'atmosphère modifie l'intensité, et la distribution spectrale et directionnelle de l'éclairement du soleil au niveau du sol. Pour la luminance de la surface dans la direction d'observation du satellite, l'atmosphère va d'une part diminuer le signal utile, d'autre part ajouter des composantes

produites par la réflexion de l'atmosphère et de l'environnement de la cible visée. La simulation du signal d'une surface au niveau de satellite peut se faire en utilisant un modèle de transfert radiatif comme 5S.

Certaines composantes de l'atmosphère sont stables spatialement et quasiment invariables temporellement comme O_2 , CO_2 , N_2 etc., et bien déterminés par le calcul du transfert radiatif. La quantité d'ozone peut être estimée avec une précision suffisante à partir des données expérimentales déjà obtenues par de nombreux scientifiques. Les deux composantes les plus variables spatialement et temporellement sont la vapeur d'eau et les aérosols. La première peut être déterminée à partir de radiosondages météorologiques. Pour la deuxième, les mesures au sol sont indispensables, et la méthode la plus utilisée et celle qui consiste à mesurer le rayonnement direct du soleil avec un photomètre multibandes (principe de la droite de Langley-Bouger)

III - LA CARACTERISATION DE LA REFLECTANCE AU SOL

III-1. Les mesures radiométriques au sol

III-1-1. Les radiomètres

Les radiomètres de terrain sont des appareils portatifs, le plus souvent autonomes et destinés à mesurer l'éclairement et la luminance d'objets dans des bandes spectrales particulières. Ils possèdent quatre éléments :

- le système optique, qui définit l'angle d'ouverture du radiomètre;
- le détecteur qui transforme l'énergie radiative qu'il reçoit en un signal électrique;
- les filtres dont la transmission spectrale est combinée avec la réponse spectrale des détecteurs pour définir la réponse spectrale des radiomètres;
- le système de traitement du signal, qui applique des fonctions de transformations définies au signal électrique délivré par le détecteur afin d'obtenir, en sortie, les données désirées (luminance, éclairement, réflectance).

Les radiomètres de terrain multibandes les plus utilisés sont équipés de photodiodes au silicium fonctionnant en mode photovoltaïque (simulation de LANDSAT MSS, de SPOT, et des canaux 1, 2, 3, 4 de Thematic Mapper). Pour les mesures de luminance effectuées au voisinage du sol, les radiomètres sont équipés de diaphragmes donnant un angle d'ouverture de 15° (radiomètre Exotech; Exotech, 1980) ou 12° (radiomètre de Simulation de SPOT, Guyot et al., 1984). Pour les mesures effectuées à plus grande distance, les diaphragmes sont remplacés par des lentilles qui donnent un angle d'ouverture de 1° .

Un autre type de radiomètre commercialisé est le radiomètre modulaire multibande à courant alternatif qui possède 8 bandes simulant Thematic Mapper (Robinson et al., 1979)

III-1-2. Méthodes de mesure

• *Mesure de l'éclairement :*

L'éclairement peut être déterminé par 4 méthodes différentes. On peut le déterminer en remplaçant les diaphragmes ou lentilles du radiomètre par des diffuseurs et en visant le ciel après la mesure de la luminance (Exotech, 1980), ou en utilisant un autre radiomètre équipé des diffuseurs visant le ciel simultanément avec la mesure de luminance (Duggin, 1980, 1982, Duggin et Cunia, 1983). La mesure de l'éclairement peut se faire également en visant un panneau de référence avec le même radiomètre après avoir visé une cible. La meilleure méthode consiste à mesurer simultanément l'éclairement et la luminance avec deux têtes spécialisées qui sont connectées à un seul boîtier électronique (Guyot et al., 1984). Cela permet d'éviter toutes les erreurs introduites par la non-correspondance dans le temps des mesures de l'éclairement et de la luminance et supprime aussi les fluctuations des mesures dues aux variations temporelles de l'éclairement.

• *Mesure de la luminance :*

On procède par échantillonnage. L'angle d'ouverture et la hauteur du radiomètre au dessus du sol définissent la dimension de surface observée. La taille de l'échantillonnage nécessaire pour caractériser la réflectance moyenne d'une surface donnée doit tenir compte de la variabilité spatiale des mesures et de la précision voulue.

III-2. Etalonnage des mesures radiométriques avec un radiomètre de terrain multibande

III-2-1. Méthodes d'étalonnage

En général, le rapport des tensions de sortie correspondant aux mesures de la luminance et de l'éclairement, n'est pas égal à la réflectance. On doit appliquer un coefficient multiplicatif (coefficient d'étalonnage du radiomètre) à ce rapport. Il est déterminé lors de l'étalonnage du radiomètre. Selon la méthode de mesure de l'éclairement qui est utilisée, la méthode d'étalonnage est différente.

Si on mesure simultanément la luminance et l'éclairement au dessus d'un panneau étalonné, la réflectance est le rapport de ce deux mesures multiplié par le coefficient d'étalonnage du radiomètre (Guyot 1985), soit :

$$R_i = C_i * (V_{Li}/V_{Ei}) \quad (1.44)$$

avec : C : Coefficient d'étalonnage du radiomètre
 V_E : Valeur numérique de mesure de l'éclairement
 V_L : Valeur numérique de mesure de la luminance
 R : Réflectance du panneau de référence
 i : Numéro de la bande spectrale

Le coefficient d'étalonnage du radiomètre qui est obtenu par visée d'un panneau de référence, est alors :

$$C_i = (V_{E_{Pi}}/V_{L_{Pi}}) * R_{Pi} \quad (1.45)$$

ici, P Indique les paramètres liés au panneau de référence. Duggin (1980) a remarqué que ce coefficient varie en fonction de l'angle zénithal du soleil à cause de la non-isotropie de la réponse de diffuseur.

Si on mesure alternativement le sol et un panneau de référence, avec le même radiomètre, le coefficient d'étalonnage est alors :

$$C_i = R_{Pi} * (V_{L_i}/V_{L_{Pi}}) \quad (1.46)$$

On voit bien que la clé de l'étalonnage des mesures de réflectance est la connaissance de la réflectance du panneau de référence utilisé, R_{Pi} .

III-2-2. Panneau de référence

Les trois types de panneaux de référence les plus utilisés sont les panneaux de sulfate de baryum, ou de halon, et la "Kodak neutral test card" (Palmer, 1982). En général ce sont les panneaux blancs (réflectance voisine de 100%) qui sont utilisés, mais Philipson et al., (1989) ont montré qu'il vaut mieux utiliser des panneaux gris afin d'éviter de changer le gain du radiomètre entre les mesures sur la cible et sur le panneau. Cela permet de diminuer l'erreur due à la non-linéarité du détecteur pour certains radiomètres. Un panneau de référence peut être considéré comme azimutalement homogène, et sa réflectance hémisphérique directionnelle spectrale ou la réflectance directionnelle hémisphérique spectrale, $R(H/0)$ est en général fournie par le fabricant. Elle est mesurée à l'aide d'un spectro-photomètre équipé d'une sphère intégrante. La meilleure précision des mesures correspond actuellement à un écart-type de la réflectance absolue égale à 0.005 (Jackson et al. 1987).

Cependant la réflectance mesurée par un radiomètre est plutôt la réflectance bidirectionnelle, on doit la déduire à partir de la réflectance hémisphérique directionnelle, $R(H/0)$. Si la réponse du panneau est lambertienne, ces deux réflectances sont égales, mais malheureusement ce n'est généralement pas le cas. L'écart entre les réflectances bidirectionnelle et hémisphérique directionnelle peut atteindre $\pm 25\%$ (Jackson et al. 1987, Biggar et al. 1988, Leshkevich 1988).

Comme toutes les mesures sur un panneau sont effectuées verticalement, le radiomètre est donc toujours placé perpendiculairement au panneau, la réflectance du panneau à connaître est donc la réflectance bidirectionnelle pour θ_r égal à 0, soit $R(\theta_i/0)$. On a aussi :

$$\begin{aligned}
 R(H/0) &= 2 \int_0^{\pi/2} R(\theta_i/0) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i \\
 &= 2 \int_0^{\pi/2} R(0/0) * K(\theta_i/0) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i \\
 &= 2 R(0/0) \int_0^{\pi/2} K(\theta_i/0) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i \quad (1.47)
 \end{aligned}$$

avec $K(\theta_i/0)$ réponse directionnelle du panneau. Une fois que $K(\theta_i/0)$ est déterminé, $R(0/0)$ est donné par le quotient de $R(0/H)$ et de la partie intégrale de l'équation (1.47).

La mesure du $K(\theta_i/0)$ a fait l'objet de nombreuses d'études. Jackson et al. ont placé le panneau de référence dans un système goniométrique dans les conditions naturelles pour avoir différents angles d'incidence du rayonnement solaire, et a mesuré la réponse du panneau avec un radiomètre de terrain. Seul l'éclairement direct a été considéré en retranchant l'éclairement diffus de l'éclairement global. L'éclairement diffus est obtenu en plaçant entre le panneau et le soleil un écran opaque monté à l'extrémité d'un bras de 3 mètres de long. Cette méthode utilise l'éclairement naturel et le même radiomètre qui est employé sur le terrain (avec le même champs de visée (FOV) et les mêmes bandes spectrales). Les résultats sont ainsi directement applicables pour les mesures radiométriques de terrain. Mais cette méthode nécessite de très bonnes conditions météorologiques, sans nuages et avec une très bonne visibilité, ce qui est souvent difficile à obtenir. C'est pour cela que Biggar et al. (1988) ont utilisé une méthode de laboratoire avec un goniomètre et une illumination avec une lampe quartz halogène à filament de tungstène. Le même type de travail a été réalisé par Leshkevich (1988) mais avec un lampe à ruban de tungstène. Biggar et al. (1988) ont analysé les inconvénients de la méthode de laboratoire :

- 1: Le champ du radiomètre est limité à 1° au lieu de 15° pour un radiomètre de terrain à cause de la dimension de panneau de référence utilisé;
- 2: L'éclairement sur le panneau n'est pas homogène spatialement, et le spectre de l'éclairement est très différent par rapport du soleil ce qui provoque le déplacement du centre spectral des bandes du radiomètre (près de 6nm pour les filtre de 100nm de largeur comme XS1 de SPOT)

La comparaison des mesures à l'extérieur et au laboratoire montre que l'écart maximum est de $\pm 2\%$ en réflectance absolue et de $\pm 1.3\%$ si on corrige le déplacement du centre des bandes spectrales.

Dans les conditions naturelles, l'éclairement se compose non seulement de lumière directe du soleil mais aussi du rayonnement diffus du ciel qui émet dans toutes les directions. La réflectance vraie du panneau sera ainsi différente de la réflectance bidirectionnelle. Ainsi pour connaître la réflectance du panneau, il sera nécessaire de tenir compte de la contribution de la lumière diffuse afin d'atteindre la précision que l'on souhaite.

III-3. Les facteurs qui perturbent les mesures au sol

Les facteurs qui perturbent les mesures ont trois origines différentes : l'instrument, la méthode de mesure et les conditions expérimentales (Guyot, 1989).

III-3-1. Perturbation dues à l'instrument

Différents facteurs perturbateurs sont liés à l'instrument utilisé.

• *Linéarité de la réponse*

Les détecteurs qui sont utilisés dans les radiomètres sont choisis de manière à avoir une réponse linéaire pour l'ensemble de la gamme des flux de rayonnement qui devront être mesurés. Par contre, dans certains radiomètres (Exotech, Barnes), les amplificateurs n'ont pas une réponse linéaire dans l'ensemble de la gamme de mesure et il est nécessaire de changer les gains de manière à avoir toujours un signal de sortie compris entre 1 et 5 V pour les radiomètres Exotech et Barnes. Dans les radiomètre Cimel (Guyot et al., 1984), les amplificateurs ont été choisis de manière à avoir une très grande dynamique et une réponse linéaire dans toute la gamme de mesure sans changer le gain.

• *Courant d'obscurité*

La majorité des radiomètres possèdent un réglage du zéro (sauf le radiomètre Exotech 100A). Il faut donc le contrôler en masquant les entrées des différents canaux, surtout pour les mesures sur une surface de faible luminance.

• *Dérive thermique*

Les mesures qui ont été effectuées sur les radiomètres équipés de photodiodes au silicium (Jackson et Robinson 1985, Slater 1985) montrent que ces appareils ne présentent pratiquement pas de dérive thermique. Par contre, les radiomètres équipés de cellules au sulfure de plomb peuvent présenter une assez grande sensibilité à la température. Dans ce cas, il est nécessaire de mesurer la température interne du boîtier et d'appliquer une correction de température.

En plus de ces 3 facteurs, la différence entre le champ de visée réel et le champ nominal et les effets de parallaxe introduisent également certaines perturbations dans les mesures.

III-3-2 Perturbation liées à la méthode de mesures

III-3-2-1 Effet de la méthode de détermination de l'éclairement

Parmi les quatre méthodes pour déterminer l'éclairement (III-1-2), la première est très lourde et n'est utilisée pratiquement plus. La méthode basée sur la visée d'un panneau ne peut être utilisée que dans les conditions où l'éclairement est très stable. La variation de l'éclairement est fonction de la hauteur du soleil et des conditions atmosphériques. La hauteur du soleil introduit une variation de basse fréquence qui est minimum autour de midi solaire local, par contre, la variation des conditions atmosphériques peut introduire une variation de haute fréquence qui peut atteindre 100% durant 5 minutes (Lord et al. 1985). On doit donc être très prudent si on effectue les mesures en visant alternativement la cible et le panneau.

L'utilisation de deux radiomètres ou de deux têtes de mesures permet d'éviter le problème dû à la variation de l'éclairement mais nécessite une bonne précision de l'inter-étalonnage entre eux.

Comme nous l'avons vu précédemment, un panneau de référence n'est pas lambertien. De même les capteurs du radiomètre mesurant l'éclairement ne sont pas équipés de diffuseurs parfaits et n'ont pas une réponse exactement proportionnelle au cosinus de l'angle d'incidence du rayonnement solaire (Guyot et al. 1984). Le même type de correction que celle qui est décrite pour calculer la réflectance du panneau doit être effectué. Cette influence est généralement ignorée par beaucoup d'utilisateurs.

III-3-2-2. Effets de l'échantillonnage spatial

La réflectance que l'on veut déterminer est celle d'une surface dont les dimensions sont données. Cependant la dimension spatiale de la visée d'un radiomètre est limitée par le champ du radiomètre et la hauteur de mesure, (en général 2m ou 2.5m). Par conséquent, on doit effectuer un échantillonnage spatial, défini par la dimension de la visée, le nombre total de mesures possibles et la variabilité spatiale des mesures, pour estimer la réflectance moyenne de la surface.

Lorsque la surface visée par le radiomètre est petite, on met alors en évidence la variabilité locale qui se superpose à la variabilité propre de la surface étudiée. Ainsi l'accroissement de la taille de la zone visée s'accompagne d'une décroissance du coefficient de variation jusqu'à une valeur asymptotique. Celle-ci est atteinte lorsque la zone visée constitue un échantillon représentatif de la surface étudiée (Guyot 1980, 1984, 1989)(Figure 1.12).

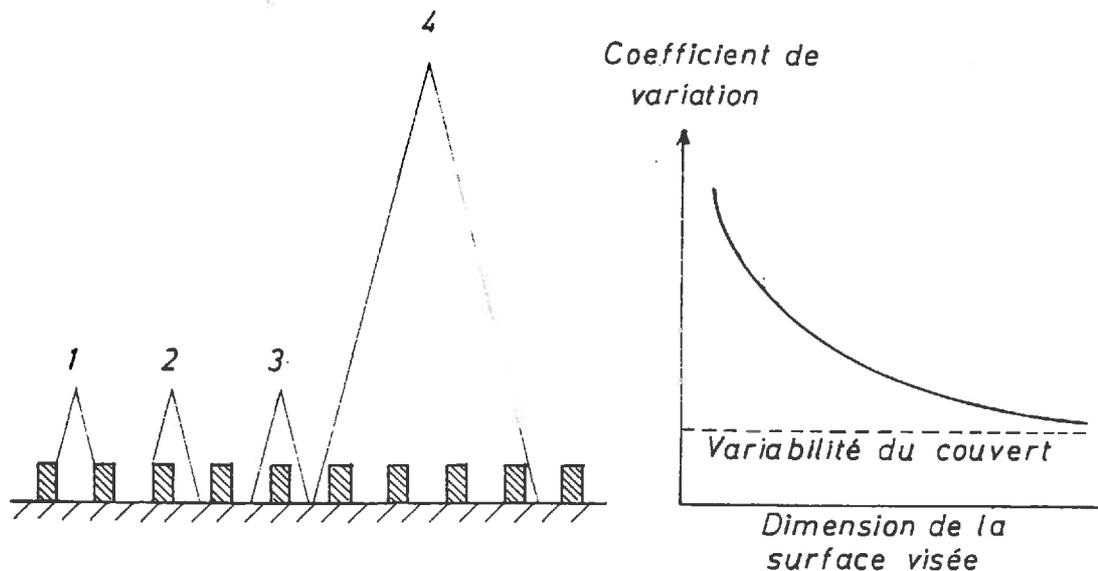


Figure 1.12.: Représentation schématique de l'effet de la surface visée sur la variabilité de la mesure (1), (2), (3): mesures effectuées au même niveau en visant une surface de petite dimension. (4): mesures effectuées sur une surface de plus grande dimension. (d'après Guyot, 1984)

En supposant une distribution gaussienne de la population, la précision de la réflectance moyenne peut être caractérisée par le coefficient de variation de l'échantillon divisé par \sqrt{N} . N étant le nombre de mesures. L'augmentation du nombre de mesures diminue l'incertitude sur la moyenne estimée. Suivant la variabilité spatiale de la surface, le nombre nécessaire pour atteindre une précision donnée est différent (Hatfield et al, 1985; Curran et Williamson, 1985, 1986; Curran et Hay 1986).

Plus récemment Webster et al (1989) ont mis en évidence l'influence de la répartition de ces mesures sur la précision de la moyenne obtenue. Ils ont utilisé la méthode du variogramme pour évaluer la meilleure distance entre 2 mesures successives.

III-3-2-3. Effets de l'orientation et de l'inclinaison de la visée

La réflectance mesurée par un satellite peut correspondre à une visée oblique: θ_r et ϕ_r ne sont pas égaux à 0. Par exemple l'angle de visée d'un pixel de l'image Landsat-TM varie entre $\pm 5^\circ$, $\pm 30^\circ$ pour l'image SPOT-HRV et $\pm 50^\circ$ pour l'image NOAA-AVHRR. Mais en général, la mesure au sol est effectuée verticalement, et une surface naturelle n'est pas lambertienne (Guyot et al. 1980; Guyot, 1980). La différence entre la mesure en visée verticale à l'aide du radiomètre et la réflectance oblique que l'on veut connaître pourra être très importante dans le plan du soleil et relativement plus faible dans le plan perpendiculaire au plan du soleil.

III-3-2-4. Effets de l'environnement

Kimes et al. (1983) ont étudié les effets des objets proches sur la mesure du facteur de réflectance en fonction de l'angle solide qu'ils sous-tendent lorsqu'ils sont vus depuis la

surface visée. Les résultats de calculs montrent qu'une personne vêtue de blanc et agenouillée à 0.5 m de la surface visée produit une erreur de 18% pour une longueur d'onde de 800nm et un angle solaire zénithal de 75°, mais seulement de 2% si la personne porte des vêtements sombres. En plus de cet effet, Che et al. (1985) ont mis en évidence l'effet des surfaces entourant la surface mesurée. Ils montrent que l'éclairement sera différent au-dessus d'un champ du blé et au dessus d'une surface de sol nu. Cela peut être expliqué théoriquement par la modélisation de Deschamps et al. (1983) qui montrent qu'une partie de l'éclairement au sol est le produit de l'albédo de l'atmosphère et la luminance de l'environnement, qui est elle-même proportionnelle à son albédo.

III-3-3. Facteurs perturbateurs liés aux conditions expérimentales

III-3-3-1. Position du soleil

La réflectance que l'on cherche correspond à une position du soleil bien déterminée (celle qui correspond au passage du satellite). Cependant la mesure de la réflectance au sol a besoin d'un certain intervalle de temps pour l'échantillonnage spatial durant laquelle la position du soleil varie. De plus le centre de l'intervalle de mesure peut être différent de celui qui correspond à l'heure de passage du satellite, pour des raisons de facilité expérimentale (mesures au midi solaire).

La variation de l'angle zénithal du soleil a un double effet. D'une part elle cause une variation de l'éclairement de basse fréquence, d'autre part elle produit éventuellement une variation de la réflectance de l'objet mesuré. Par exemple, les travaux de Guyot (1980), Kimes (1983) ont permis de montrer que la réflectance de couverts végétaux augmente dans le visible et diminue dans le proche infrarouge lorsque le soleil s'élève au-dessus de l'horizon.

Pour une surface qui a une structure en rangs ou est située sur une pente, en plus de l'effets de l'angle zénithal du soleil, la variation de l'angle azimutal du soleil va également perturber la réflectance.

III-3-3-2. Effets de la nébulosité

Les aérosols atmosphériques varient beaucoup temporellement et spatialement. Cette variation peut non seulement produire une variation de l'éclairement de haute fréquence mais également une variation du rapport de l'éclairement diffus à l'éclairement direct. Ce rapport modifie la valeur de la réflectance observée d'une cible non lambertienne comme un couvert naturel. Les même effets vont être produits par la présence de nuage dans le ciel (Lord et al. 1985a , Guyot 1980)

III-3-3-3. Effets de la vitesse du vent

Le vent modifie la géométrie d'un couvert végétal. Il change l'orientation des feuilles et en agitant les plantes ou en les couchant, il permet de découvrir une portion plus ou

moins importante des tige et du sol sous-jacent. Cela se traduit un changement de la réflectance moyenne de la surface et un accroissement sensible de la variabilité spatiale de la réflectance.

IV - CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Les analyses quantitatives, multitemporelles et multi-systèmes des images satellitaires nous demandent, non seulement de prendre en compte les effets de l'atmosphère, de la hauteur du soleil et de la topographie, mais également de connaître les coefficients d'étalonnage et d'inter-étalonnage des capteurs avec lesquels les images ont été acquises. L'analyse de la bibliographie permet de constater que de tels travaux sont très peu nombreux, la majorité des étalonnages sur site test utilisant des vérités terrains étant effectués sur un seul site test aux Etats Unis. Il apparaît donc nécessaire d'entreprendre d'autres travaux dans ce domaine afin de comparer les résultats obtenus par différentes méthodologies et de mettre au point des solutions opérationnelles.

Les méthodes d'étalonnage absolu sont nombreuses mais c'est la méthode du site-test qui est la plus efficace pour les capteurs du type de SPOT-HRV ou LANDSAT-TM. L'inter-comparaison des données satellitaires se fait généralement par des régressions entre les images des capteurs, ce qui n'est pas suffisamment précis et la meilleure solution consiste à les analyser sur un site-test bien caractérisé. La méthode du site-test s'appuie sur la connaissance de la réflectance de la surface et des conditions atmosphériques. La luminance de la surface au niveau de satellite est simulée à l'aide d'un modèle du transfert radiatif utilisant ces connaissances.

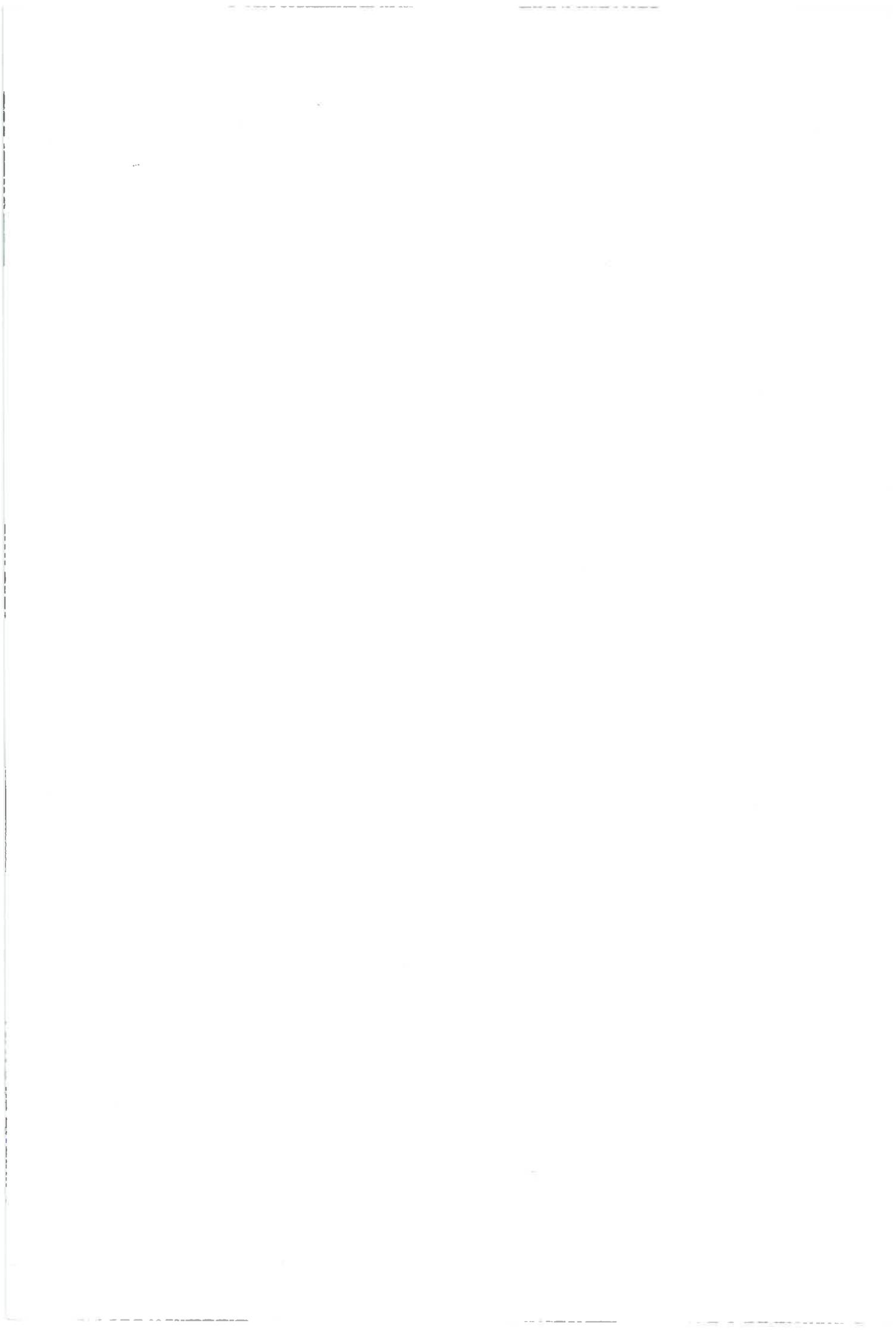
La mise en oeuvre de la méthode du site-test en France nous demande donc de :

- choisir un site test et de le caractériser pour les besoins de l'étalonnage des capteurs satellitaires;
- mettre au point une méthodologie pour obtenir la meilleure estimation de la réflectance de la surface observée par le satellite en réalisant les mesures radiométriques avec un radiomètre multibande portable;
- choisir et justifier la méthode de caractérisation des conditions atmosphériques et un modèle du transfert radiatif;

Pour valider la méthode du site-test pour l'étalonnage des satellites, nous devons réaliser des campagnes de mesure pour déterminer la réflectance et les paramètres atmosphériques au moment de passage du satellite, et acquérir les images.

Pour l'inter-comparaison des données satellitaires, nous devons réaliser des campagnes quand les satellites concernés passent simultanément au dessus du site. De plus il est nécessaire de mettre au point des méthodes permettant d'avoir les coefficients d'inter-

étalonnage avec une bonne précision. Et d'évaluer l'importance des autres effets affectant la relation entre les images d'une même surface, acquise, par différents capteurs.



DEUXIEME PARTIE

**CARACTERISATION DES PROPRIETES
OPTIQUES DU SITE D'ETALONNAGE DES
SATELLITES - LA CRAU**



INTRODUCTION

La méthode du site test pour l'étalonnage et l'inter-comparaison des données satellitaires est basée sur des mesures de réflectance au sol nécessitant une précision aussi grande que possible. Ainsi, il est très important que ces mesures soient faites avec un radiomètre bien étalonné, sur une surface dont les propriétés optiques soient stables dans l'espace et dans le temps et avec une méthodologie soigneusement élaborée. Dans ce chapitre, nous allons donc présenter successivement:

- la méthode d'étalonnage développée et sa validation
- le choix du site d'étalonnage et la variabilité spatiale, spectrale, angulaire et temporelle de sa réflectance
- une analyse des sources d'erreurs des mesures de réflectance, les moyens utilisés pour les réduire et un bilan des erreurs associées à la méthodologie de mesure qui a été choisie.

I - ETALONNAGE DES MESURES DE LA REFLECTANCE

Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, la réflectance d'une surface est déterminée à partir de la mesure de sa luminance et de l'éclairement. L'éclairement est déterminé soit indirectement en utilisant un panneau de référence, soit directement à l'aide d'une tête de mesure de l'éclairement. La première méthode nécessite de placer un panneau de référence près de la surface visée et de connaître sa réflectance au moment de chaque mesure de luminance; La deuxième méthode nécessite également l'usage d'un panneau de référence, mais de façon ponctuelle pour vérifier l'étalonnage du radiomètre. Dans tous les cas, la précision des mesures de réflectance dépend essentiellement de la connaissance de la réflectance du panneau.

I-1 Réflectance bidirectionnelle des panneaux

Comme les panneaux de référence ne sont pas parfaitement lambertiens et comme les mesures pour l'étalonnage sont toujours effectuées perpendiculaire au panneau, on doit donc connaître sa réflectance bidirectionnelle, ou plus précisément la réflectance du panneau correspondant à chaque angle d'incidence du rayonnement solaire pour une visée perpendiculaire à sa surface. Cela nécessite de procéder en deux étapes successivement:

Mesurer la réponse directionnelle du panneau, $K(\theta_i)$, pour une visée du radiomètre perpendiculaire à la surface (soit $\theta_r=0$), en fonction de l'angle d'incidence de l'éclairement θ_i ;

Calculer la réflectance bidirectionnelle du panneau $R(\theta_i, \theta_r=0)$, en utilisant $K(\theta_i)$ et la réflectance hémisphérique-directionnelle du panneau $R(H/0)$;

. *Méthode de mesure de la réponse directionnelle des panneaux*

La méthode qui a été utilisée est similaire à celle décrite par Biggar et al. (1988). Basée sur la loi de réciprocité, on a ainsi fait varier l'angle de visée θ_r au lieu de l'angle d'incidence θ_i en utilisant un système goniométrique.

Le panneau à mesurer est fixé dans le plan de l'axe de rotation du système goniométrique. Une lampe halogène de 1000 W a été placée à 80 cm du panneau et l'éclaire perpendiculairement. Pour mesurer la luminance du panneau sous différents angles de visée, un radiomètre Cimel avec un champ de visée de 1° est installé sur le bras pivotant du goniomètre. La distance entre le front du radiomètre et le centre du panneau est de 70 cm, ce qui donne une surface de visée sur le panneau de 1.2 cm de diamètre quand il est perpendiculaire au panneau.

La mesure de la luminance du panneau a été faite pour des angles de visée de 15° à 70° avec un intervalle de 5° ou 10° . Elle a été réalisée dans deux sens (cotés gauche et droit de la lampe) pour éliminer les erreurs éventuelles dues au fait que le panneau peut ne pas être tout à fait perpendiculaire au faisceau lumineux émis par la lampe.

Avant d'effectuer les mesures goniométriques, l'homogénéité de l'éclairement du panneau a été vérifiée en explorant la surface qu'il occupe à l'aide d'un photomètre (mesures selon une grille placée sur un panneau de même dimension que le panneau de référence). Par ailleurs, le panneau de référence ayant une réflectance pratiquement constante dans tout le domaine spectral considéré (figure 2.1), l'effet du déplacement spectral du centre des bandes du radiomètre, causé par la température de couleur de la lampe utilisée, a pu être négligé.

La méthode de mesure décrite précédemment a été appliquée pour des panneaux recouverts de Halon, de $BaSO_4$ et de peinture glycérophtalique blanche mate. Pour le panneau recouvert de Halon, on connaît la réflectance hémisphérique-directionnelle $R(H/0^\circ)$ fournie par le constructeur (Labsphere). Son spectre de réflectance a été déterminé avec un spectrophotomètre à sphère intégrante en utilisant comme référence une tuile de céramique servant d'étalon secondaire de réflectance. La réflectance du panneau recouvert de sulfate de baryum a été déterminée par comparaison avec le dernier panneau recouvert de Halon. Le panneau recouvert de peinture glycérophtalique blanche a été utilisé uniquement pour vérifier la réciprocité de la réponse. Ainsi, sur ce panneau on a non seulement mesuré la variation angulaire de la luminance pour un éclairement normal à la surface, mais on a également déterminé la

variation de la luminance avec une visée du radiomètre normale à la surface et un angle d'incidence variable de l'éclairément (rotation de l'ensemble panneau - radiomètre devant la source lumineuse).

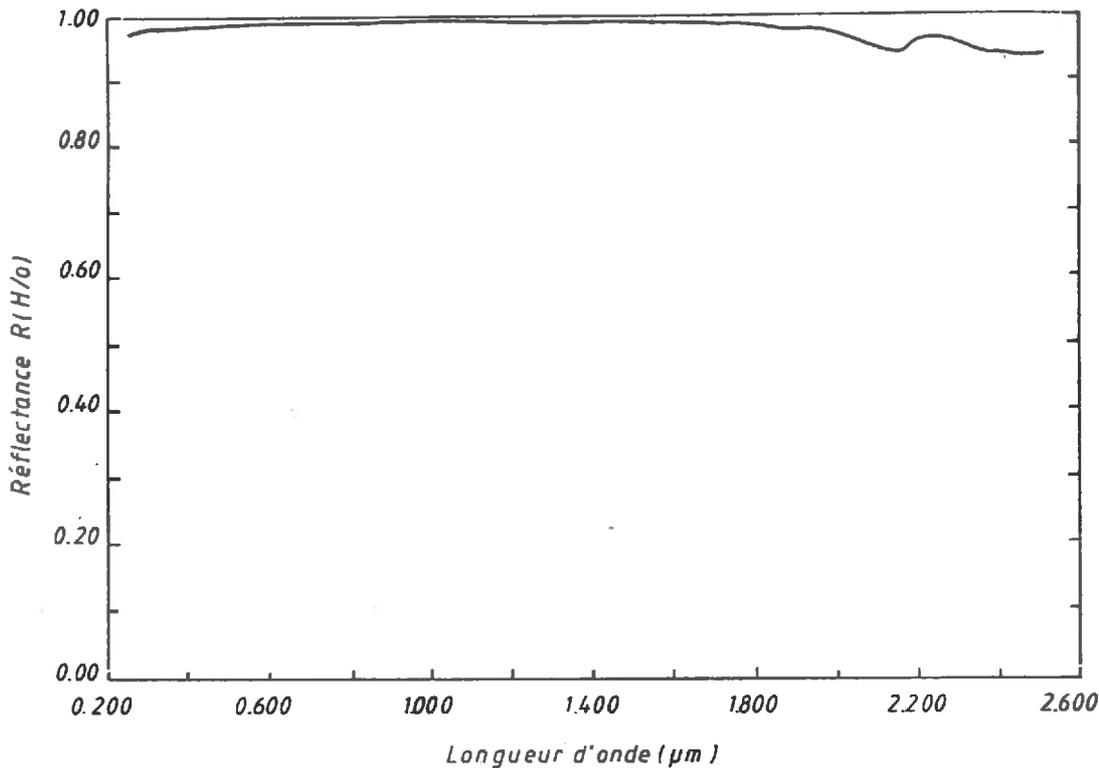


Figure 2.1 : Réflectance spectrale du panneau de Halon utilisé

. Vérification de la réciprocité

Les résultats des mesures sur le panneau recouvert de peinture blanche sont présentés sur la figure 2.2. Chaque point représente une moyenne de 6 mesures (répétées 3 fois de chaque côté). On voit que la réponse directionnelle du panneau mesuré en faisant varier l'angle de visée est très proche de celle qui est obtenue en faisant varier l'angle d'incidence de l'illumination. L'écart entre ces deux séries de mesures est plus important pour des grands angles de visée ou d'incidence, avec un maximum de $\pm 5\%$ en valeur relative. Cette écart est dû essentiellement à la méthode utilisée, et est, a priori introduit par l'incertitude sur les mesures correspondant à une variation de l'angle d'incidence, car :

- Lors de la rotation du panneau, l'axe de rotation n'est pas tout à fait tangent à la

surface visée par la radiomètre ce qui entraîne une légère variation de la distance lampe - panneau. Comme cette distance est relativement faible (70 cm) une variation de 1 cm de celle-ci introduit une erreur sur la luminance de 3%.

- Lorsque l'angle d'incidence est grand, on a besoin d'une très bonne précision sur sa mesure. Il suffit d'une erreur de 1° pour produire une erreur de 3% sur la luminance quand θ_r est égal à 60° .
- La luminance du panneau est très faible pour des grands angles d'incidence. Elle est par exemple, 3 fois plus petite pour une visée sous un angle de 70° que sous un angle de 10° . L'imperfection de la linéarité du radiomètre et l'imprécision de la lecture pour les faibles luminances vont ainsi pouvoir introduire des erreurs sur la détermination de la luminance.
- De plus la géométrie d'éclairage (lampe non colimatée) est différente de la géométrie de visée (1° d'ouverture)

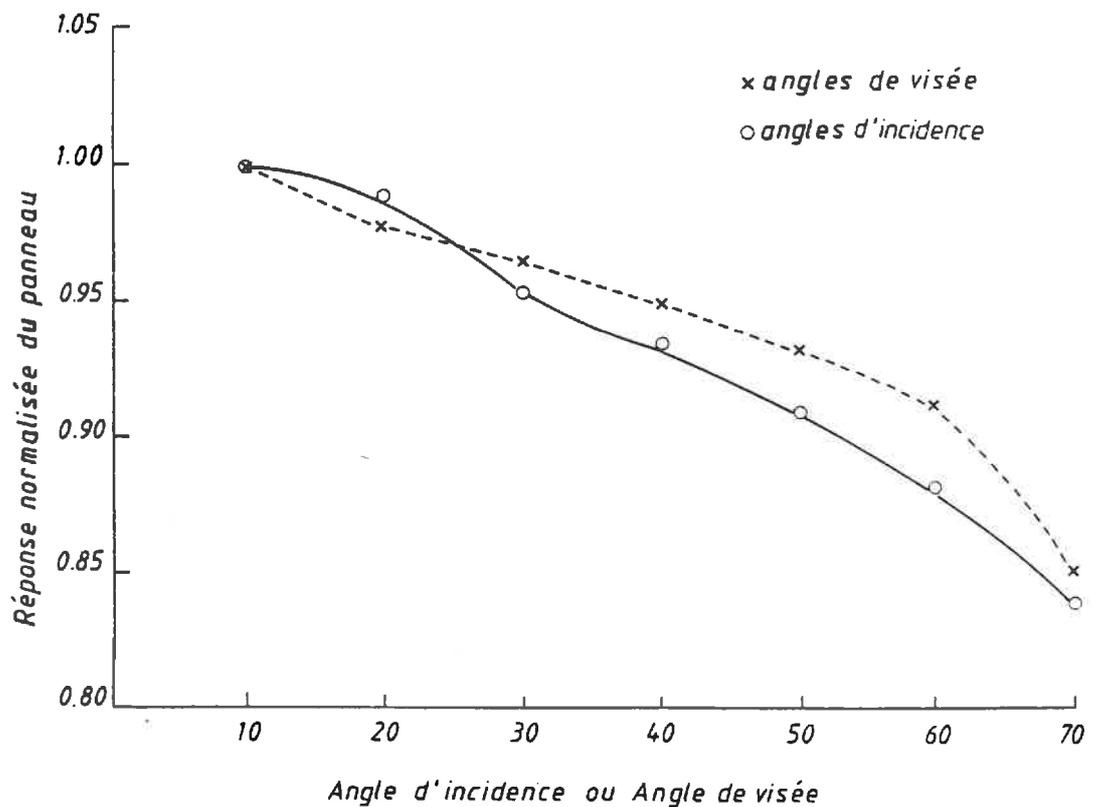


Figure 2.2 : Variation relative de la réponse directionnelle d'un panneau en fonction de l'angle d'incidence ou de l'angle de visée (normalisée par rapport à la réponse correspondant à un angle d'incidence ou de visée égale à 10°) (mise en évidence de la réciprocité)

. Réponse directionnelle du panneau de Halon et du panneau de $BaSO_4$

Le figure 2.3 représente les résultats des mesures sur les panneaux recouverts de $BaSO_4$ et de Halon. Chaque point correspond à la moyenne de 6 mesures (répétée 3 fois de chaque coté).

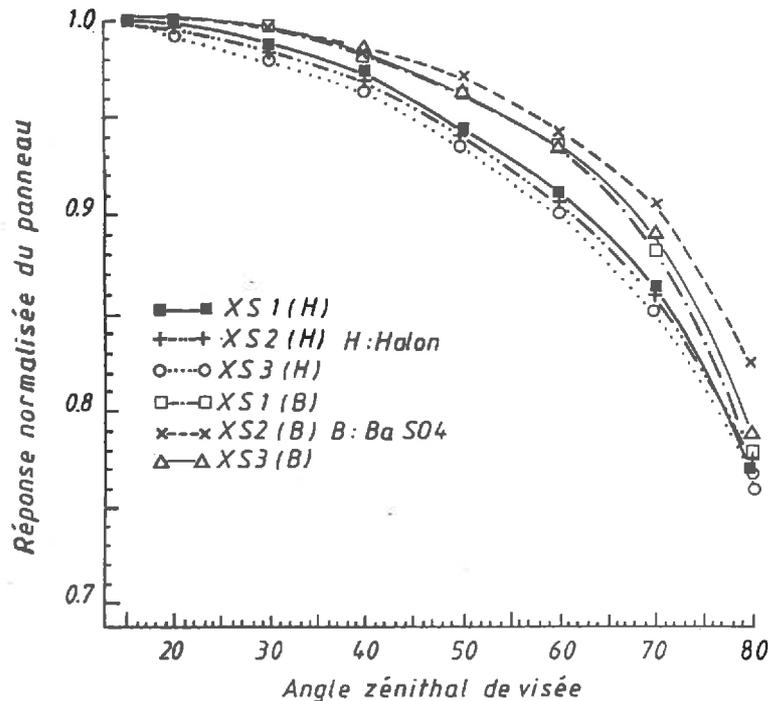


Figure 2.3 : Variation relative de la tension de sortie du radiomètre correspondant aux mesures effectuées sur les panneaux avec différent angles de visée (valeurs normalisées par la tension correspondant à une visée verticale)

Deux types de régressions ont été utilisées pour représenter la loi de la variation de luminance en fonction de l'angle de visée:

$$V(\theta_r) = V_0 + a \theta_r + b \theta_r^2 + c \theta_r^3 \quad (2.1)$$

$$\text{et } V(\theta_r) = V_0 + a \cos(\theta_r) + b \cos^2(\theta_r) \quad (2.2)$$

avec V : Tension délivrée par la tête de mesure de la luminance visant le panneau
 θ_r : Angle de visée
 V_0, a, b, c : Coefficients d'ajustement

La première est celle qui est proposée par Jackson et al. (1987), la deuxième permet d'éviter l'intégration numérique au niveau des calculs. L'examen montre que les résultats de ces deux méthodes sont identiques.

On remarque pour l'équation :

$$V(0) = V_0 + a + b \quad (2.3)$$

qu'elle correspond à la tension que délivrerait le radiomètre s'il visait le panneau selon sa normale, ce qui ne peut pas être mesurée à cause des ombres portées.

Si on normalise les deux membres de l'équation par $V(0)$, on a:

$$V(\theta_r)/V(0) = V_0/V(0) + a/V(0) \cos(\theta_r) + b/V(0) \cos^2(\theta_r)$$

soit

$$K(\theta_r) = V_0' + a' \cos(\theta_r) + b' \cos^2(\theta_r) \quad (2.4)$$

avec $K(\theta_r) = V(\theta_r)/V(0)$, $V_0' = V_0/V(0)$,

et $a' = a/V(0)$, $b' = b/V(0)$

Les coefficients de l'ajustement sont donnés dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1: Coefficients de l'ajustement des données expérimentales à l'équation 2.2.

| | BaSO ₄ | | | Halon | | |
|------------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | XS1 | XS2 | XS3 | XS1 | XS2 | XS3 |
| V ₀ | 49.50 | 90.69 | 107.41 | 54.31 | 93.65 | 112.28 |
| a | 32.66 | 42.98 | 54.40 | 30.75 | 52.86 | 63.02 |
| b | -15.44 | -17.75 | -22.88 | -11.14 | -18.76 | -21.09 |
| Coef. corrél | 0.92 | 0.89 | 0.92 | 0.95 | 0.95 | 0.95 |
| V(0) | 66.71 | 115.92 | 138.94 | 73.91 | 127.75 | 154.21 |
| V ₀ ' | 0.7420 | 0.7824 | 0.7731 | 0.7349 | 0.7331 | 0.7281 |
| a' | 0.4895 | 0.3708 | 0.3916 | 0.4160 | 0.4138 | 0.4087 |
| b' | -0.2315 | -0.1531 | -0.1646 | -0.1507 | -0.1469 | -0.1369 |

En comparant les valeurs $K(\theta_r)$ pour les 3 canaux et pour le même panneau, on trouve qu'il n'y a pas de différences significatives. Aussi, avons-nous calculé les valeurs moyennes des coefficients d'ajustement normalisés pour les 3 canaux et les rapports des valeurs de $V(0)$ pour les deux panneaux (Tableau 2.2).

Tableau 2.2: Valeurs moyennes des coefficients d'ajustement de la loi représentant la variation angulaire de la luminance des panneaux et les valeurs moyennes du rapport des tensions délivrées pour des visées normales des panneaux recouverts de Halon (H) et de $BaSO_4$ (B).

| | V_0' | a' | b' | $V(0)^H/V(0)^B$ | | |
|----------|--------|--------|---------|-----------------|-------|-------|
| | | | | XS1 | XS2 | XS3 |
| $BaSO_4$ | 0.7658 | 0.4173 | -0.1831 | | | |
| Halon | 0.7320 | 0.4128 | -0.1448 | 1.108 | 1.102 | 1.110 |

. *Calcul de la réflectance bidirectionnelle $R(\theta_i/0)$*

La réflectance bidirectionnelle $R(\theta_i/0)$ a été définie par:

$$R(\theta_i/0) = K(\theta_i/0) R(0/0) \quad (2.5)$$

Selon la loi de réciprocité et l'équation 2.4, on a

$$K(\theta_i/0) = K(0/\theta_i) = K(\theta_r) \quad (2.6)$$

soit:

$$K(\theta_i/0) = V_0' + a' \cos \theta_i + b \cos^2 \theta_i \quad (2.7)$$

D'après l'équation 1.46 et l'équation 2.7, on a

$$\begin{aligned} R(0/0) &= R(H/0) / \int_0^{\pi/2} 2 K(\theta_i/0) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i \\ &= R(H/0) / K(H/0) \end{aligned} \quad (2.8)$$

avec

$$\begin{aligned}
K(H/0) &= \int_0^{\pi/2} 2 K(\theta_i/0) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i \\
&= \int_0^{\pi/2} 2 [V_0' + a' \cos(\theta_i) + b' \cos^2(\theta_i)] \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i \\
&= V_0' + \frac{2}{3} a' + \frac{1}{2} b'
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Soit:

$$R(\theta_i/0) = K(\theta_i/0) R(H/0) / K(H/0) \tag{2.10}$$

Tableau 2.3: Valeurs des paramètres $R(H/0)$ et $R(0/0)$ pour les panneaux recouverts de $BaSO_4$ et de Halon.

| | BaSO ₄ | | Halon | |
|-----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | R(H/0) ⁴ | R(0/0) ³ | R(H/0) ¹ | R(0/0) ² |
| XS1 | 0.9127 | 0.9582 | 0.9925 | 1.0617 |
| XS2 | 0.9176 | 0.9634 | 0.9925 | 1.0617 |
| XS3 | 0.9115 | 0.9570 | 0.9930 | 1.0623 |

1 : fourni par le fabricant (Labsphère)

2 : calculé à partir de l'équation (2.8).

3 : calculé à partir de $R(0/0)$ pour le Halon et en tenant compte de $V(0)^H/V(0)^B$

4 : calculé à partir de $R(0/0)$ de BaSO₄

Rappelons ici que $R(H/0)$ est la réflectance hémisphérique-directionnelle du panneau, qui a été discutée dans le paragraphe III-2-1 du premier chapitre.

Les valeurs de $K(H/0)$ sont de 0.9525, 0.9348 pour les panneaux de BaSO₄ et de Halon respectivement. Les valeurs de $R(H/0)$ et de $R(0/0)$ sont présentées dans le tableau 2.3 (Les paramètres pour calculer $K(\theta_i/0)$ ont été présentés dans le tableau 2.2)

I-2 Influence de l'éclairement diffus, nouveau modèle pour calculer la réflectance d'un panneau

La réflectance d'un panneau sera égale à $R(\theta_i/0)$ s'il reçoit l'éclairement uniquement sous l'angle d'incidence θ_i . Mais, en réalité, il existe une partie de l'éclairement plus ou moins importante provenant de toutes les directions de l'hémisphère du ciel. Pour évaluer l'influence de cette contribution sur la réflectance du panneau, nous avons utilisé les éclairagements directionnels simulés pour calculer la réflectance du panneau, et ensuite comparer celle-ci avec $R(\theta_i/0)$.

. Simulation de la distribution directionnelle de l'éclairement

La simulation a été faite par un logiciel développé par Deuzé et al. (1989) du L.O.A. Le modèle d'atmosphère C et le modèle continental d'aérosols ont été utilisés pour le calcul. Pour avoir toute les possibilités de distribution directionnelle de l'éclairement, la simulation a été faite pour 3 angles zénithaux du soleil (25.1°, 47.3°, 65.9°, correspondant au midi solaire à la fin juin, à la mi-mars (ou mi-septembre) et à la fin décembre à Avignon), 4 concentrations en aérosol différentes qui correspondent aux visibilités horizontales 10, 23, 50, 999 km, et 3 longueurs d'ondes qui correspondent aux centres des bandes SPOT (550, 650, 850nm).

Les résultats fournis par le logiciel sont sous la forme d'une série Fourier. Les exemples de distribution directionnelle de l'éclairement diffus sont présentés sur la figure 2.4. Pour faciliter l'intégration numérique entre l'éclairement directionnel et la réponse directionnelle du panneau, on a calculé la luminance du ciel pour 24 angles zénithaux (de 2.84° à 88.14°) et pour 19 demi plans dont les angles relatifs par rapport au plan du soleil vont de 0° à 180° avec un intervalle de 10°.

. Calcul de la réflectance du panneau

Dans le cas où il n'y a pas d'éclairement diffus, la réflectance du panneau sera, bien évidemment égale à la réflectance bidirectionnelle $R(\theta_i/0)$, qui est simplement la réflectance $R(0/0)$ multipliée par la réponse directionnelle du panneau normalisée $K(\theta_i/0)$ (équation 2.10).

Pour un éclairage diffus anisotrope $E(\phi_i, \theta_i)$, la réflectance du panneau correspondant à une visée verticale d'un radiomètre, R, sera :

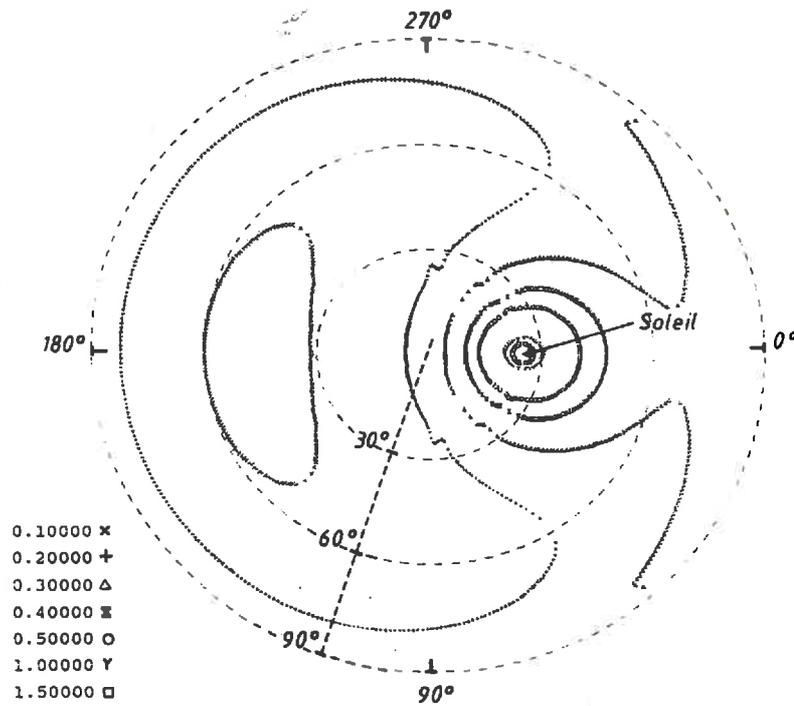


Figure 2.4a : Distribution angulaire de la luminance monochromatique du ciel (éclairage diffus) pour une constante solaire égale à π et pour un angle zénithal 25.1° . Les cercles concentriques représentent les angles zénithaux du soleil, et les graduations extérieures correspondent aux angles azimuthaux par rapport au soleil

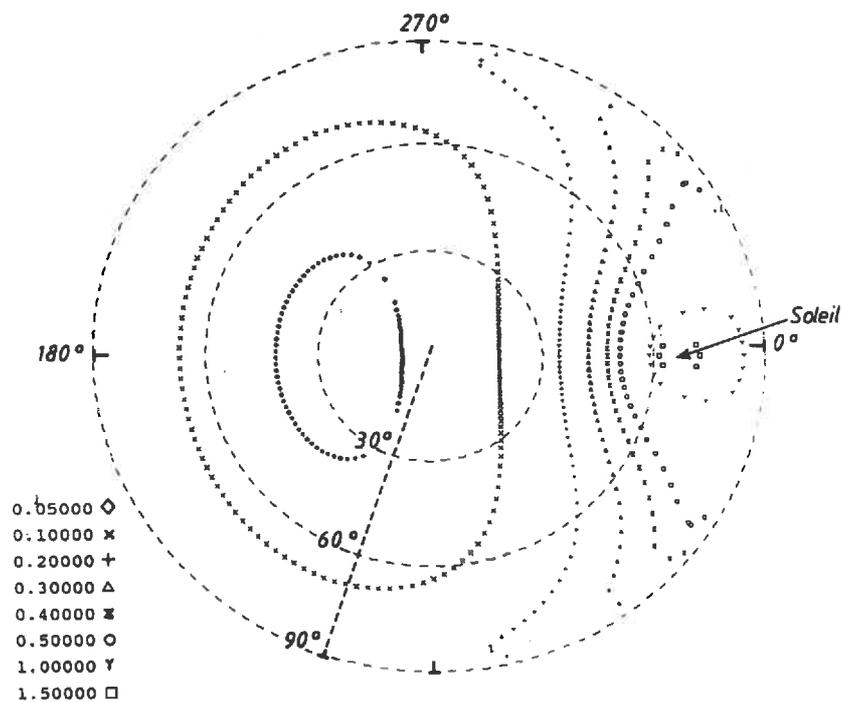


Figure 2.4b : Distribution angulaire de la luminance monochromatique du ciel (éclairage diffus) pour une constante solaire égale à π et pour un angle zénithal 65.9° . Les cercles concentriques représentent les angles zénithaux du soleil, et les graduations extérieures correspondent aux angles azimuthaux par rapport au soleil

$$R = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} R(\theta_i/0) E(\phi_i, \theta_i) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} E(\phi_i, \theta_i) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i} \quad (2.11)$$

L'intégrale située au dénominateur correspond à l'éclairement total, que l'on peut noter E_T . De plus, on peut écrire $E(\phi_i, \theta_i)$ comme l'addition des composantes directe $E'_{\text{dir}}(\phi_i, \theta_i)$ et diffuse $E'_{\text{dif}}(\phi_i, \theta_i)$, soit:

$$E(\phi_i, \theta_i) = E'_{\text{dir}}(\phi_i, \theta_i) + E'_{\text{dif}}(\phi_i, \theta_i) \quad (2.12)$$

Supposons que $E'_{\text{dif}}(\phi_i, \theta_i)$ est isotrope, c'est-à-dire qu'il soit indépendant de la direction, on peut démontrer:

$$\begin{aligned} R &= \frac{1}{E_T} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} R(\theta_i/0) E(\phi_i, \theta_i) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i \\ &= R(\theta_s/0) E'_{\text{dir}}(0, \theta_s) \Omega_s / E_T + R(H/0) E'_{\text{dif}}(\phi_i, \theta_i) 2\pi / E_T \\ &= R(\theta_s/0) E_{\text{dir}}/E_T + R(H/0) E_{\text{dif}}/E_T \end{aligned} \quad (2.13)$$

avec: Ω_s angle solide du soleil vu de la terre
et $E_{\text{dir}} = E'_{\text{dir}}(0, \theta_s) \Omega_s$, $E_{\text{dif}} = E'_{\text{dif}}(\phi_i, \theta_i) 2\pi$

On remarque que E_{dir} , E_{dif} sont respectivement les éclairagements direct et diffus reçu par le sol, et:

$$E_T = E_{\text{dir}} + E_{\text{dif}} \quad (2.14)$$

$$E_{\text{dir}}/E_T = 1 - E_{\text{dif}}/E_T \quad (2.15)$$

Tableau 2.4: Résultats des calculs effectués pour le panneau recouvert de BaSO₄, pour le canal XS1 de SPOT1-HRV

| θ_s | VIS | π | $K(\theta_s)$ | E_T | $\frac{E_{\text{dif}}}{E_T}$ | R | F1 | F2 | F3 |
|------------|-----|-------|---------------|-------|------------------------------|--------|-------|-------|-------|
| 25.1 | 10 | .5268 | .9935 | .8348 | .3937 | 0.9805 | -1.31 | 0.33 | -0.49 |
| 25.1 | 23 | .3296 | .9935 | .8526 | .2617 | 0.9842 | -0.94 | 0.15 | -0.40 |
| 25.1 | 50 | .2376 | .9935 | .8604 | .1904 | 0.9861 | -0.75 | 0.04 | -0.36 |
| 25.1 | 999 | .0948 | .9935 | .8604 | .0522 | 0.9904 | -0.32 | 0.10 | -0.11 |
| 47.3 | 10 | .5268 | .9646 | .5913 | .4726 | 0.9561 | -0.88 | -0.29 | -0.59 |
| 47.3 | 23 | .3296 | .9646 | .6143 | .3210 | 0.9578 | -0.70 | -0.30 | -0.50 |
| 47.3 | 50 | .2376 | .9646 | .6251 | .2360 | 0.9590 | -0.58 | -0.28 | -0.43 |
| 47.3 | 999 | .0948 | .9646 | .6338 | .0696 | 0.9619 | -0.28 | -0.19 | -0.47 |
| 65.9 | 10 | .5268 | .9057 | .3086 | .6538 | 0.9213 | 1.72 | -1.51 | 0.11 |
| 65.9 | 23 | .3296 | .9057 | .3334 | .4536 | 0.9145 | 0.98 | -1.34 | -0.18 |
| 65.9 | 50 | .2376 | .9057 | .3468 | .3423 | 0.9115 | 0.65 | -1.11 | -0.46 |
| 65.9 | 999 | .0948 | .9057 | .3658 | .1150 | 0.9074 | 0.19 | -0.40 | -0.11 |

- θ_s : Angle zénithal d'incidence du soleil
 VIS : Visibilité horizontale météorologique (en km)
 E_T : Eclaircissement total au sol normalisé, à l'éclaircissement incident sur une surface perpendiculaire aux rayons solaires hors de l'atmosphère
 E_{dif}/E_T : Rapport de l'éclaircissement diffus à l'éclaircissement total
 R : Réflectance réelle du panneau, calculée en prenant compte de la réponse directionnelle du panneau, de la non-isotropie de l'éclaircissement diffus (utilisation de l'équation (2.11))
 F1 : Erreur résiduelle en % (par rapport de la réflectance réelle du panneau, R) sur la réflectance bidirectionnelle du panneau $R(\theta_i/0)$, estimée en tenant compte de sa réponse directionnelle mais sans tenir compte de l'influence de l'éclaircissement diffus (utilisation de l'équation (2.10))
 F2 : Erreur résiduelle en % (par rapport de la réflectance réelle du panneau, R) sur la réflectance du panneau estimée en tenant compte de sa réponse directionnelle, et de l'influence de l'éclaircissement diffus mais en supposant qu'il est isotrope (utilisation de l'équation (2.13))
 F3 : Moyenne de F1 et F2, dont l'intérêt sera discuté un peu plus loin.

. Résultats

Le tableau 2.4 présente les résultats de calculs pour le panneau BaSO_4 dans la bande XS1 de HRV. R a été calculé par l'équation (2.11), qui peut être considérée comme la réflectance réelle du panneau. L'intégrale a été calculée par intégration numérique en utilisant l'éclairement du ciel simulé et la réflectance directionnelle du panneau. Les résultats du calcul utilisant l'équation (2.10) et l'équation (2.13) sont présentés dans les colonnes F1, F2 respectivement. Au lieu de les présenter en réflectance absolue, nous avons calculé la différence relative par rapport à la réflectance réelle R pour faciliter la comparaison.

On remarque que:

1. La réflectance d'un panneau dans un milieu naturel est différente suivant l'angle d'incidence de la lumière. Cette différence peut dépasser 8% lorsque l'angle zénithal du soleil passe de 25° à 66° . (voir la colonne R)
2. L'éclairement diffus a une influence non négligeable sur la réflectance du panneau. La variation de la réflectance d'un panneau, pour un même angle zénithal d'incidence du soleil, θ_s , peut atteindre 1.4% suivant les conditions atmosphériques (voir la colonne R).
3. L'écart entre les réflectances réelles du panneau et ses réflectances bidirectionnelles est toujours supérieur à $\pm 0.6\%$ sauf pour une atmosphère sans aérosols. Toutefois si des mesures sont effectuées dans les conditions naturelles sans tenir compte de l'effet du rayonnement diffus, la dispersion des mesures d'un jour à l'autre, selon les conditions atmosphériques, pourra varier de -1.3% à $+1.7\%$. (voir la colonne F1)
4. Après la correction prenant en compte un rayonnement diffus isotrope, l'erreur résiduelle est inférieure à 0.5% pour les angles zénithaux du soleil inférieurs à 48° (colonne F2). Pour les angles supérieurs à 48° , l'erreur résiduelle est très importante et supérieure à celle qui est commise lorsqu'on ne prend pas en compte le rayonnement diffus (sauf pour une visibilité très mauvaise: $\text{vis} = 10\text{km}$). Cela peut être expliqué par le fait que la lumière diffuse est toujours plus forte autour du soleil qu'ailleurs, et que le rayonnement diffus autour du soleil doit être plutôt considéré comme un rayonnement direct. Cela montre qu'il est nécessaire de donner un faible coefficient de pondération pour l'effet du rayonnement diffus. D'ailleurs, nous constatons que pour les faibles angles zénithaux, F1 est négatif, F2 est positif, contrairement à ce qui est observé pour les grands angles zénithaux. Pour cette raison, les moyennes de F1 et F2 sont listées dans la colonne F3.

5. Globalement F3 est inférieur à 0.6% dans tous les cas. De plus, on remarque que F3 est presque toujours négatif et l'écart relatif pour différentes conditions (hauteur du soleil, visibilité) est faible (la dispersion maximale est de 0.7% au lieu de 3.03% pour F1 et 1.84% pour F2) Ainsi, l'équation qui peut être utilisée pour calculer la réflectance d'un panneau peut s'écrire:

$$R = 0.5 \{R(0/0) K(\theta_s) + R(0/0) K(\theta_s) [1 - E_{\text{dif}}/E_T] + R(0/0) K(H/0) E_{\text{dif}}/E_T\}$$

$$= R(0/0) K(\theta_s) [1 - 0.5 E_{\text{dif}}/E_T] + 0.5 R(0/0) K(H/0) E_{\text{dif}}/E_T]$$

(2.16)

I-3 Validation

Afin de valider notre modèle de calcul de la réflectance d'un panneau de référence dans un milieu naturel, nous avons effectué une journée de mesures en Crau avec un radiomètre de simulation de SPOT sur le panneau BaSO₄. Le principe de cette validation consiste à comparer la valeur du rapport des tensions délivrées par les têtes de mesures de la luminance et de l'éclairement à la réflectance qui est calculée à l'aide de l'équation (2.16). Après correction des mesures d'éclairement, le rapport des tensions doit être proportionnel à la réflectance du panneau (le coefficient de proportionnalité étant le coefficient d'étalonnage du radiomètre). Ainsi, si le calcul de la réflectance du panneau en fonction de l'angle zénithal du soleil et du pourcentage de rayonnement solaire diffus est correct, on doit obtenir, dans une bande spectrale donnée, une valeur constante du coefficient d'étalonnage du radiomètre quel que soient l'état de l'atmosphère et le moment auquel la mesure est effectuée.

Pour avoir une bonne précision de mesure, la tête pour la mesure de l'éclairement a été fixée sur un trépied, et celle pour la mesure de la luminance a été positionnée pour viser le panneau verticalement. Les horizontalités de la tête pour la mesure de l'éclairement et du panneau ont été contrôlés avec un niveau de précision. Les valeurs de mesures de l'éclairement et de la luminance, et l'heure de mesure ont été enregistrées en utilisant une centrale d'acquisition de données. Le rapport des éclairements diffus et total a été mesuré régulièrement à l'aide d'un cache.

La réponse de la tête pour la mesure de l'éclairement ne suit pas parfaitement le loi de cosinus (Guyot et al., 1984). Ainsi, sur un panneau, la variation des rapports de la luminance à l'éclairement mesurés dépend non seulement de la variation de la réflectance du panneau mais aussi de la réponse directionnelle de la tête pour la mesure de l'éclairement. Pour corriger cet effet, nous avons mesuré la réponse directionnelle de la tête pour la mesure de l'éclairement en faisant varier l'angle d'incidence relatif du soleil à l'aide d'un goniomètre. Seule la composante directe a été prise en considération, ce qui est obtenu en retranchant la composant diffuse de l'éclairement total. Les

résultats sont présentés dans le figure 2.5.

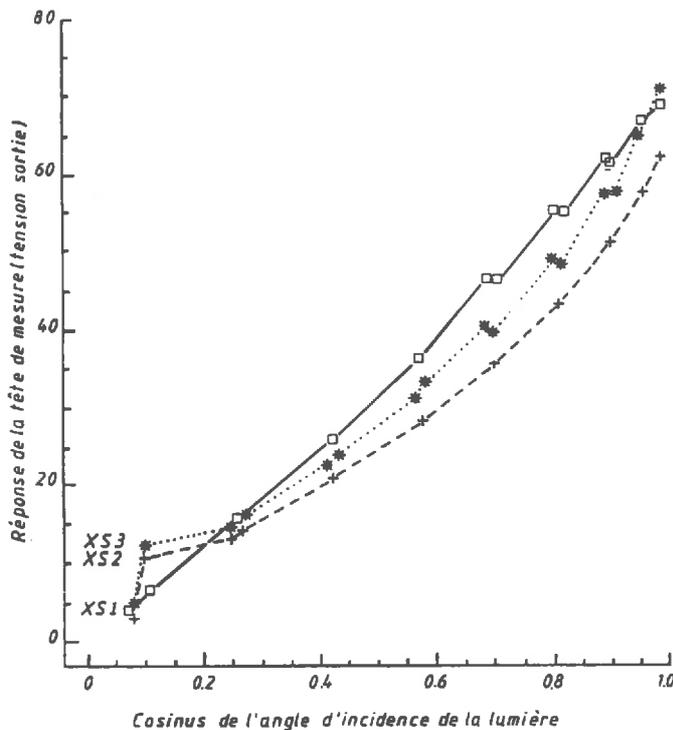


Figure 2.5 : Variation de la réponse en cosinus de la tête pour la mesure de l'éclairement.

La figure 2.6. représente la variation, pendant une journée, des rapports de la tension de sortie correspondant à la mesure de la luminance sur le panneau et celle correspondant à la mesure de l'éclairement. Les variations sont dues aux variations de la réflectance du panneau et de la réponse directionnelle de la tête pour la mesure de l'éclairement.

La figure 2.7a représente la variation des réflectances du panneau après la correction de réponse directionnelle de la tête pour la mesure de l'éclairement. On peut constater que la variation de réflectance est très importante (plus de 7% en relatif). La réflectance du panneau calculée par l'équation (2.16) est présentée sur la figure 2.7b.

La figure 2.8 représente la variation des rapports entre la réflectance du panneau calculée et celle mesurée par le radiomètre, après la correction de l'éclairement (les coefficients d'étalonnage du radiomètre). Dans le cas idéal, il est bien évident que le coefficient d'étalonnage obtenu d'un radiomètre sera une constante quel que soit le moment de la mesure pendant la journée. Cela nous permet de vérifier la précision de l'étalonnage. La figure 2.8 montre que les coefficients d'étalonnage sont bien stables avec de faibles fluctuations qui sont dues à la stabilité des conditions atmosphériques. Ainsi, la qualité et la précision du modèle (équation 2.16) pour le calcul de la

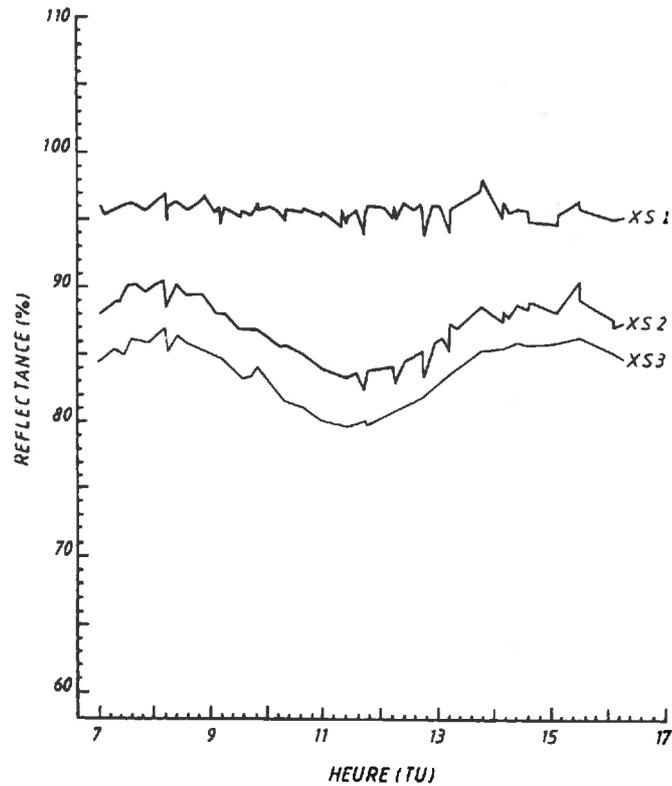


Figure 2.6 : Variation des rapports de la tension de sortie correspondant à la mesure de la luminance sur un panneau BaSO₄ et celle de l'éclairement mesurées avec un radiomètre de simulation SPOT.

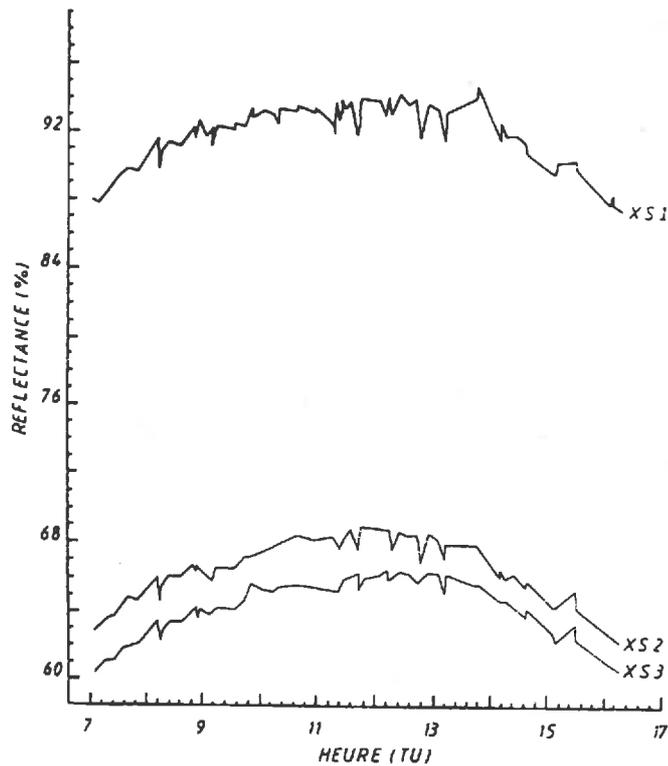


Figure 2.7a : Variation des réflectances d'un panneau BaSO₄ mesurées par un radiomètre de simulation SPOT avant l'application des coefficients d'étalonnage du radiomètre.

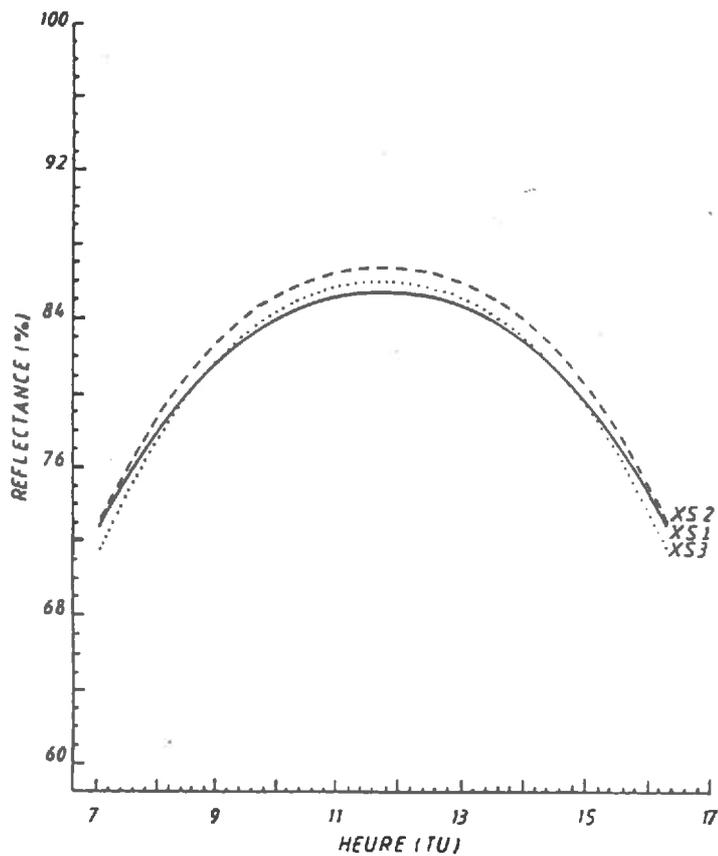


Figure 2.7b : Variation des réflectances du panneau BaSO₄ calculées par l'équation (2.16).

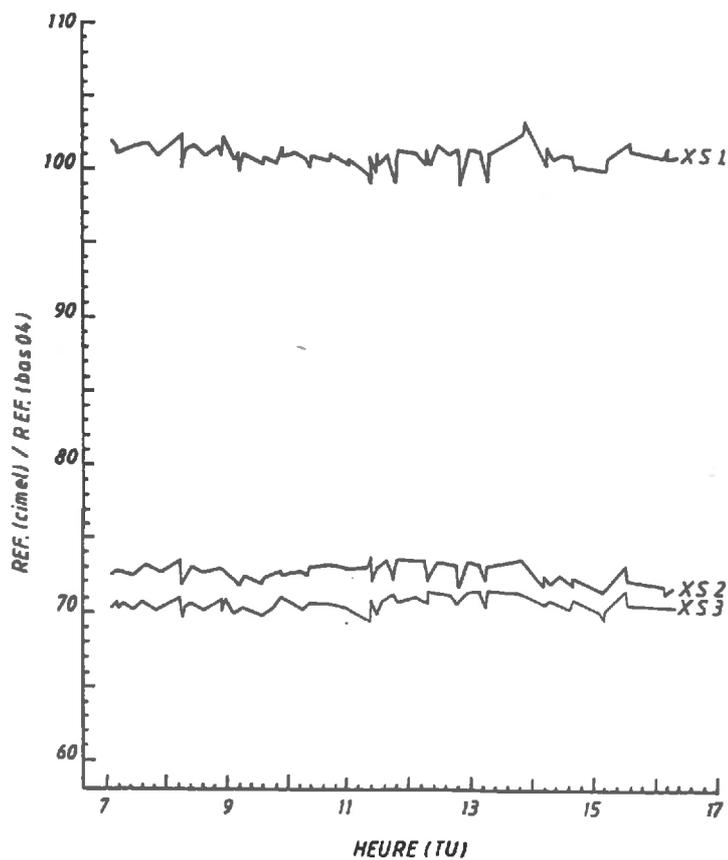


Figure 2.8 : Variation des coefficients d'étalonnage du radiomètre.

réflectance d'un panneau dans un milieu naturel se trouvent justifiées. Les calculs statistiques sur les coefficients d'étalonnage du radiomètre obtenus sont présentés dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Résultats du calcul statistique sur les coefficients d'étalonnage du radiomètre

| Bande spectrale | XS1 | XS2 | XS3 |
|--------------------|--------|-------|-------|
| Nombre de points | 89 | 89 | 89 |
| Moyenne | 101.02 | 72.84 | 70.70 |
| Ecart-type | 0.75 | 0.59 | 0.51 |
| Coef. de variation | 0.74% | 0.81% | 0.72% |

II - CARACTERISATION DES PROPRIETES OPTIQUES DU SITE

Ce paragraphe est constitué d'extraits des rapports "Caractérisation des propriétés optiques du site de la Crau" (Guyot et al., 1989, 1990), et de l'article "Analyse de la variabilité spatiale d'un site-test, Exemple de la Crau (France) (publié dans la *Photo-Interprétation*, Gu et al., 1990)

II-1 Les mesures effectuées

II-1-1 Les mesures effectuées au sol avec le spectroradiomètre de terrain

Pour déterminer le spectre de réflectance du site, nous avons utilisé le spectroradiomètre de terrain Barringer REFSPEC IIA récemment acquis par l'INRA. Cet appareil mesure simultanément l'éclairement avec une sphère intégrante et la luminance. Il donne directement la réflectance spectrale de la surface visée entre 450 et 2500 nm. Dans notre étude nous avons limité l'analyse spectrale à la bande 450-1000 nm qui était suffisante pour les simulations de SPOT. Dans cette gamme de longueurs d'onde la résolution spectrale du monochromateur était de l'ordre de 2 nm. Le champ de visée est de $6 \times 7,5^\circ$, et la tache au sol vue est un rectangle de 16 cm de large et de 20 cm de long.

Les mesures spectrales ont été effectuées en 16 points différents, répartis à l'intérieur d'un cercle de 50 m de diamètre, lui-même situé au centre du site de mesure. La surface échantillonnée n'était donc pas représentative de l'ensemble du site mais il n'a pas été possible d'opérer de manière différente. En effet le matériel à transporter est lourd (spectroradiomètre 25 Kg; électronique d'acquisition 15 Kg; groupe électrogène 40 Kg) et pour chaque déplacement de l'ensemble de mesure il faut tout arrêter et débrancher les câbles. De tels déplacements prennent donc beaucoup de temps. C'est la raison pour laquelle seul le spectroradiomètre a été déplacé et comme son câble de liaison avec l'unité d'acquisition avait une longueur de 25 m, l'exploration a été limitée à un cercle de 50 m de diamètre.

II-1-2 Les mesures effectuées au sol avec les radiomètres de simulation de SPOT

Le capteur principal sur lequel la majorité des études a été effectuée est HRV de SPOT. Pour cette raison, nous avons utilisé les radiomètres de simulation de SPOT, qui sont équipés des trois bandes spectrales de HRV, pour évaluer la variation du facteur de réflectance du sol :

- en visée verticale (variabilité spatiale)
- en fonction de l'inclinaison de la visée (indicatrices de réflexion)
- en fonction de la hauteur du soleil.

II-1-2-1 Les radiomètres de simulation de SPOT

Les radiomètres de simulation de SPOT utilisés ont été réalisés par la société CIMEL. Un radiomètre comporte deux têtes indépendantes qui mesurent simultanément l'éclairement et la luminance pour les 3 canaux de SPOT. Les têtes sont connectées à un boîtier électronique qui affiche directement la réflectance (Guyot et al., 1984).

Pour les mesures effectuées en un point fixe et destinées à suivre l'évolution de la réflectance au cours du temps le boîtier électronique des radiomètres a été remplacé par une petite centrale d'acquisition de données équipée d'une imprimante. Dans ce cas, nous avons mesuré indépendamment les signaux correspondant aux têtes d'éclairement et de luminance.

La tête de mesure de la luminance est équipée de diaphragmes définissant un angle d'ouverture de 12° pour chaque canal. Lorsqu'elle est placée à 2 m au dessus du sol, elle mesure donc la luminance d'une surface circulaire de 0,43 m de diamètre. Ce diamètre passe à 0,53 m pour des mesures effectuées à 2,5 m au dessus du sol.

La tête de mesure de l'éclairement est équipée de diffuseurs en Téflon dont la forme a été déterminée de manière à avoir une réponse aussi proche que possible du cosinus de l'angle solaire zénithal.

II-1-2-2 Les supports de radiomètres

Pour les visées verticales, les 2 têtes du radiomètres ont été montées à l'extrémité d'une potence à 2,5 m du sol. Afin que les mesures de luminance soient toujours effectuées verticalement et que les diffuseurs de la tête d'éclairement restent horizontaux, les deux têtes ont été fixées aux deux extrémités d'une tige passant dans un palier à rotule dont l'axe était approximativement vertical. L'ensemble mobile se plaçait ainsi dans la bonne position par simple gravité (Figure 2.9). Cependant, à cause des frottements, la mise en position n'est pas parfaite, l'erreur estimée est de $\pm 2^\circ$. Cet écart d'inclinaison n'est pas très important pour les mesures de luminance car celle-ci varie très peu au voisinage de la verticale. Par contre, une erreur non négligeable peut être introduite dans les mesures d'éclairement. Dans les conditions les plus défavorables, l'erreur sur l'éclairement, par suite de l'erreur sur θ_s , est de $\pm 2\%$ pour un angle solaire zénithal de 30° , $\pm 4\%$ pour 45° et $\pm 6\%$ pour 60° . Cette variabilité de la mesure, due à l'inclinaison du radiomètre, s'ajoute à celle de la cible. Pour cette raison nous avons décidé de désolidariser les deux têtes du radiomètre. La tête de mesure de l'éclairement a alors été placée à poste fixe et mise parfaitement de niveau avec un niveau à bulle de précision. Dans ce cas l'erreur due à l'inclinaison de la tête a été ramenée à $\pm 0.5\%$ pour une erreur de nivellement de $\pm 0.4^\circ$.

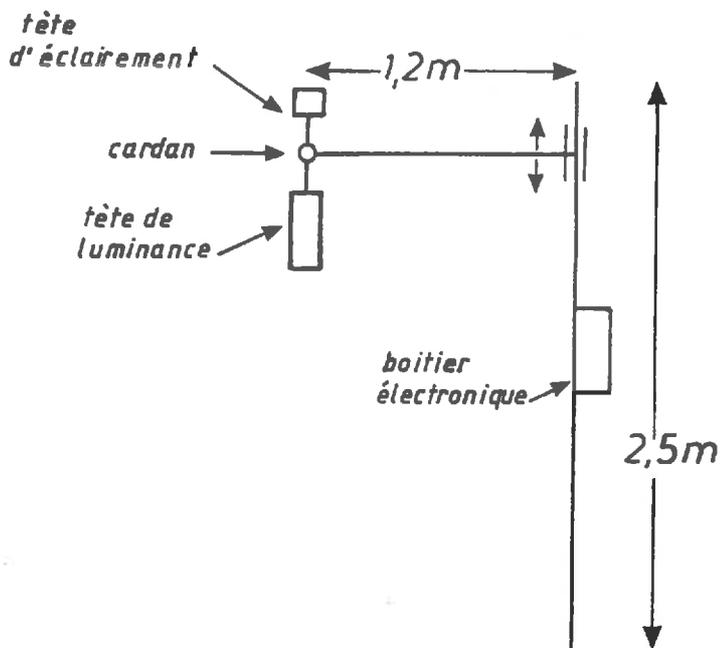


Figure 2.9 : Utilisation du radiomètre Cimel avec une potence mobile

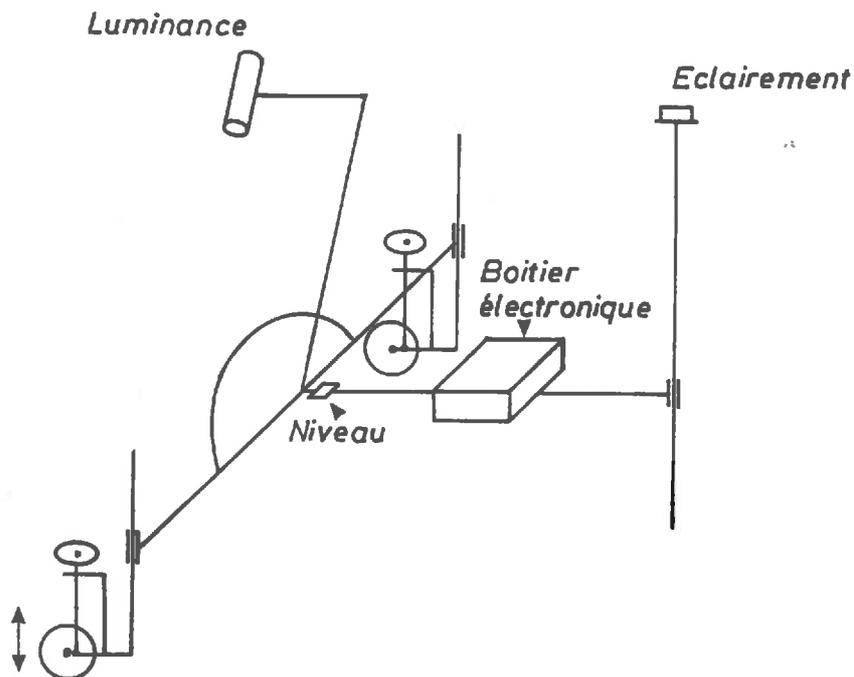


Figure 2.10 : Schéma du chariot mobile utilisé pour la détermination des indicatrices de réflexion

Pour les visées obliques, un chariot mobile et entièrement démontable (facilité de transport) a été réalisé spécialement pour l'expérimentation en Crau. Son schéma de principe est indiqué sur la figure 2.10. La structure centrale est un T horizontal. Aux deux extrémités de la barre supérieure du T se trouvent 2 tubes verticaux coulissant et portant une roue dont la hauteur est réglable, par un vérin à vis. La 3ème extrémité du T coulisse le long d'une barre verticale de 2 m de haut et qui supporte à son sommet la tête d'éclairement du radiomètre. La tête de luminance est montée à l'extrémité d'une potence inclinable de 2 m de long. Elle peut être bloquée pour une inclinaison quelconque le long d'un secteur demi-circulaire gradué.

La possibilité de faire glisser les extrémités du T le long de tubes verticaux permet de régler grossièrement son niveau. Les vérins à vis agissant sur les roues sont destinés au réglage fin.

Les roues permettent de déplacer le support pour effectuer des mesures à différents emplacements ou pour l'orienter dans les plans différents.

Pour les mesures effectuées sur l'ensemble d'une journée, deux têtes de luminance et une tête d'éclairement ont été utilisées. Une des têtes de luminance était fixée à l'extrémité de la potence du système mobile et visait le sol verticalement. La seconde tête de luminance était placée entre les pattes d'un trépied (ou sur une potence) et visait verticalement un panneau recouvert de sulfate de baryum utilisé comme référence. La tête d'éclairement était fixée horizontalement sur un trépied (Figure 2.11). On disposait ainsi de deux mesures indépendantes de l'éclairement.

II-1-2-3 Conduite des mesures

. Analyse de la variabilité des réflectances

Le facteur de réflectance a été mesuré en visée verticale. La tête de mesure de la luminance était placée à 2,50 m au dessus du sol. Le diamètre de la surface visée était donc de 0,53 m.

Les mesures ont été effectuées aux alentours du midi solaire en des points distants les uns des autres d'environ 50m. En chaque point nous avons noté les tensions correspondant aux luminances dans les trois canaux de SPOT et l'heure. Ces valeurs ont ensuite été rapportées aux données d'éclairement mesurées à l'aide de la tête placée à poste fixe en prenant la valeur obtenue au moment le plus proche de celui auquel la luminance avait été mesurée (impression des données toutes les 30 secondes)

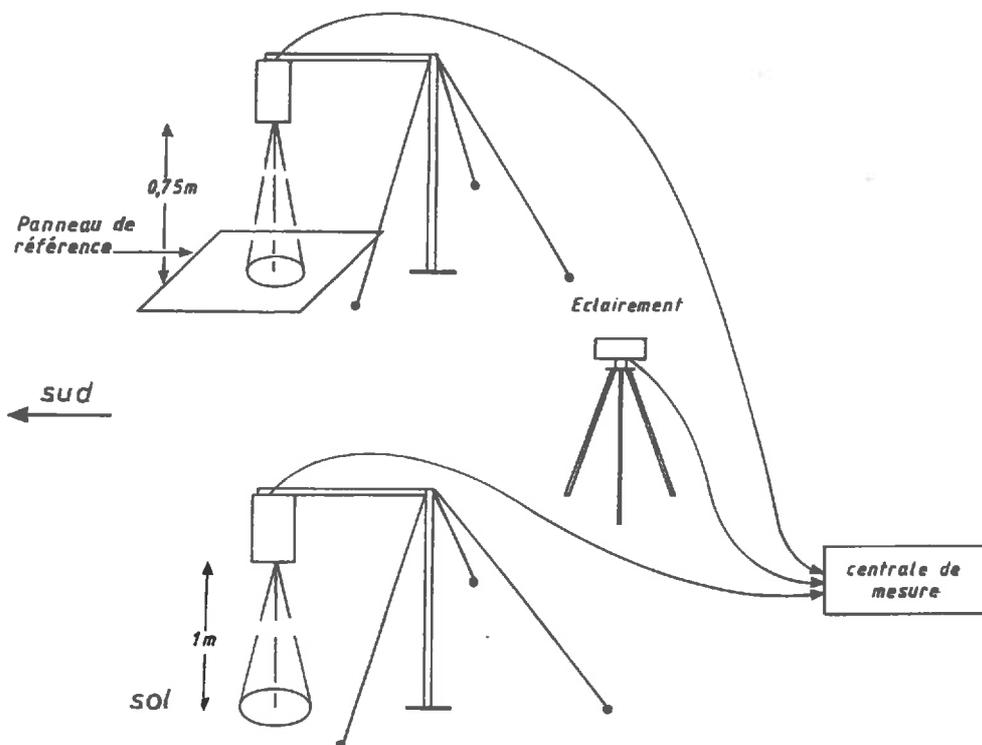


Figure 2.11 : Schéma indiquant la disposition des appareils pour les mesures à poste fixe.

. Indicatrices de réflectance

Les mesures ont été également effectuées aux alentours du midi solaire dans différents plans verticaux : le plan parallèle à la direction des rayons solaire, le plan perpendiculaire à la direction des rayons solaires et les plans bissecteurs.

Les mesures de luminance ont été effectuées tous les 5 ou 10° de la verticale jusqu'à un angle zénithal de 70°. Pour chaque visée, nous avons calculé le facteur de réflectance et nous avons ensuite normalisé les valeurs obtenues en les divisant par le facteur de réflectance mesuré verticalement. Dans ces conditions, l'indicatrice de réflexion d'une surface lambertienne, en coordonnées polaires, est un demi-cercle de rayon unitaire.

. Effet de la hauteur du soleil

Le but des mesures, qui ont été effectuées, était de déterminer l'effet de la hauteur du soleil sur le facteur de réflectance du sol. Pour cela nous avons mesuré simultanément la luminance du sol, celle d'un panneau de référence et l'éclairage.

Le panneau de référence, qui est constitué par une plaque d'aluminium recouverte de

sulfate de baryum, n'est pas parfaitement lambertien mais la variation de sa réflectance, en fonction de la hauteur du soleil a été déterminée au laboratoire et est donc connue. La variation de la réponse de la tête de mesure de l'éclairement en fonction de la hauteur du soleil peut également être corrigée. La comparaison des variations de réflectance du sol et du panneau (en tenant compte du diffus) permet donc de connaître l'effet de la hauteur du soleil sur la réflectance du sol.

II-1-3 Les mesures aéroportées

II-1-3-1 Matériel utilisé à bord de l'avion

Le matériel, dont le schéma synoptique est présenté sur la figure 2.12 permet d'acquérir des données radiométriques en visée verticale et oblique ainsi que des photos destinées au repérage de l'axe survolé et à une analyse photogrammétrique (Guyot, 1988).

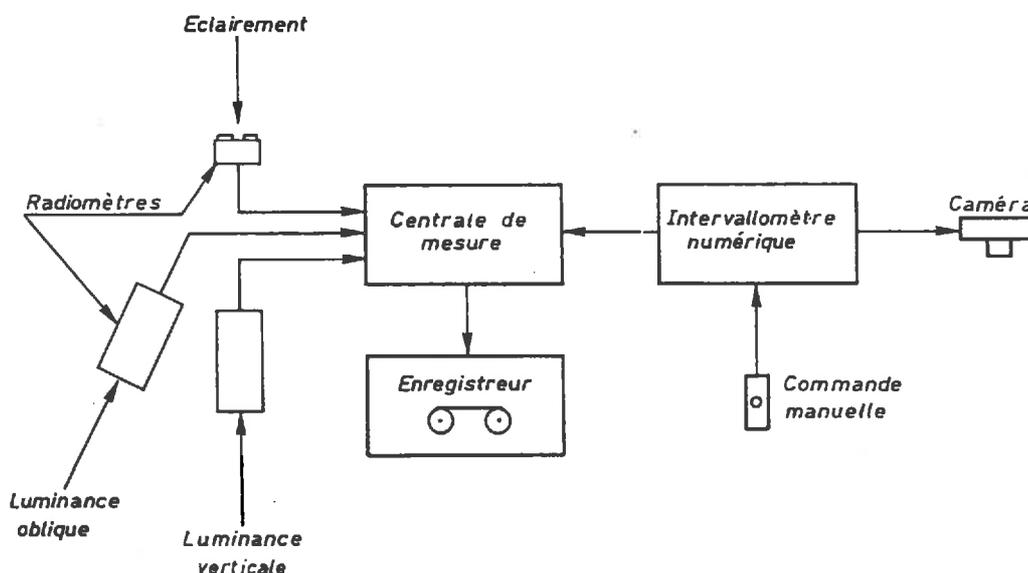


Figure 2.12 : Schéma synoptique du matériel utilisé à bord de l'avion

. Les mesures radiométriques

L'éclairement et la luminance sont mesurés simultanément avec une tête de mesure de l'éclairement et deux têtes de mesure de la luminance. La tête de mesure de l'éclairement est fixée au dessus de l'aile de l'avion et n'a donc aucun obstacle dans son champ de visée (avion CESSNA à aile haute).

Les deux têtes de mesure de la luminance sont montées dans un panier passant à travers

une des deux trappes de l'avion. Une des têtes vise le sol verticalement, l'autre a son axe de visée incliné de 30° (simulation de dépointage maximum de SPOT) vers l'avant de l'avion. Ainsi les deux axes de visée des deux têtes des radiomètres définissent un plan vertical qui passe par l'axe de l'avion. Cela permet d'avoir des mesures effectuées sur le même axe.

Les têtes de mesures de la luminance sont équipées, pour les vols, de lentilles convergentes qui donnent un angle d'ouverture de 1° pour chaque canal et dans ce cas la surface visée au sol est un carré de 10 m de côté pour un vol à une altitude de 600 m.

. La centrale d'acquisition de données

La centrale d'acquisition de données qui est utilisée a été spécialement conçue pour ce type de mesure par le Laboratoire de Micro-informatique et d'Automatique de l'INRA à Avignon. Elle possède 15 voies d'entrée et est équipée d'un convertisseur analogique numérique très rapide qui permet d'effectuer un cycle de mesure en moins de 0,5 millisecondes. Les données une fois numérisées sont stockées sur une minicassette numérique (norme ECMA 34). La cadence de scrutation de la centrale de mesure est limitée par la vitesse de l'enregistreur magnétique. La vitesse maximale est de 10 cycles de mesure par seconde.

Un commutateur permet de contrôler le niveau du signal entrant sur chacune des voies afin de vérifier que le niveau de saturation n'est pas atteint (signal lumineux).

Des roues codeuses permettent de rentrer un code numérique servant à repérer chaque axe de vol.

. L'intervallomètre numérique

L'intervallomètre numérique a plusieurs fonctions :

- il commande les prises de vue des caméras automatiques avec un intervalle entre 2 photos successives réglable par pas de 0,1 s
- il commande le départ et l'arrêt de la centrale de mesure
- il envoie à la centrale de mesure un signal carré qui change de niveau à chaque prise de vue (passage du niveau bas au niveau haut ou inversement).

Le départ et l'arrêt d'une série de mesures le long d'un axe de vol sont commandés par un bouton poussoir unique que l'opérateur tient dans sa main. Un bip sonore émis à

chaque prise de vue permet de contrôler le bon fonctionnement du système.

. Les caméras automatiques

Une plate-forme supportant 4 caméras Haselblad 70 mm est montée sur la deuxième trappe de l'avion. Trois des caméras sont équipées avec des films noir et blanc et des filtres Wratten Kodak de manière à acquérir des photos dans le vert, le rouge et le proche infrarouge (tableau 2.6). Elles sont munies d'objectifs dont la distance focale est 100 mm. La quatrième caméra est équipée avec un film infrarouge couleur et elle est munie d'un objectif dont la distance focale est 50 mm. Cela permet d'avoir un grand champ de visée et d'étudier la variabilité angulaire de la luminance de la surface.

Tableau 2.6 : films et filtres Wratten Kodak utilisés pour les prises de vue.

| Bandes Spectrales | Vert 540-600 nm | Rouge 600-700 nm | Infrarouge 800-900 nm | IRC 520-900 nm |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Film Aerochrome | Kodak Plus X Aerographic | Kodak Plus X Aerographic | Kodak Infrared Aerographic | Kodak Infrared 2443 |
| Filtres | 21 + 57A | 25 | 87C | 15 |

II-1-3-2 Matériel utilisé au sol

Afin de pouvoir caler les données photographiques deux panneaux de références sont placées au début d'un des axes de vol. Chaque panneau carré à 3 m de côté et est constitué par 4 panneaux élémentaires en contreplaqué recouvert de feutrine grise ou marron. La feutrine a été choisie car elle a une réponse angulaire presque lambertienne. Sa réflectance est pratiquement constante dans le vert et le proche infrarouge. Par contre dans la bande rouge (600-700 nm) elle présente une variation importante.

Durant le vol, la réflectance du sol dans un rayon de 25 m autour des panneaux est mesurée avec un radiomètre CIMEL afin d'avoir ainsi 3 valeurs différentes de

réflectances (feutrine grise, feutrine marron et sol) pour étalonner les données photographiques.

II-1-3-3 Procédure expérimentale

. Conduite des mesures

Les mesures sont effectuées selon deux axes parallèles à l'axe de balayage de SPOT. Ces axes font un angle de 14° avec l'axe Est-Ouest. Ils sont parcourus dans le sens Ouest-Est. Ils sont distants de 120 m, leur longueur utile est de 400 m alors que leur longueur totale, délimitée par des balises est de 780m.

Les mesures sont effectuées autour du midi solaire de manière à avoir une hauteur du soleil relativement constante durant le vol.

La zone est survolée à 3 altitudes différentes : 300, 600 et 2000 ou 2500 m, de manière à avoir des résolutions au sol différentes. A 300 m la surface élémentaire visée par un radiomètre est un carré de 5 m de côté. Elle passe à 10 m pour un vol à 600 m. Le vol à 2000 m est uniquement destiné aux prises de vue de manière à avoir une vue d'ensemble du site. Le tableau 2.7 regroupe les dimensions des surfaces visées par les radiomètres et par les appareils photographiques pour les différentes altitudes de vol.

La vitesse de vol de l'avion varie entre 40 et 50 ms^{-1} selon les conditions expérimentales.

. Traitement des données radiométriques

Les enregistrements réalisés en vol sont tout d'abord décodés de manière à constituer un fichier, contenant l'ensemble des valeurs de luminance et d'éclairement correspondant à chaque axe et à tracer un profil des données radiométriques acquises pour chaque canal. La confrontation du listing du fichier et des profils aux clichés obtenus permet de délimiter la partie des données utilisables pour les analyses statistiques.

Pour chaque visée, on détermine alors la valeur de réflectance. Elle est calculée comme le quotient de la valeur instantanée de la luminance par l'éclairement moyen durant le survol de l'axe. Cela permet d'éliminer les effets de l'attitude de l'avion sur la mesure de l'éclairement. Les paramètres statistiques de la distribution des réflectances peuvent alors être calculés.

Tableau 2.7 : dimensions en mètres des surfaces visées par les radiomètres et par les caméras en fonction de l'altitude de vol.

| Instruments | Altitudes m | | | |
|------------------------|-------------|---------|-----------|-----------|
| | 300 | 600 | 2000 | 2500 |
| Caméra objectif 100mm | 180x180 | 360x360 | 1200x1200 | 1500x1500 |
| Caméra objectif 50mm | 360x360 | 720x720 | 2400x2400 | 3000x3000 |
| Radiomètre vertical | 5x5 | 10x10 | 35x35 | 44x44 |
| Radiomètre oblique 30° | 6x6 | 12x12 | 40x40 | 50x50 |

Traitement des données photographiques

L'ensemble des films est développé par l'IGN avec un coin sensitométrique pour chacun d'eux. Un certain nombre de clichés sont ensuite numérisés à l'aide du micro densitomètre installé au CESR à Toulouse. Le pas de numérisation est de 100 μm ce qui donne une matrice de 600 x 600 points pour chaque cliché.

Les clichés infrarouge couleur sont également numérisés en séparant successivement les 3 composantes à l'aide de 3 filtres Wratten Kodak numéros: 25 (rouge), 58 (vert) et 47B (bleu).

Les clichés noir et blanc sont utilisés pour analyser la variabilité spatiale de la réflectance. Les clichés infrarouge couleur, correspondent à un champ de visée suffisamment grand pour que l'on puisse inscrire, à l'intérieur du carré qu'ils délimitent, un cercle correspondant à une inclinaison de l'axe de visée de 30°. Ils sont donc utilisés pour analyser la variation de la luminance ou de la réflectance du sol en fonction de l'inclinaison de l'axe de visée et tracer des indicatrices de réflexion.

**II - 2 Choix de la zone de l'étalonnage et
analyse de la variabilité spatiale du site**

Article 1

**"Analyse de la variabilité spatiale d'un site-test,
Exemple de la Crau (France)"**

(publié dans Photo-Interprétation)



ANALYSE DE LA VARIABILITE SPATIALE D'UN SITE TEST**EXEMPLE DE LA CRAU (FRANCE)***ANALYSIS OF THE SPATIAL VARIABILITY OF A TEST SITE**EXAMPLE OF LA CRAU (FRANCE)*

Xing-fa Gu, Gérard Guyot, Michel Verbrughe
INRA, Bioclimatologie, BP 91, 84143 Montfavet Cédex (France)

RESUME

La variabilité spatiale de la réflectance de la "Crau Sèche", plaine caillouteuse du sud-est de la France, a été étudiée à différentes échelles (pixels de 0,5 à 20m de côtés) à partir de différents types de données : images de SPOT, photos aériennes numérisées et données radiométriques acquises au sol. Le but de ces études était de définir d'une part l'emplacement d'un site d'étalonnage pour SPOT et d'autre part de mettre au point la méthodologie d'estimation de la réflectance moyenne du site retenu.

Ce site est une surface de 400x400 m (20x20 pixels de SPOT). Son emplacement a été déterminé à partir d'images représentant la luminance moyenne et le coefficient de variation d'un bloc de 20x20 pixels déplacé sur la partie centrale de la Crau (traitement d'images de SPOT acquises à 5 dates différentes)

La mise au point de la méthodologie d'estimation de la réflectance moyenne du site d'étalonnage s'est appuyée principalement sur des photos multispectrales acquises à une altitude de 600m. Ces photos ont été numérisées, puis corrigées des effets de vignettage avant d'être transformées en une série de données de réflectance grâce à l'utilisation de panneaux étalonnés. Ces données ont servi à simuler des pixels de différentes dimensions (de 0,6 à 19,2m) et à analyser la variabilité spatiale à l'intérieur du site retenu. Leur confrontation avec des mesures au sol a permis de définir la méthodologie d'estimation de la réflectance moyenne du site.

SUMMARY

The spatial variability of the reflectance of "La Crau Sèche", a pebbly flat area of the South-East of France, is studied at different scales (0.5 to 20m pixel size) with different types of data : SPOT images, digitized aerial photographs and ground level radiometric measurements. The goal of this study is to define the best site for the SPOT calibration area and to prepare the methodology for assessing its mean reflectance.

The calibration area is 400x400 m wide (20x20 SPOT pixels). Its place has been determined from the analysis of images representing the variation coefficient and the mean radiance of 20x20 pixel blocks. These images were obtained by slipping a block of pixels, with 1 pixel steps on the central part of La Crau (processing of SPOT images acquired at 5 different dates).

The development of the methodology for assessing the mean reflectance of the calibration area is mainly based on multispectral aerial photographs taken at an altitude of 600m. They have been digitized and then corrected for the vignetting before being transformed into a series of reflectance data owing to calibrated reflectance panels. These data are used for simulating pixels with different sizes (from 0.6 to 19.2m) and for analyzing the spatial variability within the selected calibration area. Their comparison with ground level radiometric measurements leads to define the methodology for the assessment of the calibration area mean reflectance.

I - INTRODUCTION

La comparaison ou la combinaison de données de satellites d'observation de la terre obtenues à des dates différentes, au dessus de la même zone, ou de données provenant de satellites différents, nécessitent, en premier lieu, la connaissance de leurs coefficients d'étalonnage (Robinove, 1982; Price 1987a, 1987b).

L'étalonnage des satellites peut être effectué de trois façons différentes : en laboratoire, avant le lancement et en vol en visant une lampe interne ou le soleil ou encore en visant un site test au sol. Comme l'ont montré de nombreux auteurs (William et David, 1986; Slater et al, 1987; Frouin et Gautier, 1987; Chavez, 1989) la méthode du site test est actuellement la plus précise et la plus efficace.

L'étalonnage d'un satellite à partir d'un site test consiste à déterminer la luminance qui lui parvient depuis la surface terrestre, à partir de la réflectance du sol et d'un modèle de transfert radiatif à travers l'atmosphère. Ces valeurs sont ensuite comparées aux données numériques correspondant à chaque pixel de l'image. Un des points importants de cette analyse est évidemment la caractérisation de la réflectance du site, mais aussi de sa variabilité spatiale.

Des travaux récents ont, en effet, montré la nécessité de cette analyse pour améliorer les corrélations entre les données satellitaires et les données au sol (Hatfield et al, 1985; Curran et Williamson, 1985, 1986; Curran et Hay 1986). Ces auteurs ont ainsi étudié, à partir de mesures radiométriques au sol, la taille de l'échantillonnage nécessaire pour caractériser certaines surfaces naturelles, en supposant une distribution gaussienne des données expérimentales. Plus récemment Webster et al (1989) ont mis en évidence l'influence de la répartition de ces mesures sur la précision de la moyenne obtenue. Cependant, l'analyse de la variabilité spatiale de la réflectance, en vue de l'étalonnage des satellites n'a pas été discutée. Par ailleurs, les méthodologies qui ont été mises au point posent plusieurs problèmes relatifs à l'analyse précise de la variabilité spatiale (effet de la dimension de la surface visée, effet de la forme de la distribution statistique des réflectances).

Le but de cette étude est donc de présenter l'approche méthodologique qui a été utilisée pour caractériser la variabilité de la réflectance du site de la Crau afin de connaître ses possibilités d'utilisation comme site d'étalonnage de satellites et de SPOT en particulier (Guyot et al, 1989a)

II - MATERIEL ET METHODE

2.1. Le site expérimental

Le site retenu se trouve au centre de la Crau sèche (altitude 20 m, latitude 43°,36 N, longitude 4°,52 E), qui est une plaine caillouteuse, située à 40 km au Sud d'Avignon et à 25 km au Sud-Est d'Arles (Figure 1). Elle a été formée par des alluvions apportées par la Durance. C'est pourquoi le sol comporte une forte proportion de galets roulés dont les dimensions sont relativement homogènes. La Crau a ainsi une surface parfaitement plate et recouverte de galets entre lesquels pousse une maigre végétation naturelle. Le sol se prête mal à la culture et la Crau sèche sert essentiellement de pâturage d'hiver pour les troupeaux de moutons transhumants. Ces troupeaux sont rassemblés dans des bergeries qui sont réparties sur une superficie de 60 km² (Figure 2).

Le climat de la CRAU, de type méditerranéen, est l'un des plus secs de France. Le Mistral est le vent dominant, il favorise un bon ensoleillement et une faible concentration de l'air en aérosols.

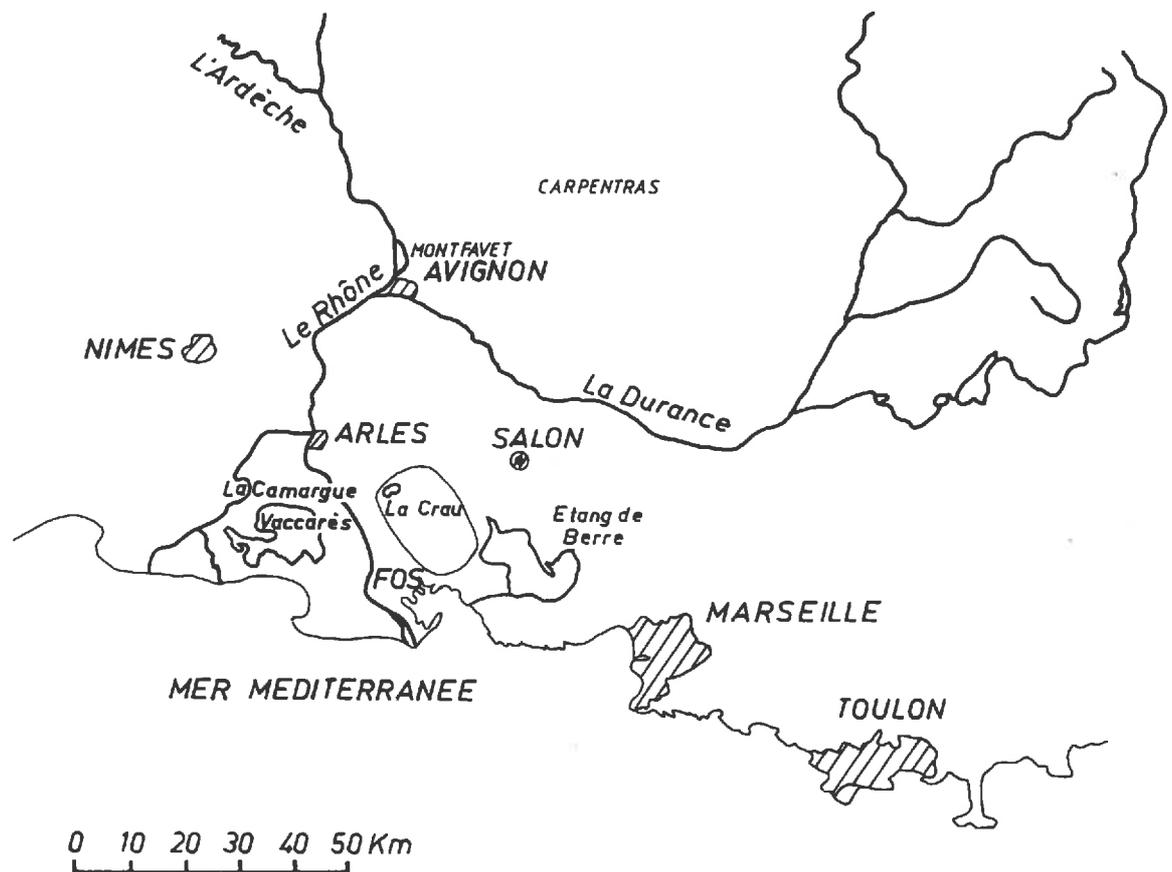


Figure 1. Situation géographique de la Crau

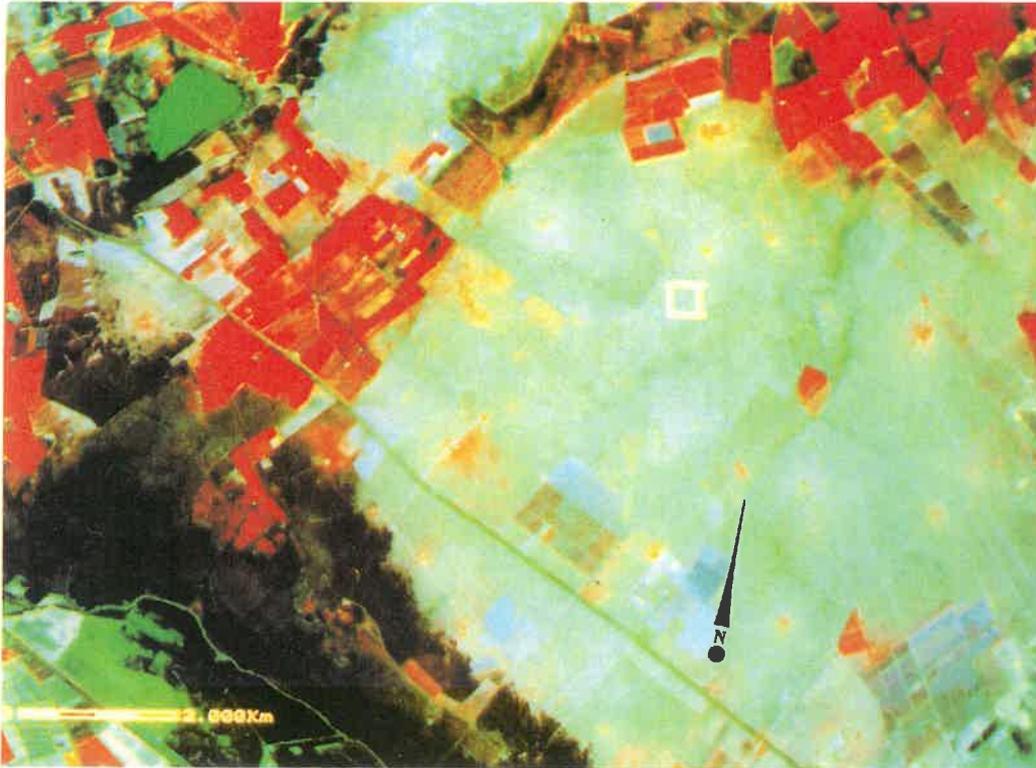


Figure 2. Composition colorée réalisée à partir d'une image de SPOT du 15 avril 1987. La Crau Sèche se trouve sur la partie droite de la figure. Elle est bordée au nord-Ouest par les prairies irriguées de la Crau Humide et au Sud-Ouest par la végétation de la première terrasse du Rhône. Les champs de la Camargue apparaissent au sud-ouest

2.2. Acquisition des données

L'originalité de l'approche qui a été utilisée est de s'appuyer sur des données acquises à différents niveaux et avec différentes résolutions spatiales : satellite, avion et mesures au sol. Les images satellitaires ont servi à rechercher le meilleur emplacement pour le site alors que les mesures aéroportées et les mesures au sol ont servi à caractériser la variabilité des réflectances à l'intérieur du site.

2.2.1. Les images satellitaires

Cinq images multispectrales de SPOT (résolution spatiale 20m) ont été utilisées. Elles ont été acquises en 1987 (5 mars, 15 avril, 27 juillet, 12 août et 2 septembre), avec de bonnes conditions atmosphériques (visibilité horizontale supérieure à 20 km)

2.2.2. Les mesures aéroportées

Une chaîne d'acquisition des données, spécialement conçue pour les mesures aéroportées, a été utilisée. Elle comporte 2 radiomètres, reliés à une centrale d'acquisition de données, et 4 caméras automatiques. L'acquisition des données et les prises de vue sont commandées par un intervallo-mètre numérique (Guyot, 1988; Guyot et al, 1983b).

Les radiomètres utilisés sont des radiomètres de simulation de SPOT, réalisés par la société CIMEL (Guyot et al, 1983a). Chacun d'eux comporte deux têtes indépendantes qui mesurent l'éclairement et la luminance pour les 3 canaux de SPOT. Une seule tête de mesure de l'éclairement a été fixée au dessus de l'aile de l'avion, les têtes de mesure de la luminance (angle d'ouverture de 1°) ont été montées dans un panier passant à travers l'une des deux trappes de l'avion. Elles visaient le sol verticalement et avec une inclinaison de 30° vers l'avant de l'avion.

Une plate-forme supportant 4 caméras Haselblad 70 mm a été montée sur la deuxième trappe de l'avion. Trois d'entre-elles avaient des objectifs de 100 mm de focale et étaient équipées avec des films noir et blanc et des filtres Wratten Kodak de manière à obtenir des clichés multispectraux dans le vert, le rouge et le proche infrarouge (données comparables à celles de l'instrument HRV de SPOT). La quatrième caméra servait uniquement au repérage de la zone survolée. Elle était équipée avec un objectif grand angulaire (50 mm).

Les données utilisées dans cette étude correspondent à un vol effectué le 27 Juillet 1988, aux alentours du midi solaire, avec un ciel parfaitement dégagé et une visibilité horizontale supérieure à 20 km. L'axe de vol était orienté ouest-est, perpendiculairement au canal qui borde le site d'étalonnage et les mesures ont été acquises à une altitude de 600 m par rapport au sol. Les surfaces élémentaires, visées par le radiomètre, étaient ainsi des carrés de 10 m de côté et les surfaces photographiées des carrés de 360 m de côté.

Afin de pouvoir étalonner les données photographiques, deux panneaux de référence, de 3 m de côté, recouverts de feutrine grise ou marron, dont la réflectance avait été mesurée au laboratoire, ont été placés au début de l'axe de vol. De plus une série de photos a été prise, avant le vol, au dessus d'un panneau de référence recouvert de sulfate de baryum, pour corriger les distorsions liées aux caractéristiques optiques du système de prise de vue (effet de vignettage).

2.2.3. Les mesures au sol

Le même type de radiomètre a été utilisé pour les mesures aéroportées et pour les

mesures au sol. Cependant, pour ces dernières, les lentilles frontales qui définissaient une ouverture de 1° ont été remplacées par des diaphragmes qui définissaient une ouverture de 12° . La tête de mesure de l'éclairement, fixée sur un trépied était placée horizontalement à mieux que $\pm 0,4^\circ$ à l'aide d'un niveau de précision. Elle était reliée à une centrale d'acquisition de données qui enregistrait les tensions délivrées par les trois canaux toutes les minutes.

La tête de mesure de la luminance était montée à l'extrémité d'une potence mobile de 2,5 m de haut. Elle se maintenait dans la position verticale grâce à une suspension par cardan. Elle était reliée à un petit boîtier d'affichage, fixé sur la potence et équipé de trois voltmètres numériques. A chaque emplacement de mesure la surface visée était un cercle de 0,53 m de diamètre.

Les mesures ont été effectuées aux alentours du midi solaire le 28 mars 1989, le ciel était parfaitement dégagé et la visibilité horizontale supérieure à 40 km. La caractérisation de la réflectance du site d'étalonnage a été effectuée en déplaçant la potence selon 5 axes parallèles de 400 m de long, orientés est-ouest et espacés de 65 m, avec une mesure tous les 20 m environ (106 mesures réparties sur tout le site).

2.3. Le traitement des données

2.3.1. Traitement des images satellitaires

Le but des traitements qui ont été effectués sur les données numériques brutes de SPOT était tout d'abord de rechercher les zones les plus propices à l'installation du site d'étalonnage et ensuite de caractériser l'hétérogénéité du site retenu.

Nous avons choisi pour le site d'étalonnage un carré de 400 m de côté (20x20 pixels de SPOT en visée verticale). Pour effectuer ce choix nous avons tenu compte de l'expérience qui a été acquise sur le site de White Sands aux Etats Unis (Slater et al, 1986, 1987), de l'hétérogénéité du sol de la Crau (distance entre les taches plus sombres) ainsi que des changements d'orientation de l'axe de balayage de SPOT et de la dimension des pixels, lors des visées obliques.

Une première analyse, effectuée à partir de compositions colorées classiques, nous a permis de repérer la zone qui paraissait être la plus homogène et la plus facile à localiser. Pour affiner notre choix, nous avons alors constitué un bloc de 20x20 pixels que nous avons déplacé avec un pas de 1 pixel sur l'ensemble d'une image de 256x256 pixels qui correspondait au centre de la Crau. Pour chaque position du bloc, nous avons calculé la valeur moyenne et le coefficient de variation des 400 données numériques brutes. Ces deux valeurs ont ensuite été affectées à un pixel fictif de 20x20 m situé au centre du bloc. Nous avons ensuite représenté les images correspondant aux valeurs moyennes et aux coefficients de variation.

2.3.2. Traitement des données photographiques

L'ensemble des films a été développé par l'IGN avec un coin sensitométrique pour chacun d'eux. Un certain nombre de clichés ont ensuite été numérisés à l'aide du microdensitomètre installé au CESR à Toulouse (Joyce-Loebl, Scandig 25). Le pas de numérisation choisi est de 100 μ m ce qui donne une matrice de 600 x 600 points pour chaque cliché et chacun d'eux correspond au sol à un carré de 0,6m de côté. Les 3 clichés (vert, rouge et proche-infrarouge), correspondant au centre du site d'étalonnage, ont été choisis pour analyser la variabilité spatiale de la réflectance. Pour cela les densités optiques, mesurées par le microdensitomètre, ont tout d'abord été transformées en réflectances.

Comme l'ont montré Curran et al (1981) une caméra peut être utilisée comme un radiomètre pour mesurer la réflectance. Cependant les densités optiques qui sont enregistrées sur le film doivent subir une série de traitements pour être transformées en réflectances (Curran et al, 1981; Emori et al, 1983; Slater et al, 1983; Curran et Wilkinson, 1985) :

- transformation de la densité optique en valeurs proportionnelles à la luminance vue par le film;
- correction des effets de vignettage afin que les valeurs de l'image soient proportionnelle aux luminances vues par la caméra;
- étalonnage de l'image afin de transformer les luminances en réflectances;
- correction des effets angulaire, dû au fait que le site n'est pas un diffuseur lambertien parfait, afin d'obtenir les réflectances verticales.

La transformation de la densité optique du film en valeurs proportionnelles à l'éclairement reçu a été effectuée en utilisant les données du coin sensitométrique qui était enregistré sur chaque film. Les valeurs ainsi obtenues ont alors été multipliées par un facteur de proportionnalité de manière à ce qu'elles soient comprises entre 0 et 256.

Le vignettage correspond à une atténuation progressive du faisceau lumineux transmis par l'objectif de la camera du centre de la photo vers les bords. Lorsque l'inclinaison α du rayonnement, par rapport à l'axe optique de l'objectif, augmente l'intensité du rayonnement transmis varie comme $(\cos\alpha)^n$ avec n variant entre 2,8 et 4,0 selon la qualité des lentilles et l'utilisation éventuelle d'un filtre anti-vignettage (Slater et al, 1983). De leur côté Emori et al (1983) ont utilisé $n = 4$ et Valério et al, (1982) $n = 3$. Afin de déterminer la valeur de n correspondant à notre matériel nous avons utilisé les photos d'un panneau blanc, homogène, recouvert de sulfate de baryum. Elles ont été numérisées et transformées en valeurs proportionnelles à la luminance vue. L'image ainsi obtenue a alors été comparée à une série d'images simulées avec différentes

valeurs du paramètre de vignettage (variation de n de 1 à 8). L'analyse du coefficient de corrélation entre l'image du panneau et les images simulées nous a ainsi permis de déterminer la valeur de ce paramètre ($n = 3,6$) (Figure 3)

Pour transformer les images de luminance en images de réflectance au niveau du sol, nous avons utilisé les clichés pris au dessus des panneaux de référence (3x3 m). Cette méthode permet d'étalonner les images en réflectance avec une bonne précision et également de corriger les effets atmosphériques (Maracci et al, 1981, 1986; Curran et al, 1981; Curran et Wilkinson, 1985).

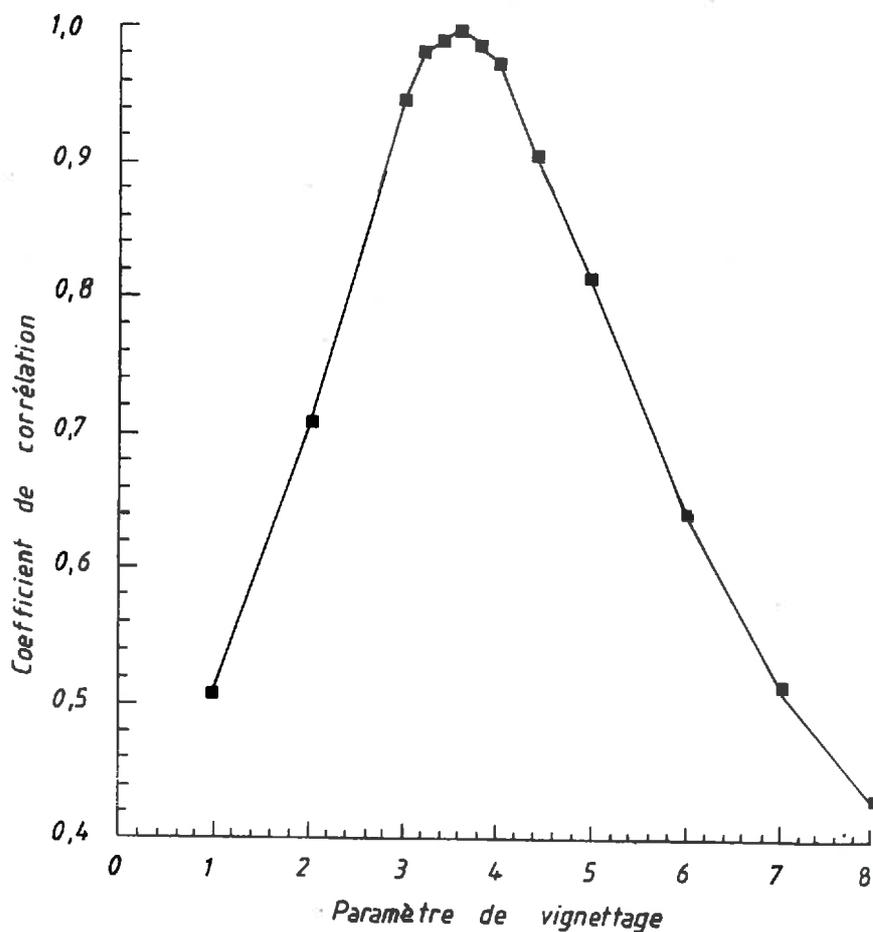


Figure 3. Variation du coefficient de corrélation de l'image numérique d'un panneau blanc, recouvert de sulfate de baryum, avec des images simulées pour différentes valeurs du paramètre de vignettage.

Afin de limiter les effets dus au caractère non-lambertien du site, nous n'avons retenu, sur les images, qu'une zone de 154m de côté (256 pixels de 0,6 m de côté) correspondant à la partie centrale de la zone photographiée. Dans ces conditions l'inclinaison maximum de la visée, par rapport à la verticale, est de 10,3°.

Les données ainsi obtenues nous ont servi à analyser la variabilité spatiale de la réflectance du site et la représentativité de valeurs moyennes calculées à partir de P mesures. Ces analyses ont été effectuées avec différentes résolutions spatiales. Pour cela les pixels élémentaires de 0,6 m de côté ont été regroupés progressivement de manière à constituer des pixels de 1,20, 2,40, 4,80, 9,60 et 19,20 m de côté.

Nous avons ainsi considéré M moyennes calculées sur P pixels répartis régulièrement sur l'ensemble de l'image et nous avons étudié leur distribution statistique. Pour cela, l'image initiale a été divisée en P carrés (P étant toujours un carré parfait : 4, 9, 16...). Dans chaque carré, nous avons tout d'abord sélectionné le pixel situé dans le coin supérieur gauche et nous avons calculé la moyenne correspondante. L'opération a ensuite été répétée pour le pixel adjacent et ainsi de suite... Nous avons ainsi obtenu N moyennes, si N est le nombre de pixels contenus dans chaque carré. Ce type d'analyse a été effectué pour des pixels dont les côtés variaient de 0,60 à 19,20 m.

2.3.3. Traitement des données acquises au sol

Les mesures d'éclairement et de luminance ont été acquises indépendamment. Le temps en heures et minutes a été noté à chaque mesure de luminance. Cette donnée a ainsi pu être rapportée à la mesure d'éclairement correspondante (acquisition automatique toutes les minutes) afin de déterminer les réflectances des surfaces élémentaires visées. Elles ont ensuite été traitées statistiquement.

III - RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Analyse des images de SPOT

3.1.1. Choix de la zone d'étalonnage

Les analyses ont été effectuées sur les 5 images acquises par SPOT. Nous ne présentons ici qu'un exemple correspondant à l'image du 15 avril.

Pour définir l'emplacement idéal du site d'étalonnage, quatre critères ont été considérés :



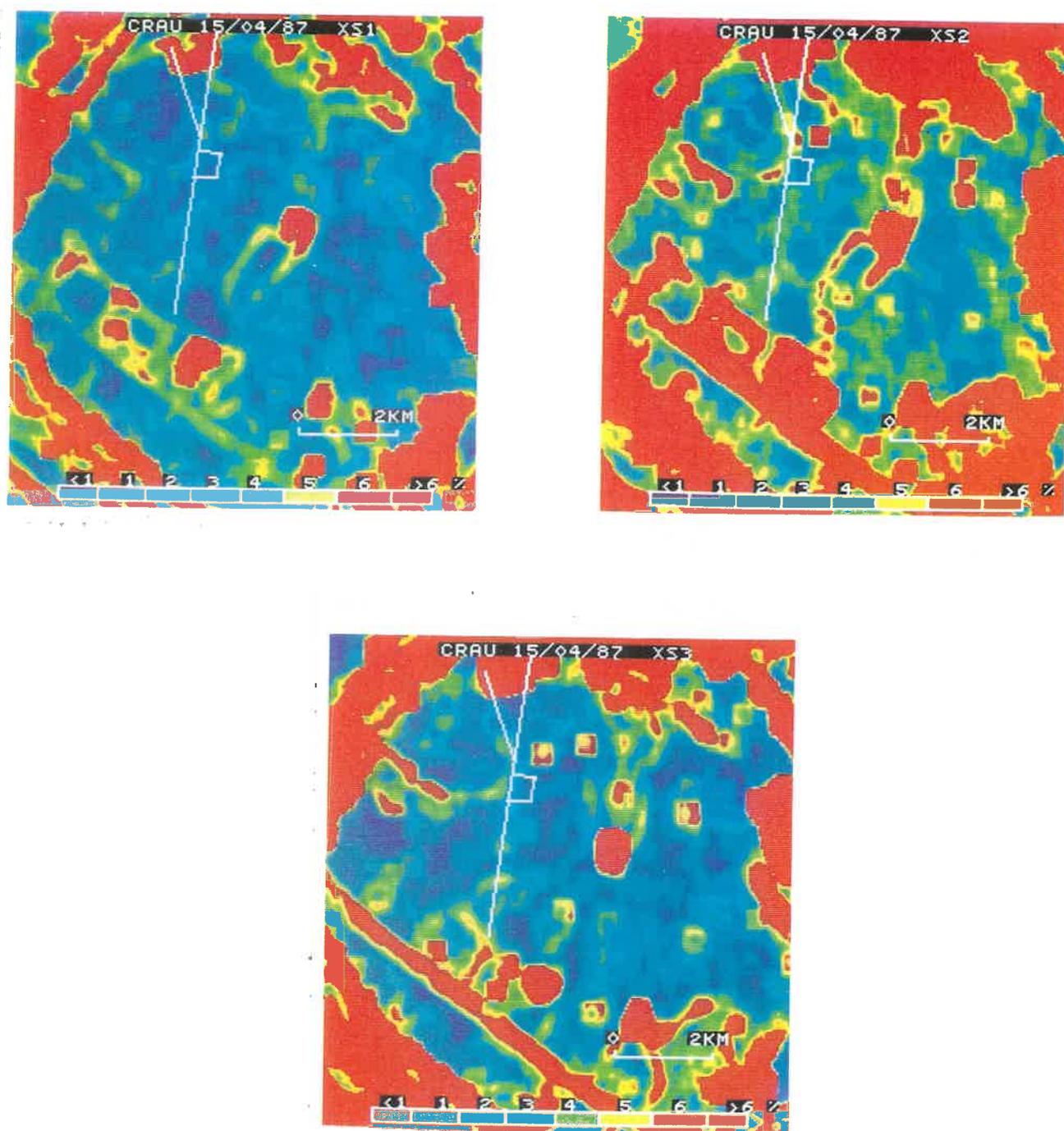
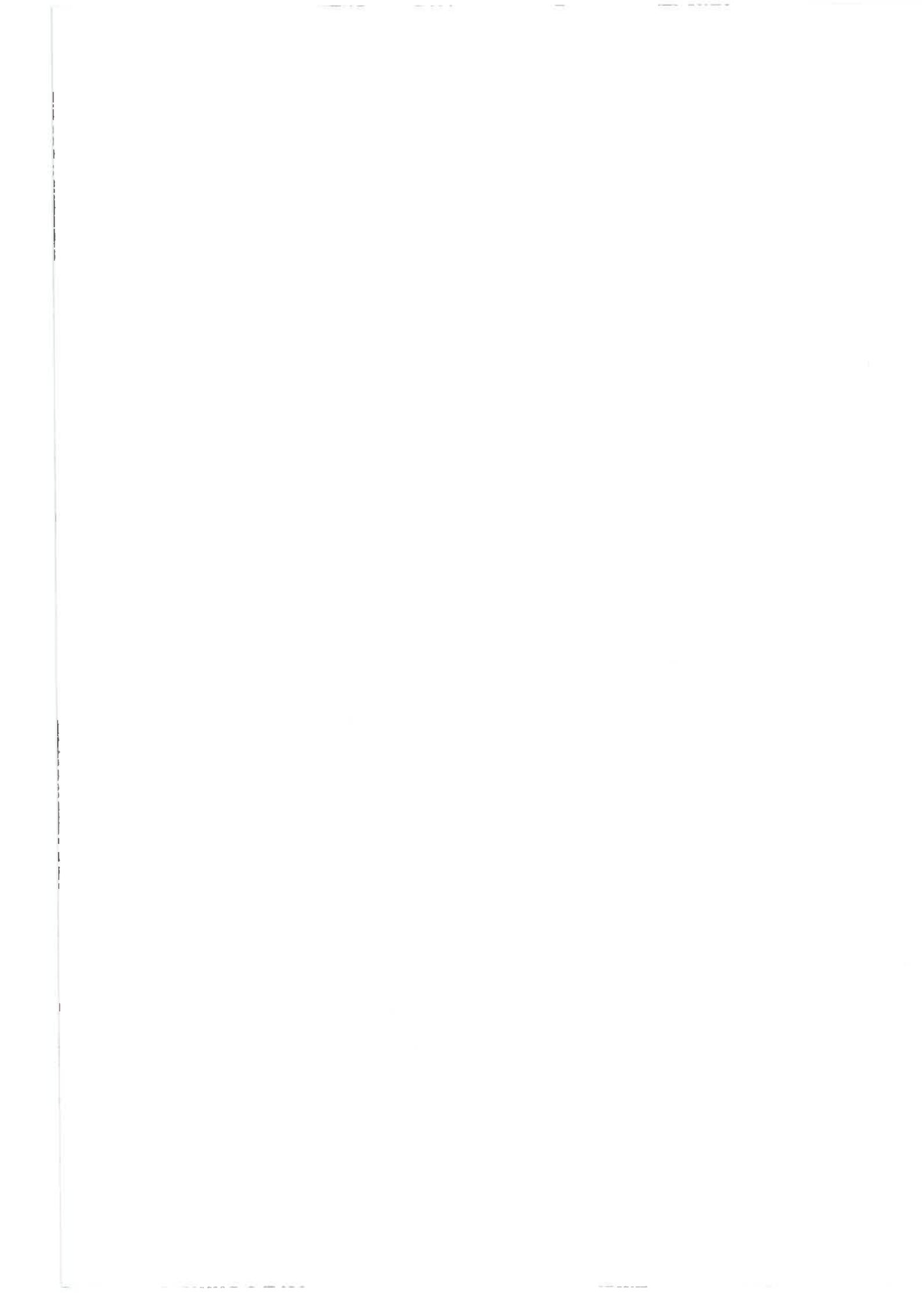


Figure 4. Répartition spatiale du coefficient de variation de la luminance moyenne de blocs de 400 pixels, déplacés sur la surface de la Crau, pour les canaux XS1, XS2 et XS3 de SPOT.



- l'homogénéité des réflectances;
- la faible influence de la localisation;
- la faible influence de l'environnement.
- la facilité de repérage sur les images satellitaires;

L'image acquise le 15 avril (Figure 2) montre que la CRAU est une surface assez réfléchissante et relativement homogène. Ainsi, dans la partie centrale, les effets des erreurs de localisation et de l'environnement seront négligeables. On note la présence de quelques taches brunes qui correspondent à des accumulations d'argile. Sur ces zones la végétation est plus abondante et différente de celle des zones environnantes. Ces surfaces sont peu nombreuses et de petite dimension. Leur influence est donc limitée.

Deux canaux d'assainissement (pour les zones irriguées périphériques) sont facilement repérables sur toutes les images de SPOT. Le site détalonnage a ainsi été placé à 160 m au sud de leur intersection avec un de ses côtés parallèle au canal (canal Centre Crau). Il se trouve dans une zone particulièrement homogène comme le montre la figure 2.

3.1.2. Analyse de la variabilité de la réflectance de la Crau

La figure 4 représente l'image correspondant au coefficient de variation de la moyenne de blocs de 20x20 pixels. Elle est obtenue à partir de la méthode qui est décrite dans le paragraphe 2.3.1. Cette figure montre que la zone qui est retenue est effectivement très

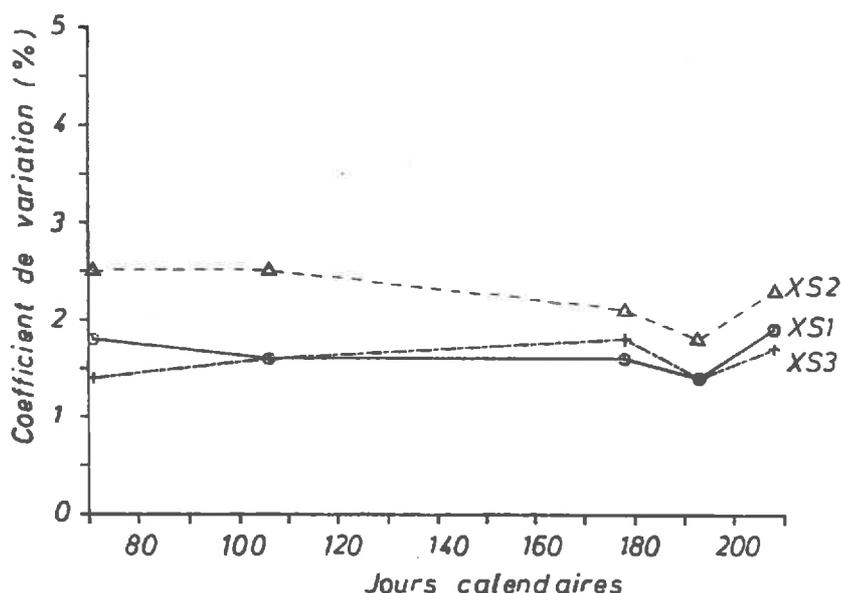


Figure 5. Evolution du coefficient de variation de la luminance moyenne du site d'étalonnage au cours du temps.

homogène puisque le coefficient de variation des réflectances moyennes est inférieur à 2% pour les 3 canaux HRV de SPOT. De plus, la zone de faible variabilité des réflectances est nettement plus grande que la surface retenue pour les étalonnage. Par contre, on peut remarquer que, dans certaines parties de la Crau, le coefficient de variation peut atteindre 6%.

Les analyses effectuées sur les images correspondant aux autres dates donnent des résultats semblables (Guyot et al, 1989a). Par ailleurs, la figure 5 , qui présente l'évolution, au cours du temps, des coefficients de variation des réflectances du site d'étalonnage, montre leur bonne stabilité, bien que les calculs aient été effectués sur des données brutes, non corrigées des effets atmosphériques.

3.1.3. Effet des erreurs de localisation du site

Le site d'étalonnage ne peut pas être localisé à mieux que 1 pixel près à cause, en particulier, de la déformation des pixels lors des visées obliques et des changements d'orientation de l'axe de balayage qui les accompagnent. La figure 6 représente la variation de la luminance moyenne de blocs de 400 pixels (Cf paragraphe 1.3.1.), exprimée sous la forme des valeurs numériques données par SPOT. La différence de niveau radiométrique entre chaque couleur est de 1 unité. Le site d'étalonnage a été placé dans la partie la plus brillante de la Crau qui correspond à la zone dans laquelle la végétation est la moins développée. Ainsi la variabilité temporelle de la réflectance devrait être faible.

La figure 6 montre également que le centre du site peut être déplacé de plusieurs pixels sans affecter sa réflectance moyenne, sauf dans la direction du canal.

Ainsi, quelles que soient les conditions, il sera toujours possible d'obtenir avec SPOT des réflectance qui sont caractéristiques du site d'étalonnage. Il faut donc maintenant rechercher la meilleure manière de caractériser au sol la réflectance du site d'étalonnage.

3.2. Analyse de la variabilité spatiale de la réflectance du site d'étalonnage à différentes échelles

Les effets de la dimension de la surface visée sur la variabilité spatiale de la réflectance du sol, dans les canaux de SPOT, ont été étudiés à partir des photos aériennes numérisées (Cf paragraphe 2.3.2.2.).

Lorsque les mesures au sol sont effectuées sur des pixels de petite dimension (de l'ordre de 0,50m de diamètre), on met en évidence la variabilité locale qui n'apparaît pas

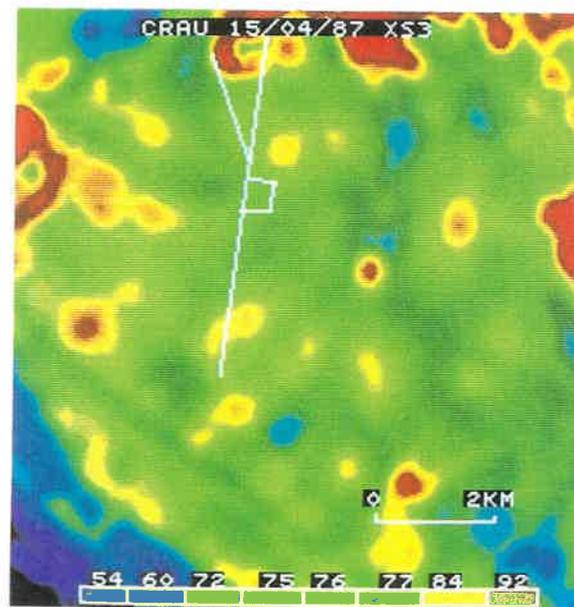
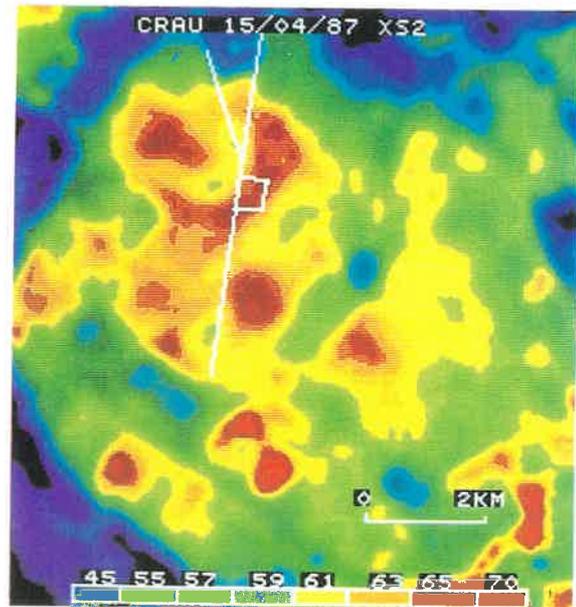
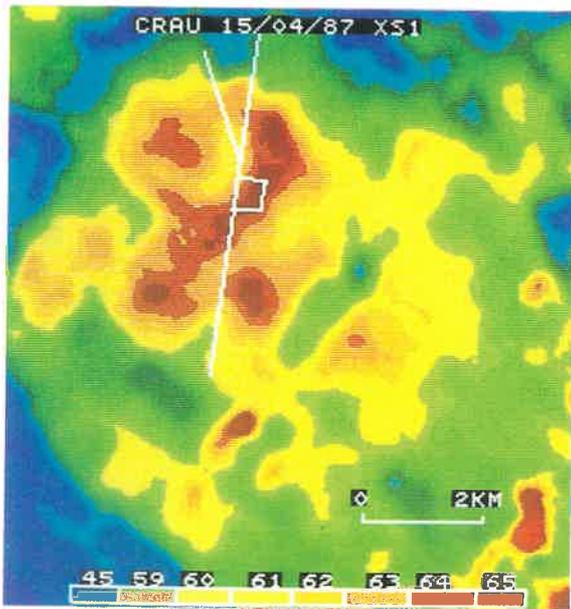


Figure 6. Répartition spatiale de la moyenne des luminance, calculée sur des blocs de 400 pixels, déplacés sur la surface de la Crau pour les canaux XS1, XS2 et XS3 de SPOT.



lorsque l'on passe à des pixels de 10 ou 20m de côté. Le tableau 1 présente les paramètres statistiques relatifs aux individus (1 pixel) pour la bande verte (équivalente à XS1) et la figure 7 présente les résultats des analyses qui ont été effectuées pour les 3 bandes spectrales équivalentes à celles de SPOT.

Tableau 1 : Effet de la dimension des pixels sur le coefficient de variation de la réflectance (%) du site d'étalonnage pour la bande verte. L'analyse est effectuée à partir d'une photo noir et blanc numérisée. La zone considérée est un carré de 25,6mm de côté au centre de la photo. Il correspond, au sol, à un carré de 154m de côté.

| Dimension des pixels (m) | Nb points | Moyenne (%) | Ecart type | Coef. Var. (%) |
|--------------------------|-----------|-------------|------------|----------------|
| 0,6 | 63504 | 16,37 | 1,43 | 8,75 |
| 1,2 | 15625 | 16,38 | 1,30 | 7,97 |
| 2,4 | 3968 | 16,38 | 1,17 | 7,18 |
| 4,8 | 930 | 16,38 | 1,00 | 6,13 |
| 9,6 | 210 | 16,39 | 0,81 | 4,98 |
| 19,2 | 42 | 16,39 | 0,65 | 3,96 |

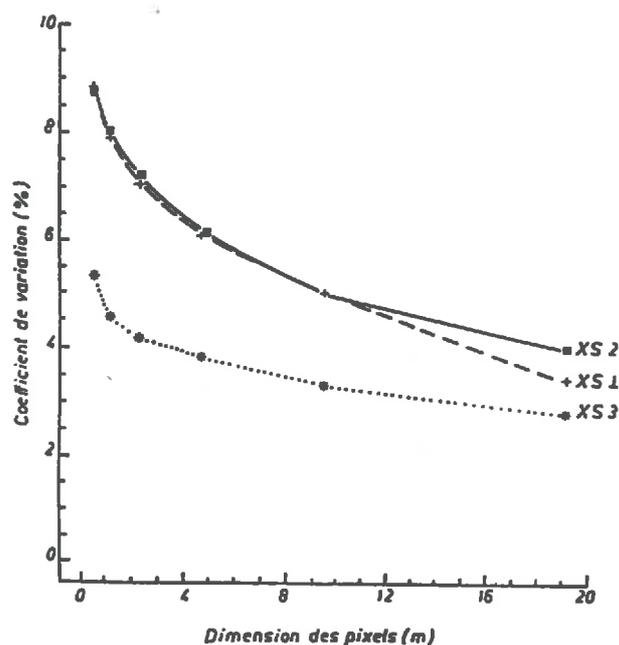


Figure 7. Effet de la dimension des pixels et du nombre de mesures sur le coefficient de variation de la réflectance moyenne.

Ce tableau, ainsi que la figure 7, permettent d'avoir une bonne idée de la variabilité spatiale des réflectances. Lorsque la dimension des pixels passe de 0,6 à 19,2m, le coefficient de variation diminue de façon logique mais cette diminution est relativement faible (on passe de 8,75 à 3,96%). Cela signifie que les hétérogénéités du terrain sont réparties de façon relativement égale aux différentes échelles considérées.

La figure 7 montre également que les coefficients de variation de la réflectance sont plus faibles pour le canal XS3. Cela est certainement dû au fait que les galets qui recouvrent le sol ont une réflectance élevée dans le visible et le proche-infrarouge. Ainsi, dans le visible, le contraste entre galets et végétation est élevé alors qu'il est relativement faible dans le proche-infrarouge. La variabilité de la réflectance, qui est due principalement à l'hétérogénéité de la répartition des plantes, est donc plus faible dans le canal XS3 que dans les canaux XS1 et XS2.

Les valeurs qui sont présentées dans le tableau 1 et sur la figure 7 sont également en bon accord avec les mesures radiométriques, qui ont été effectuées à bord de l'avion (Guyot et al, 1989a) ainsi qu'au sol (tableau 2), compte tenu du fait qu'elles ont été acquises à des dates différentes et dans des bandes spectrales qui n'étaient pas parfaitement identiques (Guyot et al, 1989).

Tableau 2 : Résultats des mesures de réflectance effectuées au sol le 22 mars 1989, entre 9h42 et 11h36 T.U. sur l'ensemble du site de mesure (106 mesures). La réflectance pour XS1 est plus faible que celle qui est indiquée dans le tableau 1 car le sol était humide et la végétation était en pleine croissance (pousse de printemps).

| Grandeur considérée | Canaux | | |
|----------------------|--------|-------|-------|
| | XS1 | XS2 | XS3 |
| Moyenne | 13,18 | 19,05 | 31,81 |
| Minimum | 8,38 | 13,93 | 28,02 |
| Maximum | 16,74 | 23,60 | 35,94 |
| Ecart type | 1,41 | 1,91 | 1,62 |
| Coef. de variation % | 10,7 | 10,0 | 5,1 |

La comparaison des coefficients de variation des données de SPOT et des données simulées avec les photos sur des pixels de 20 m de côté montre que la variabilité des mesures diminue lorsque l'on passe au satellite à cause de la contribution de l'atmosphère à la luminance mesurée et de l'absorption atmosphérique. Dans le visible,

la contribution de la luminance du trajet optique à travers l'atmosphère est plus élevée que dans le proche-infrarouge. Par contre, la luminance du sol étant plus faible dans le visible que dans le proche-infrarouge, l'absorption atmosphérique est plus faible dans ce domaine. Comme nous avons vu que les hétérogénéités du sol de la Crau sont plus faibles dans le proche-infrarouge que dans le visible (figure 7), cela permet de comprendre que les coefficients de variation de la luminance, mesurée par SPOT, soient pratiquement identiques pour tous les canaux. En réalité, lorsque l'on passe du sol au satellite, le coefficient de variation est divisé par 2,2 dans le visible alors que dans le proche-infrarouge il est divisé par 1,6 (Tableau 3). Ces résultats sont en parfait accord avec les données de la littérature (Tanré et al, 1979, 1981).

Tableau 3 : Comparaison des coefficients de variation de la réflectance du site mesurée à différentes échelles et avec différents moyens

| Pixels m | Visible : XS1, XS2 | | | Proche Infrarouge : XS3 | | |
|-------------|--------------------|-------|-----------|-------------------------|-------|-----------|
| | sol | avion | satellite | sol | avion | satellite |
| 0,6 | 10,4 | 8,8 | - | 5,1 | 5,3 | - |
| 10 | - | 5,0 | - | - | 3,3 | - |
| 20 | - | 4,0 | 1,8 | - | 2,8 | 1,8 |

3.3 Analyse de la représentativité des valeurs radiométriques moyennes

Pour étalonner un satellite, il est nécessaire de connaître la réflectance du site d'étalonnage et la précision avec laquelle elle est déterminée. La réflectance moyenne du site est estimée par échantillonnage. La méthode la plus simple à mettre en oeuvre consiste à effectuer des mesures au sol avec un radiomètre. Mais, dans ce cas, les surfaces échantillonnées sont très petites (cercles de 0,53 m de diamètre), comparativement à un pixel de satellite. C'est la raison pour laquelle nous avons également effectué des mesures aéroportées avec des radiomètres. Les surfaces échantillonnées sont alors du même ordre de grandeur (carrés de 10 m de côté) que les pixels de SPOT mais les mesures sont beaucoup plus coûteuses et complexes qu'au sol. Aussi une analyse de la représentativité des données radiométriques moyennes a-t-elle été entreprise. Pour cela, nous avons utilisé les photos multispectrales numérisées qui correspondent au centre du site d'étalonnage (Cf paragraphe 2.3.2.2.).

La figure 8 et le tableau 4 présentent l'évolution du coefficient de variation des réflectances moyennes, calculées sur un nombre croissant de points, régulièrement répartis sur l'ensemble de la surface. On constate que le coefficient de variation de la moyenne diminue lorsque le nombre N d'individus augmente. Si leur distribution était gaussienne, l'écart-type de la moyenne (ou son coefficient de variation) devrait être égal à celui de l'ensemble des individus divisé par « N ». Le tableau 4 et la figure 8 montrent

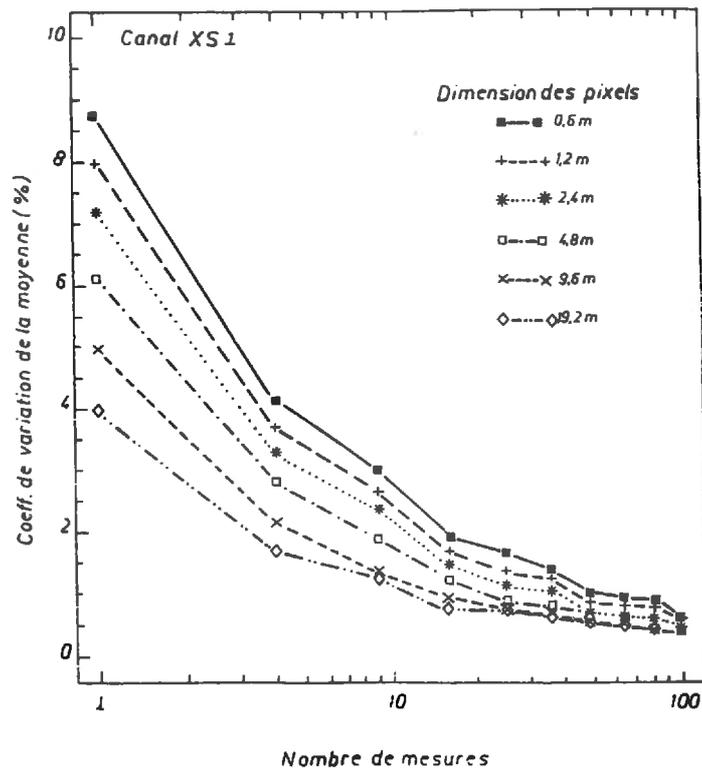


Figure 8. Effet de la dimension des pixels sur le coefficient de variation de la réflectance. Analyses effectuées à partir de photos numérisées.

que tel n'est pas le cas puisque les coefficients de variation des valeurs moyennes sont systématiquement inférieurs à ce que donne la théorie. Cette constatation n'est pas un phénomène isolé puisque des mesures radiométriques effectuées sur des cultures basses, sur des surfaces inférieures à 1m» (Guyot, 1983; Guyot et al, 1983b), ainsi que sur des couverts forestiers, à l'échelle de pixels de SPOT (Guyot et al, 1989), ont montré qu'effectivement la distribution statistique des luminances ou des réflectances est souvent dissymétrique.

Tableau 4 : Coefficients de variation mesurés (mes) et théoriques (th) de la moyenne des réflectances du site d'étalonnage calculées sur un nombre croissant N de pixels de différentes dimensions.

| N | Pixels (m) | | | | | | | | | | | |
|-----|------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | 0,6 | | 1,2 | | 2,4 | | 4,8 | | 9,6 | | 19,2 | |
| | CV mes | CV th | CV mes | CV th | CV mes | CV th | CV mes | CV th | CV mes | CV th | CV mes | CV th |
| 4 | 4,15 | 4,38 | 3,73 | 3,99 | 3,29 | 3,59 | 2,83 | 3,07 | 2,18 | 2,49 | 1,71 | 1,98 |
| 9 | 2,98 | 2,91 | 2,69 | 2,66 | 2,37 | 2,39 | 1,90 | 2,04 | 1,39 | 1,66 | - | 1,32 |
| 16 | 1,95 | 2,19 | 1,73 | 1,99 | 1,49 | 1,80 | 1,25 | 1,53 | 0,81 | 1,25 | - | 0,99 |
| 25 | 1,68 | 1,75 | 1,40 | 1,59 | 1,17 | 1,43 | 0,92 | 1,23 | 0,76 | 1,00 | - | 0,79 |
| 36 | 1,41 | 1,45 | 1,26 | 1,33 | 1,10 | 1,20 | 0,81 | 1,02 | - | 0,83 | - | 0,66 |
| 49 | 1,03 | 1,25 | 0,90 | 1,14 | 0,71 | 1,03 | 0,70 | 0,88 | - | 0,71 | - | 0,57 |
| 64 | 0,94 | 1,09 | 0,84 | 1,00 | 0,68 | 0,90 | 0,66 | 0,77 | - | 0,62 | - | 0,50 |
| 81 | 0,91 | 0,97 | 0,82 | 0,89 | 0,67 | 0,80 | 0,47 | 0,68 | - | 0,55 | - | 0,44 |
| 100 | 0,64 | 0,88 | 0,63 | 0,80 | 0,44 | 0,72 | 0,42 | 0,61 | - | 0,50 | - | 0,40 |

La figure 8 et le tableau 4 montrent également que le coefficient de variation de la réflectance moyenne est moins influencé par la dimension des pixels que par leur nombre. Ainsi, il sera donc possible d'estimer, avec une bonne précision, la réflectance du site d'étalonnage grâce à des mesures radiométriques effectuées au niveau du sol, à condition qu'elles soient suffisamment nombreuses.

Les analyses effectuées à partir des photos numérisées montrent également que, lorsque les points de mesure sont regroupés, la variabilité des données radiométriques est beaucoup plus grande que lorsqu'ils sont dispersés. Ces résultats sont en parfait accord avec les conclusions d'un travail récent effectué par Webster et al (1989).

Le nombre N ($N > 30$) de mesures nécessaires pour estimer la réflectance moyenne m du site d'étalonnage, à partir de mesures au sol, avec une précision p , est donné, pour un intervalle de confiance de 95%, par l'expression suivante (Dagnelie, 1970) :

$$N = 2(1,96.\sigma / p.m)^2$$

dans laquelle σ est l'écart type de la distribution statistique. Mais cette loi n'est valable que pour une distribution gaussienne des réflectances. Ainsi les nombres de mesures

nécessaires, indiqués dans le tableau 5, sont certainement surévalués puisque, par exemple, pour le canal XS1 le coefficient de variation théorique de la moyenne de 100 points est égal à 0,88% alors que sa valeur réelle, déduite de l'analyse des photos, est de 0,64% (Tableau 4). Cela signifie qu'avec un nombre de mesures au sol compris entre 110 et 130 (maximum de mesures possibles dans l'heure qui encadre le passage de SPOT au dessus du site d'étalonnage) la réflectance moyenne du site d'étalonnage devrait être estimée avec une précision meilleure que 2,5% dans le visible et meilleure que 1% dans le proche-infrarouge. Pour avoir une précision meilleure que 2%, dans le visible, il faut doubler le nombre de mesures, c'est à dire opérer simultanément avec deux radiomètres.

Tableau 5 : Nombre de mesures nécessaires pour estimer la réflectance moyenne du site d'étalonnage avec une précision donnée.

| Canaux de SPOT | XS1 | XS2 | XS3 |
|--------------------|------|------|-----|
| Coef. de variation | 10,7 | 10,0 | 5,1 |
| Précision 1% | 880 | 764 | 200 |
| Précision 1,5% | 390 | 341 | 88 |
| Précision 2% | 218 | 192 | 50 |
| Précision 2,5% | 141 | 122 | 32 |

IV - CONCLUSION

Cette étude, qui a été entreprise dans le cadre d'un contrat de recherche financé par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), a permis de définir l'emplacement du site d'étalonnage de SPOT et de préciser la méthodologie opérationnelle de mesure de sa réflectance.

L'originalité de ce travail a été de s'appuyer sur des méthodes de photo-interprétation pour valider et affiner les méthodes d'échantillonnage qui sont utilisées au sol. Les données photographiques ont ainsi été converties en des données radiométriques équivalentes à celle d'un scanneur aéroporté.

La précision avec laquelle est estimée la réflectance moyenne du site d'étalonnage dépend du nombre de mesures effectuées et de leurs distributions spatiale et statistique, mais par contre relativement peu de la dimension de la surface visée.

Enfin comme cela pouvait être prévu, la variabilité spatiale de la luminance du site, au niveau du satellite, est fortement réduite comparativement à celle qui est mesurée au sol à cause de la présence de l'atmosphère.

REMERCIEMENTS

Cette étude fait partie des recherches financées par le CNES pour la caractérisation des propriétés optiques de la Crau en vue de son utilisation comme site d'étalonnage pour SPOT 4 (Marché N° 833/CNES/87/4891/00).

Les auteurs tiennent à remercier G. Flouzat grâce à qui il a été possible de numériser les photos aériennes avec le microdensitomètre installé au CESR à Toulouse.

BIBLIOGRAPHIE

- Chavez P.S.Jr., 1989; Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper Multispectral images. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 55(9) : 1258-1294.
- Curran P.J., Hay A.M., 1986; The importance of measurement error for certain procedures in remote sensing at optical wavelengths. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 52(2) : 229-241.
- Curran P.J., Munday T.J., Milton E.J., 1981; A comparison between two photographic methods for the determination of relative bidirectional reflectance. *Int. J. Remote Sens.*, 2(2): 185-188.
- Curran P.J., Wilkinson W.B., 1985; Mapping the concentration and dispersion of dye from a long sea outfall using digitized aerial photography. *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 6(11) : 1735-1748.
- Curran P.J., Williamson H.D., 1985; The accuracy of ground data used in remote-sensing investigations. *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 6(10) : 1637-1651.
- Curran P.J., Williamson H.D., 1986; Sample size for ground and remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 20 : 31-41.
- Dagnelie P., 1970; *Théorie et méthodes statistiques vol 2*. Les presses Agronomiques de Gembloux, A.S.B.S.L., Ed. J. Duclot, S.A., Gembloux : 451p.
- Emori Y., Yasuda Y., Saito G., 1983; Yield estimation of sugar beets by infrared aerial color photography. 2^{ème} Coll. Int. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Bordeaux 12-16 sept 1983, les Colloques de l'INRA N° 23, Ed INRA Publ. Paris : 175-184.
- Frouin R., Gautier C., 1987; Calibration and NOAA-7 AVHRR, GEOS-5, and GEOS-6 VISSR/VAS solar channels. *Remote Sens. Environ.* 22 : 73-101.
- Guyot G., 1983; Variabilité angulaire et spatiale des données spectrales dans le visible et le proche infrarouge. 2^{ème} Coll. Int. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Bordeaux 12-16 sept 1983, les Colloques de l'INRA N° 23, Ed INRA Publ. Paris : 27-44.

Guyot G., 1988; Dispositif utilisé à l'INRA pour les mesures radiométriques aéroportées. In Actes du Séminaire de Monétier-les-Bains, 12-16 Janvier 1987. INRA Projet Télédétection : 92-97

Guyot G., GU X., Verbrugge M., 1989a; Caractérisation des propriétés optiques du site de la Crau. Rapport final Marché N° 833/CNES/87/4891/00, INRA Bioclimatologie Montfavet (France) : 79p.

Guyot G., Guyon D., Riom J., 1989b; Factors affecting the spectral response of forest canopies, a review. *Geocarto International* 3 : 3-18.

Hatfield J.C., Kanemasu E.T., Asrar G., Jackson R.D., Pinter P.J., Reginato R.J., Idso S.B., 1985; Leaf area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat. *Int. J. Remote Sens.*, 6(2) : 167-175.

Guyot G., Hanocq J.F., Buis J.P., Saint G., 1983a; Mise au point d'un radiomètre de simulation de SPOT. In C.R. 2e Coll. Intl. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Bordeaux, 12-16 septembre 1983 (Ed. INRA Publ.), Les Colloques de l'INRA N° 23 : 233-242

Guyot G., Hanocq J.F., Lepine T., Verbrugge M., 1983b; Etude expérimentale de la variabilité spatiale et temporelle de couverts de céréales. 2^{eme} Coll. Intl. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Bordeaux 12-16 sept 1983, les Colloques de l'INRA N° 23, Ed INRA Publ. Paris :219-231.

Maracci G., Andreoli G., Grassi P., Hosgood B., Verbrugge M., 1986; Analysis of multi-level measurements of spectral signatures for less favoured areas. In Proc. 3rd. Int Coll. Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Les Arcs (France) 16-20 Dec. 1985. Ed. ESA Paris, ESA SP-247 : 361-364.

Maracci G., Tassone G., Toselli F., 1981; The use of a reference panel in the visible and thermal multispectral scanners. Coll. Intl. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Avignon 8-11 sept 1981, les Colloques de l'INRA N° 5, Ed. INRA Publ. Paris : 165-172

Price J.C., 1987a; Calibration of satellite radiometers and the comparison of vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 21 : 15-27

Price J.C., 1987b; Radiometric calibration of satellite sensors in the visible and near infrared: history and outlook. *Remote Sens. Environ.* 22 : 3-9

Robinove C.J., 1982; Computation with physical values from Landsat digital data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 48(5) : 781-784.

Slater P.N., Biggar S.F., Holm R.G., Jackson R.D., Mao Y., Moran M.S., Palmer J.M., Yuan B., 1986; Absolute calibration of the Thematic Mapper. SPIE 660 : 2-8.

Slater P.N., Biggar S.F., Holm R.G., Jackson R.D., Mao Y., Moran M.S., Palmer J.M., Yuan B., 1987; Réflectance and radiance based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors. Remote Sens. Environ. 22 : 11-37

Slater P.N., Doyle F.J., Fritz N.L., Welch R., 1983; Photographic systems for remote sensing. Manual of remote sensing, second edition, American Society of Photogrammetry : 231-291

Tanré D., Herman M., Deschamps P.Y., de Lefte A., 1979; Atmospheric modelling for space measurements of ground reflectances, including bidirectional properties. Appl. Optics 18(21) : 3587-3594

Tanré D., Herman M., Deschamps P.Y., 1981; Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance. Applied Optics. 20 : 3676-3684.

Valério C., Llebaria A., 1982; A quantitative multispectral analysis system for aerial photographs applied to coastal planning. Int. J. Remote Sens., 3(2) : 181-197.

Webster R., Curran P.J., Munden J.W., 1989; Spatial correlation in reflected radiation from the ground and its implications for sampling and mapping by ground-based radiometry. Remote Sens. Environ. 29 : 67-78.

William A.M., David M.A., 1986; Satellite data availability and calibration documentation for land surface climatology studies. Rapport final: ISLSCP Report No. 5

II-3 Variabilité spectrale de la réflectance du site

La figure 2.13 présente le spectre moyen de réflectance qui a été obtenu. Nous pouvons remarquer que ce spectre est relativement continu. Il ne présente pas de bandes d'absorption marquées. La présence de la végétation se traduit seulement par une légère diminution de la réflectance vers 680 nm (bande d'absorption de la chlorophylle).

La figure 2.14 présente l'ensemble des spectres de réflectance qui ont été obtenus. Elle permet d'avoir une idée de la dispersion des caractéristiques spectrales de la Crau et du bruit de l'instrument. Comme les mesures n'ont été effectuées que sur une surface limitée la dispersion observée n'est donc pas représentative de l'ensemble du site. Cependant lorsque nous avons considéré chaque spectre nous avons pu remarquer que tous avaient pratiquement la même forme et se déduisaient les uns des autres par simple homothétie.

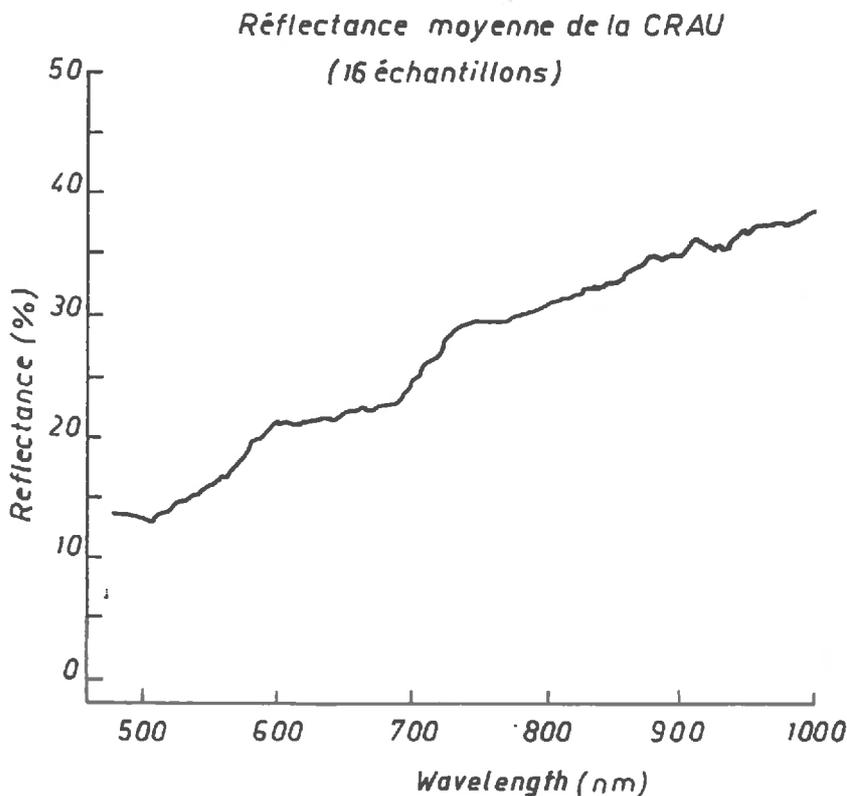


Figure 2.13 : Spectre de réflectance moyen de la partie centrale du site d'étalonnage.

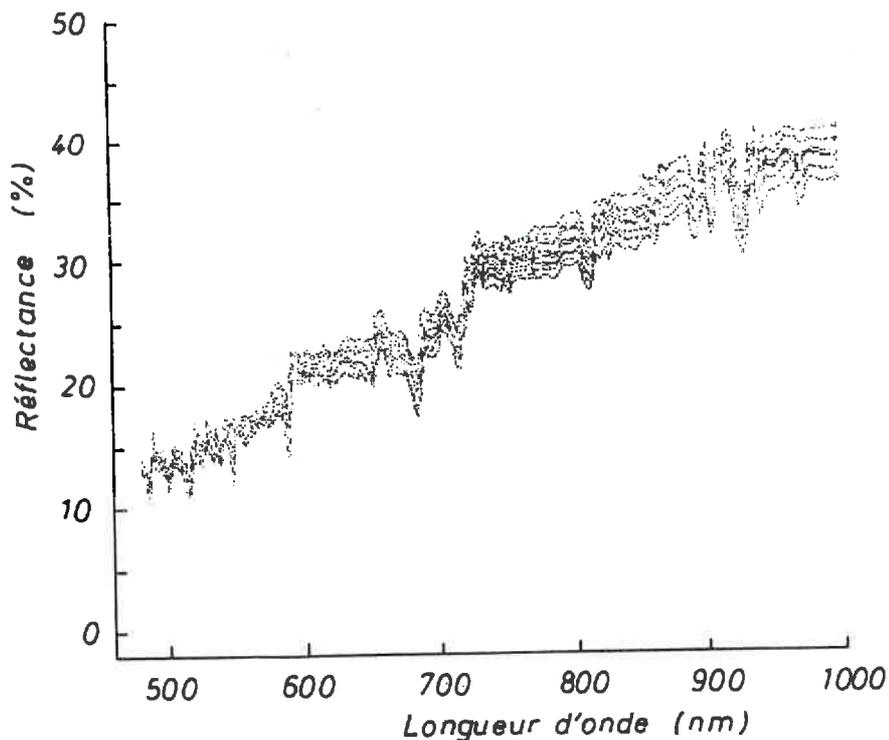


Figure 2.14 : Ensemble des spectres de réflectance qui ont été acquis.

Si l'on compare la figure 2.13 à la figure 2.14 on remarque sur cette dernière l'existence d'un certain nombre de pics qui sont dus à un défaut de mesure. En effet le spectromètre mesure alternativement l'éclairement et la luminance. Si la vitesse de balayage du spectre est trop élevée, les deux spectres dont on fait le rapport sont alors très légèrement décalés en longueur d'onde. Le passage d'une bande étroite d'absorption atmosphérique se traduit alors par l'existence de deux pics, l'un vers le haut, l'autre vers le bas. Comme nous savons, par les nombreux résultats de la littérature et par nos mesures (Guyot, 1989), que ni le sol ni la végétation ne présentent de bandes d'absorption étroites dans ce domaine, nous avons donc supprimé les pics étroits et nous les avons remplacés par une valeur moyenne de la réflectance dans le domaine considéré.

La régularité de la forme du spectre moyen va faciliter la détermination des coefficients qui permettent de corriger les effets dus à la non superposition des bandes spectrales des radiomètres et du satellite.

II-4 Variabilité angulaire de la réflectance du site

Quatre série d'indicatrices de réflexions ont été déterminées le 18 février, le 9 mars, le 14 avril et le 27 juillet 1988. Les mesures ont été effectuées dans différents plans verticaux : les plans perpendiculaires et parallèles à la direction du soleil et les deux plans bissecteurs (tableau 2.8).

Tableau 2.8: conditions dans lesquelles les indicatrices de réflexion ont été déterminées.

| Date | Heure | Azimut par rapport au soleil | | | |
|----------|-------|------------------------------|----|------|------|
| | | 90° | 0° | +45° | -45° |
| 18.02.88 | 12.40 | X | | | |
| | 13.22 | X | | | |
| 09.03.88 | 11.50 | X | | | |
| | 12.05 | X | | | |
| | 12.25 | X | | | |
| 14.04.88 | 08.20 | X | X | | |
| | 10.33 | X | X | | |
| | 11.37 | X | X | | |
| | 12.44 | X | X | | |
| | 14.00 | X | X | | |
| | 15.06 | X | X | | |
| 27.07.88 | 07.04 | X | X | X | X |
| | 11.25 | X | X | X | X |

II-4-1 Indicatrices déterminées dans le plan perpendiculaire à la direction du soleil

Treize indicatrices ont été déterminées entre le 18 février et le 27 juillet. Elles correspondent à des angles solaires zénithaux compris entre 24 et 69°. Pour les angles solaires zénithaux moyens ($50 \pm 5^\circ$), les indicatrices sont très proches de celle d'une surface lambertienne. C'est ce que montre la figure 2.15. Chacune des 13 indicatrices a été déterminée en un point différent. Les résultats obtenus montrent la bonne homogénéité des caractéristiques optiques directionnelles du site. Dans le plan parallèle aux rayons solaires la variation relative des indicatrices par rapport à la moyenne n'excède pas $\pm 8\%$ pour une inclinaison de la visée de 40° et, dans le plan perpendiculaire à la direction des rayons solaires, elle n'excède pas $\pm 5\%$.

Lorsque le soleil est bas (angle zénithal $> 55^\circ$) on peut constater sur la figure 2.16 que le facteur de réflectance du sol augmente lorsqu'on s'écarte de la verticale. Cet écart est d'autant plus grand que le soleil est plus bas.

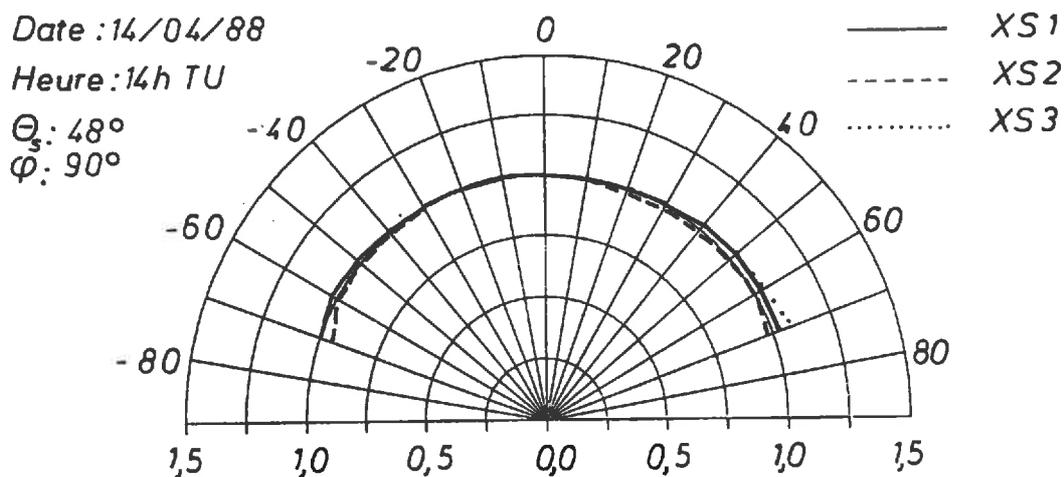


Figure 2.15 : Indicatrices de réflectance du sol de la Crau déterminées dans le plan vertical, perpendiculaire à la direction du soleil et pour un angle solaire zénithal voisin de 50°.

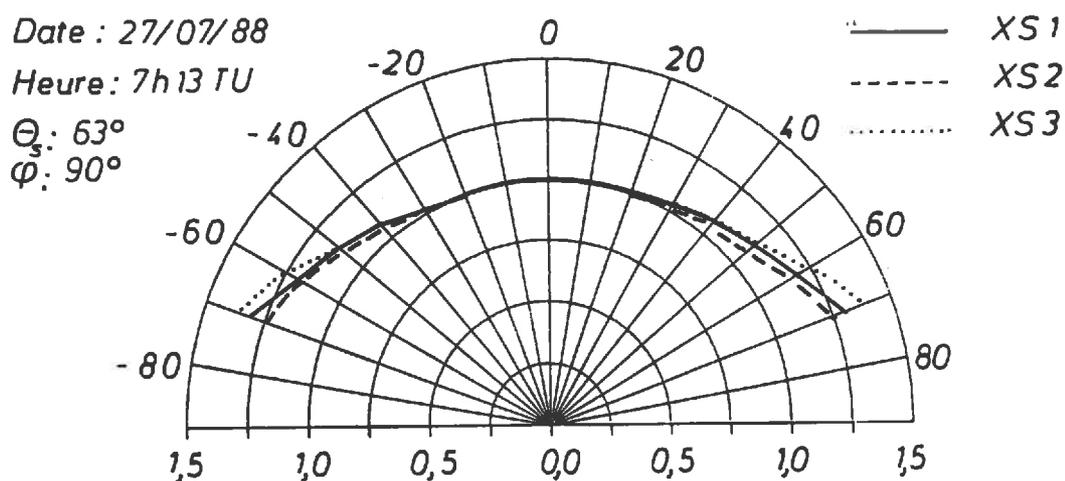


Figure 2.16 : Indicatrices de réflectance du sol de la Crau déterminées dans le plan vertical, perpendiculaire à la direction du soleil et pour un angle solaire zénithal supérieur à 55°.

Lorsque le soleil est haut (angle zénithal $< 45^\circ$), on observe alors le phénomène opposé. Le facteur de réflectance diminue lorsqu'on s'écarte de la verticale comme le montre la figure 2.17.

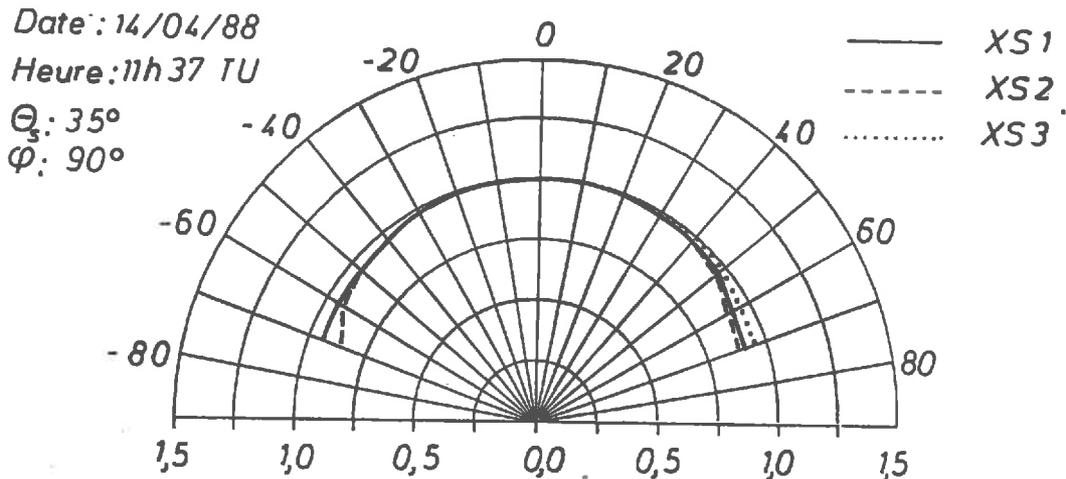


Figure 2.17 : Indicatrices de réflectance du sol de la Crau déterminées dans le plan vertical, perpendiculaire à la direction du soleil et pour un angle solaire zénithal inférieur à 45° .

Dans tous les cas, les courbes correspondant aux 3 canaux de SPOT ont des tracés très proches (écart entre les courbes inférieur à $\pm 3\%$ pour $\theta_v < 40^\circ$ et inférieur à $\pm 6\%$ pour $\theta_v > 40^\circ$) car la végétation a un effet perturbateur très limité, sauf peut être pour les mesures du mois de juillet.

II-4-2 Indicatrices déterminées dans le plan parallèle aux rayons solaires

Dans ce plan les indicatrices présentent une forte dissymétrie. La valeur maximum du facteur de réflectance devrait être observée avec une visée parallèle aux rayons solaires. Cependant les mesures étant effectuées avec un radiomètre situé à 2m du centre de la surface visée son ombre portée (dont la dimension n'est pas négligeable par rapport à la surface visée), perturbe la mesure. Aussi, au lieu du maximum escompté un minimum local apparaît sur les courbes (figure 2.18).

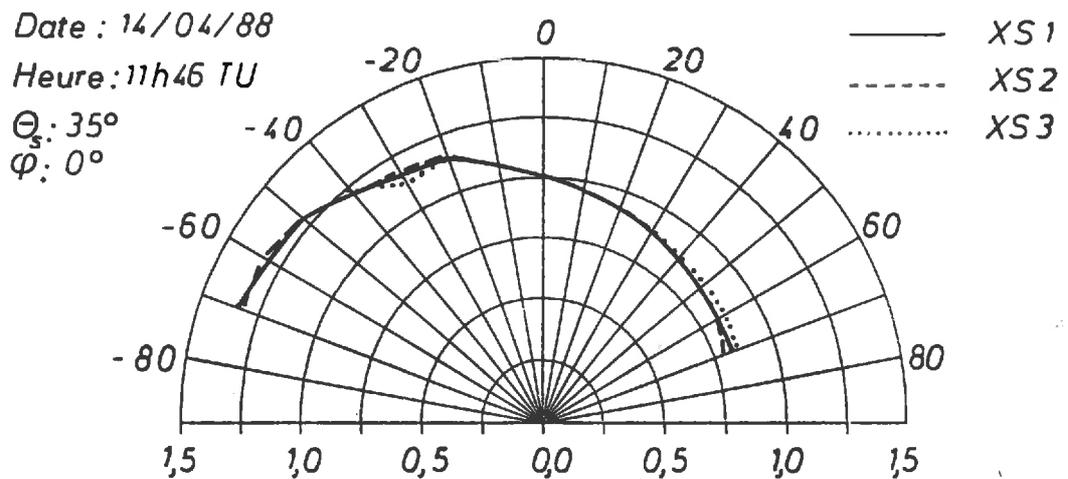


Figure 2.18 : Indicatrices de réflectance du sol de la Crau déterminée dans le plan vertical parallèle à la direction du soleil.

Comme pour les mesures effectuées dans le plan vertical, perpendiculaire à la direction des rayons solaires, la forme des indicatrices de réflectance dépend de l'angle solaire zénithal. L'amplitude de variation du facteur de réflectance est d'autant plus grande que le soleil est plus bas sur l'horizon.

Les différentes indicatrices de réflexion ont été déterminées en des points différents, et à des époques de l'année différentes. Malgré cela on peut noter la bonne homogénéité des résultats obtenus. Cela montre donc que les variations spatio-temporelles des propriétés optiques directionnelles du site choisi sont faibles. Les données expérimentales obtenues pourront donc être utilisées pour corriger les variations angulaires de la réflectance.

II-4-3 Indicatrices déterminées dans les plans verticaux dont l'azimut est $\pm 45^\circ$ par rapport au soleil

Dans ces plans, les indicatrices qui sont obtenues ont des formes intermédiaires entre celles qui sont déterminées dans les plans parallèles et perpendiculaires à la direction des rayons solaires, comme le montre la figure 2.19.

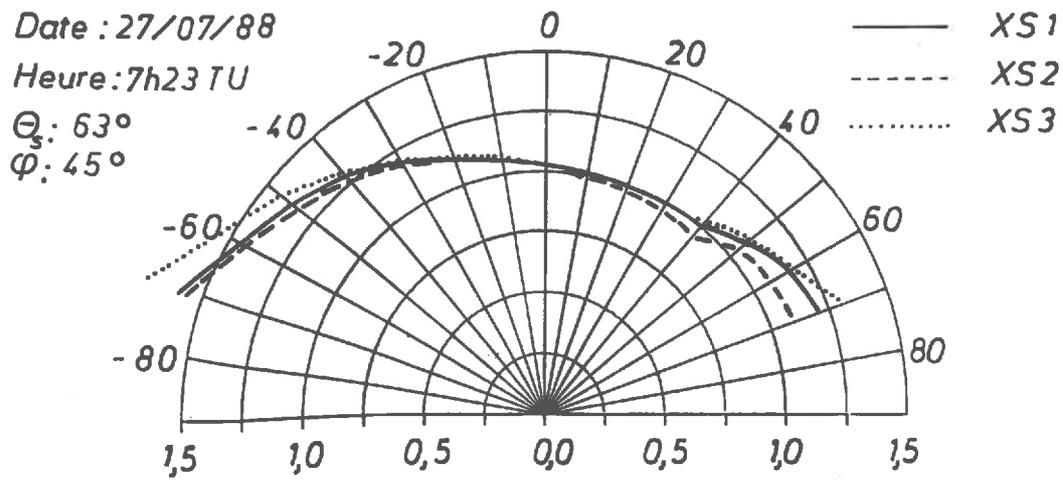


Figure 2.19 a: Indicatrices de réflectance du sol de la Crau déterminées dans les plans verticaux dont l'azimut fait un angle de $+45^\circ$ avec la direction du soleil.

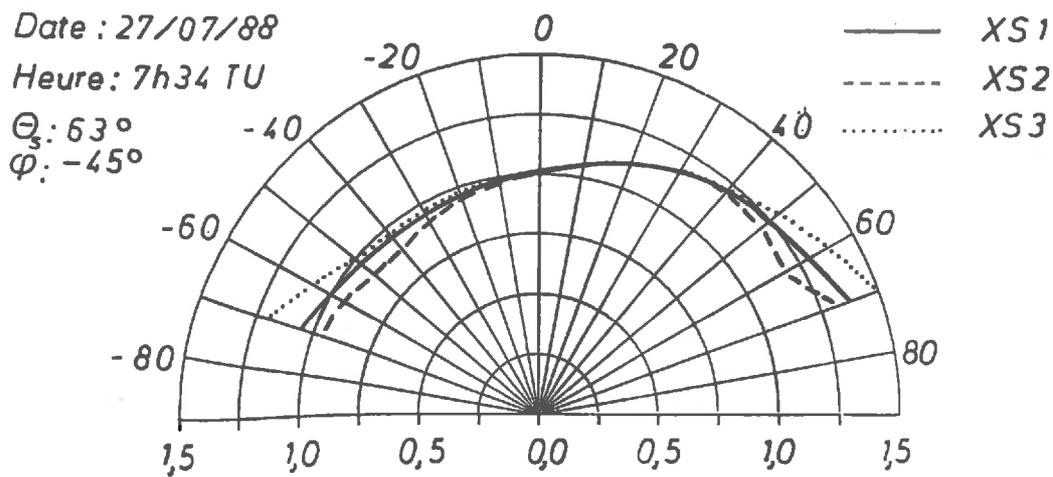


Figure 2.19b : Indicatrices de réflectance du sol de la Crau déterminées dans les plans verticaux dont l'azimut fait un angle de -45° avec la direction du soleil.

II-4-4 Représentation hémisphérique de la variation du facteur de réflectance.

A partir des mesures de la variation du facteur de réflectance directionnel de la surface de la Crau dans 4 plans verticaux il est possible de représenter sa variation dans un hémisphère. Nous avons ainsi utilisé les mesures du 27 juillet 1988 pour tracer les figures 2.20, 2.21, et 2.22.

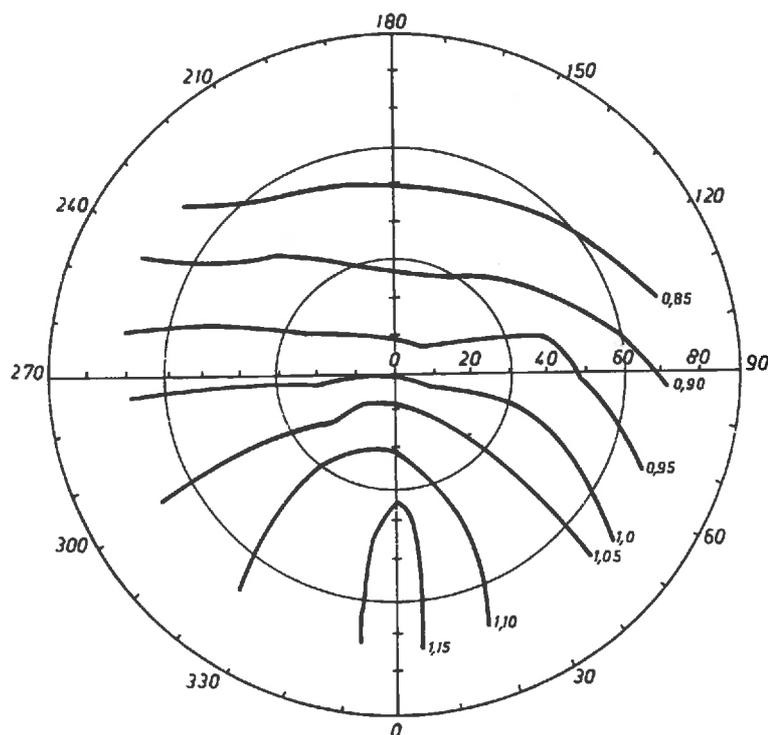


Figure 2.20 : Représentation dans un demi-espace de la variation relative du facteur de réflectance directionnel du sol de Crau pour le canal XS1 (27 juillet 1988, 11h52).

L'azimut par rapport au soleil est indiqué sur le cercle extérieur. Les cercles concentriques correspondent aux différentes inclinaisons de la visée. Le cercle central (inclinaison de la visée de 30°) délimite le cône dans lequel sont comprises toutes les visées de SPOT.

Nous pouvons tout d'abord remarquer sur les figures 2.20, 2.21, et 2.22 que la variation angulaire de la réflectance est très voisine pour les deux canaux du visible alors que dans le proche-infrarouge, elle présente quelques différences.

Lors du passage de SPOT au dessus de la Crau l'azimut des lignes balayées, par rapport au soleil, varie assez largement selon la saison et le dépointage de la visée comme l'indique le tableau 2.9.

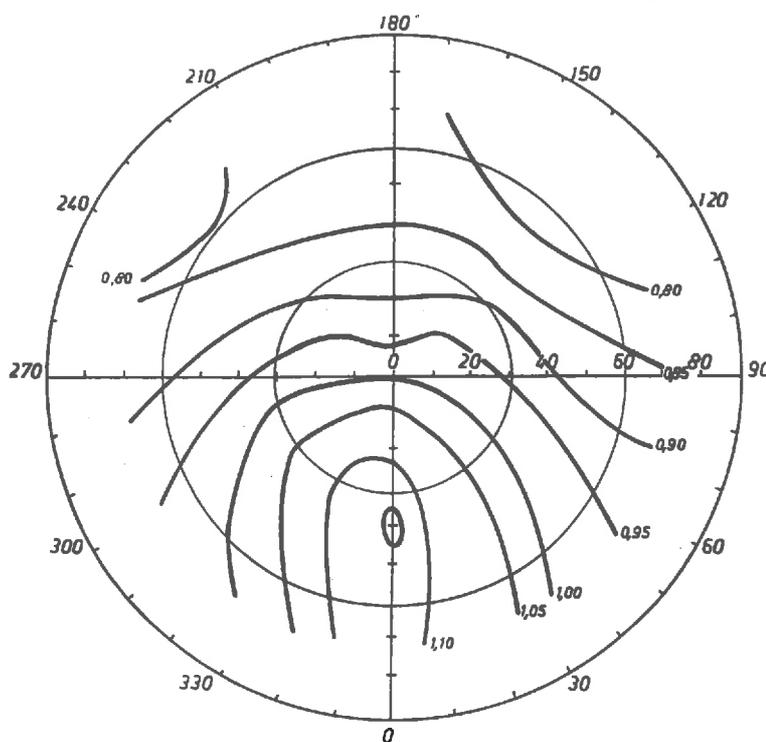


Figure 2.21 : Représentation dans un demi-espace de la variation relative du facteur de réflectance directionnel du sol de Crau pour le canal XS2 (27 juillet 1988, 11h52).

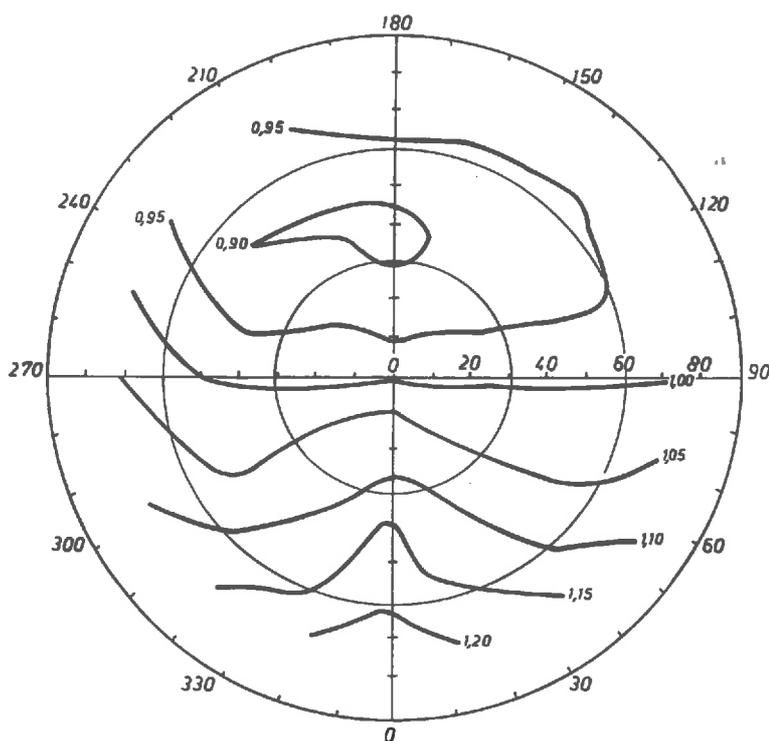


Figure 2.22 : Représentation dans un demi-espace de la variation relative du facteur de réflectance directionnel du sol de Crau pour le canal XS3 (27 juillet 1988, 11h52).

En considérant les données du tableau 2.9 ainsi que les figures 2.20, 2.21, et 2.22 nous pouvons constater que les variations de la réflectance du sol de Crau peuvent excéder $\pm 10\%$ entre une visée verticale de SPOT et une visée effectuée avec le dépointage maximum de HRV vers l'Est ou vers l'Ouest. Pour les étalonnages du satellite il sera donc nécessaire de corriger l'effet de la variation angulaire de la réflectance.

Tableau 2.9 : Variation de l'azimut du balayage de SPOT par rapport au soleil en fonction de la date et de l'inclinaison de la visée comptée positivement vers l'Est.

| Dates | Inclinaison de la visée SPOT (degrés) | | | | | | |
|---------------------|---------------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | -30 | -20 | -10 | 0 | +10 | +20 | +30 |
| 21 Juin | 44,5 | 44,0 | 43,0 | 41,0 | 140,0 | 141,5 | 142,5 |
| 21 Mars 23 Sept. | 59,5 | 59,0 | 58,0 | 56,0 | 125,0 | 126,5 | 127,5 |
| 21 Déc. | 66,5 | 66,0 | 65,0 | 63,0 | 118,0 | 119,5 | 120,5 |

II-4-5 Effets de la hauteur du soleil et variabilité spatio-temporelle

La hauteur du soleil affecte la réflectance oblique et la réflectance verticale du sol de la Crau.

La forme des indicatrices de réflectance étant assez stable dans le temps nous avons utilisé l'ensemble des données dont nous disposons pour analyser la variation du facteur de réflectance du sol de la Crau en fonction de la hauteur du soleil et de l'inclinaison de la visée. Les figures 2.23 et 2.24 présentent, à titre d'exemple, les données obtenues pour le canal XS2. Les résultats obtenus pour les canaux XS1 et XS3 sont tout à fait semblables.

Dans le plan vertical perpendiculaire à la direction des rayons solaires le facteur de réflectance est peu sensible à la hauteur du soleil et à l'inclinaison de la visée (figure 2.23).

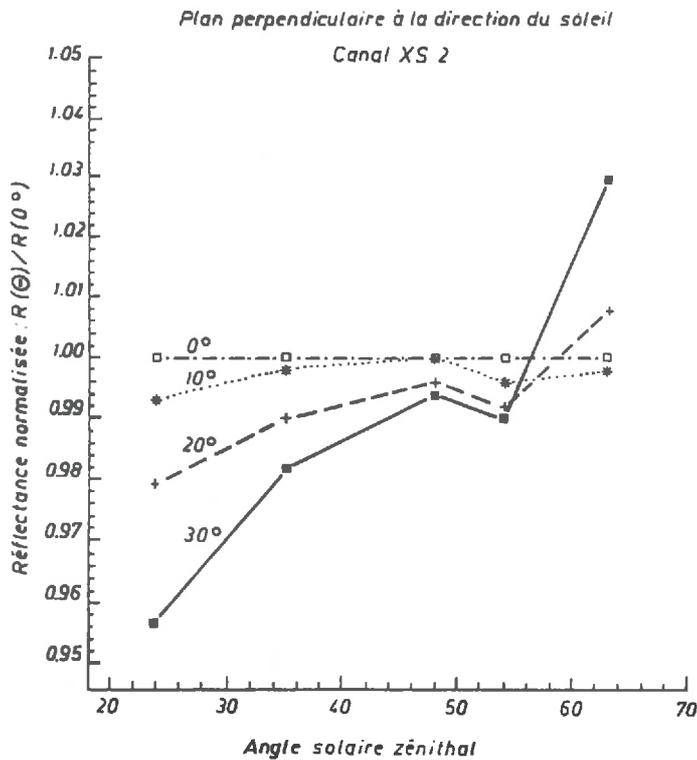


Figure 2.23 : Variation du facteur de réflectance normalisé par la mesure selon la verticale pour chaque angle solaire zénithal et pour différentes inclinaisons de la visée de SPOT dans le plan vertical perpendiculaire à la direction du soleil.

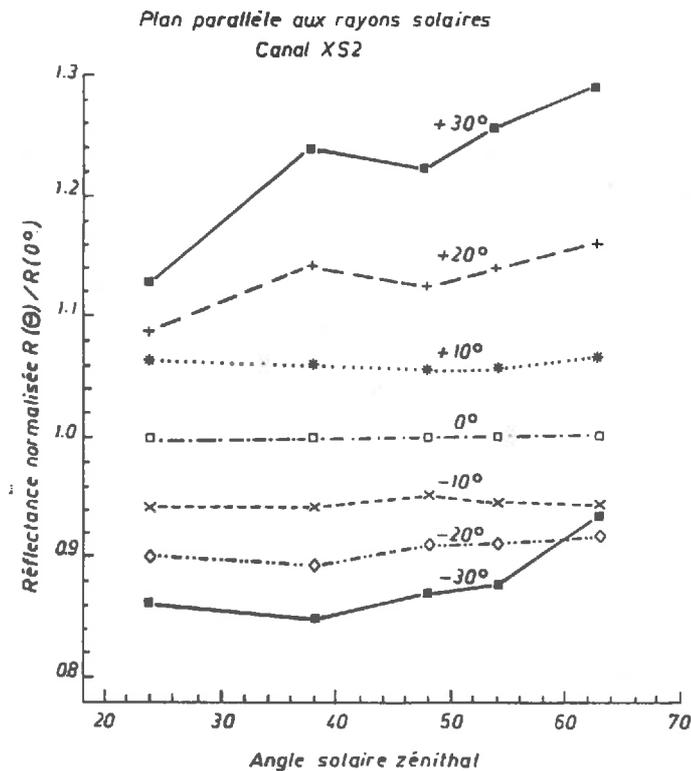


Figure 2.24 : Variation du facteur de réflectance normalisé par la mesure selon la verticale pour chaque angle solaire zénithal et pour différentes inclinaisons de la visée de SPOT dans le plan vertical parallèle à la direction du soleil.

Dans le plan vertical parallèle aux rayons solaires le facteur de réflectance est relativement indépendant de l'angle solaire zénithal pour des inclinaisons de la visée n'excédant pas $\pm 20^\circ$. Pour les fortes inclinaisons de la visée le facteur de réflectance dépend alors de la hauteur du soleil (figure 2.24).

Ces figures montrent que pour les inclinaisons de la visée de SPOT, qui n'excèdent pas 20° , il est possible de définir un facteur de correction angulaire indépendant de la hauteur du soleil. L'incertitude sur l'estimation de la correction à apporter pour des mesures effectuées, dans le plan vertical parallèle aux rayons solaires, est de $\pm 5\%$. Dans les plans verticaux dont l'azimut est 90° ou $\pm 45^\circ$ par rapport au soleil, elle n'est plus que de $\pm 2\%$.

A partir des indicatrices de réflectance que nous avons mesurées nous avons donc essayé de déterminer le facteur de correction par lequel il faut multiplier les données de réflectance mesurées au sol pour obtenir la réflectance oblique mesurée par SPOT (tableau 2.10). Pour la géométrie de visée de SPOT la variation angulaire de la réflectance dans les canaux XS1 et XS2 est pratiquement identique (figures 2.20 et 2.21) Nous n'avons donc déterminé qu'un seul coefficient de correction, compte tenu de la précision avec laquelle il pouvait être estimé. Pour une date donnée, les coefficients de correction peuvent être interpolés. Cependant nous verrons par la suite que l'on peut éviter ces corrections en effectuant des mesures de luminance du sol avec la même géométrie de visée que le satellite.

Ces informations sont cependant peu précises car elles reposent sur un nombre de mesures insuffisant pour pouvoir effectuer une analyse statistique. Comme les indicatrices ont été déterminées en des points différents et au cours de journées différentes nous avons cependant essayé d'avoir une estimation grossière de la variabilité spatio-temporelle de la réflectance oblique de la Crau. Pour cela nous avons regroupé des mesures qui correspondaient à des mêmes inclinaisons de la visée et à des hauteurs de soleil voisines. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.11. Il montre que la variabilité des données est relativement faible sauf pour les mesures effectuées avec une forte inclinaison à l'opposé du soleil.

Tableau 2.10 : Facteurs de correction par lesquels il faut multiplier la réflectance mesurée verticalement au sol pour obtenir la réflectance oblique mesurée par SPOT. L'inclinaison de la visée de SPOT est comptée positivement vers l'Est.

| Canaux XS1 et XS2 | | | | | | | |
|---------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Dates | Inclinaison de la visée SPOT (degrés) | | | | | | |
| | -30 | -20 | -10 | 0 | +10 | +20 | +30 |
| 21 Juin | 1,06 | 1,05 | 1,03 | 1,00 | 0,95 | 0,93 | 0,91 |
| 21 Mars 23 Sept. | 1,12 | 1,04 | 1,02 | 1,00 | 0,96 | 0,94 | 0,92 |
| 21 Déc. | 1,18 | 1,06 | 1,01 | 1,00 | 0,97 | 0,95 | 0,95 |

| Canal XS3 | | | | | | | |
|---------------------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Dates | Inclinaison de la visée SPOT (degrés) | | | | | | |
| | -30 | -20 | -10 | 0 | +10 | +20 | +30 |
| 21 Juin | 1,07 | 1,05 | 1,03 | 1,00 | 0,97 | 0,95 | 0,93 |
| 21 Mars 23 Sept. | 1,16 | 1,09 | 1,03 | 1,00 | 0,98 | 0,95 | 0,94 |
| 21 Déc. | 1,17 | 1,09 | 1,02 | 1,00 | 0,97 | 0,98 | 0,98 |

Tableau 2.11 : Amplitude maximum relative de variation du facteur de réflectance oblique de la Crau $R\theta/R_0$ (R_0 : facteur de réflectance vertical) pour différents angles solaires zénithaux θ_s et différentes inclinaisons de la visée θ_v (inclinaison comptée négativement vers le soleil dans le plan parallèle aux rayons solaires).

| Plan perpendiculaire à la direction du soleil | | | | | | |
|---|------------|------|------|------|------|------|
| Canaux | XS1 et XS2 | | | XS3 | | |
| θ_s | 37 | 48 | 56 | 37 | 48 | 56 |
| θ_v | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0,04 | 0,01 | 0,02 | 0,12 | 0,01 | 0,03 |
| 50 | 0,07 | 0,05 | 0,10 | 0,05 | 0,03 | 0,08 |
| Nb. points | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 |

| Plan parallèle à la direction du soleil | | | | |
|---|------------|------|------|------|
| Canaux | XS1 et XS2 | | XS3 | |
| θ_s | 37 | 54 | 37 | 54 |
| θ_v | | | | |
| - 50 | 0,04 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| - 30 | 0,04 | 0,00 | 0,02 | 0,01 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0,07 | 0,02 | 0,07 | 0,02 |
| 50 | 0,20 | 0,07 | 0,17 | 0,06 |
| Nb. points | 3 | 2 | 3 | 2 |

II-5 Variabilité temporelle de la réflectance du site

Dans le paragraphe précédent, nous avons présenté la variabilité angulaire de la réflectance du site, qui est normalisée à la réflectance verticale (correspondant à une visée verticale). Ici, nous allons examiner comment cette réflectance verticale varie en fonction du temps. Dans la variation temporelle de la réflectance deux facteurs doivent être considérés : l'effet de la hauteur du soleil et la variation saisonnière de l'état de la surface de la Crau.

II-5-1 Variation de la réflectance pendant une journée

Les mesures sur le site ont été effectuées au cours de 3 journées : le 27 juillet, le 19 et 20 septembre. Le 27 juillet et le 20 septembre, le ciel était parfaitement dégagé alors que le 19 septembre, le ciel était partiellement couvert et l'atmosphère était chargée en aérosols.

La figure 2.25 représente, à titre d'exemple, la variation de la tension de sortie de la tête de mesure de l'éclairement pour les 3 canaux de SPOT le 27 juillet. La réponse du radiomètre étant linéaire, la variation de tension observée correspond à celle de l'éclairement. La figure 2.26 correspondant au 19 septembre met bien en évidence l'effet des passages nuageux.

Au cours des deux dernières journées (19 et 20 septembre) les mesures de luminance ont été effectuées simultanément sur le sol et sur un panneau de référence, en visée verticale. Pour déterminer la réflectance, une seule mesure d'éclairement a été utilisée.

La figure 2.27 montre que la réflectance du sol de la Crau est pratiquement constante durant la journée que le ciel soit couvert ou nuageux. Les mesures des 19 et 20 septembre ont été effectuées sur des surfaces différentes et on peut remarquer que les valeurs obtenues sont pratiquement égales. Elle montre également que le facteur de réflectance vertical du sol de la Crau évolue légèrement en fonction de la hauteur du soleil. A partir de ces mesures si nous prenons comme référence la réflectance du sol pour un angle solaire zénithal de 45° , $R_0(45^\circ)$, nous pouvons déterminer sa variation relative en fonction de θ_s (tableau 2.12). Ces données peuvent ensuite être utilisées pour déterminer la variation du facteur de réflectance oblique.

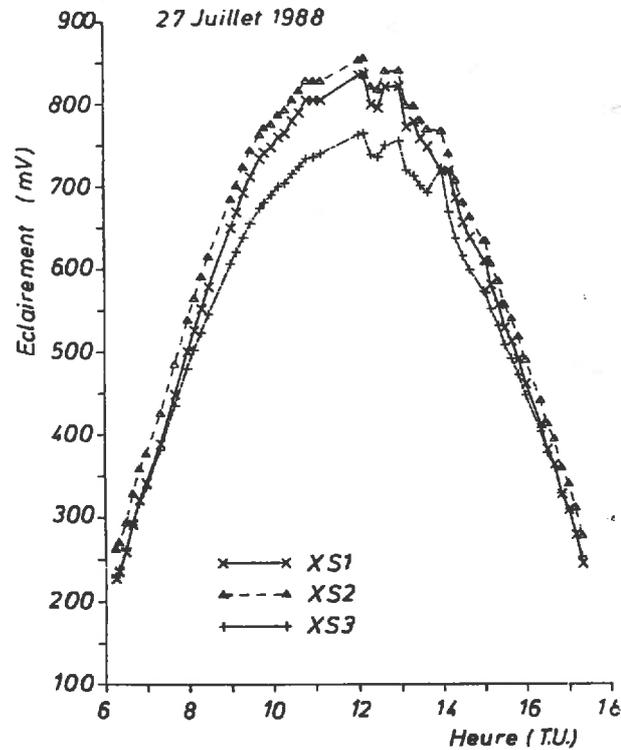


Figure 2.25 : Variation de la tension de sortie de la tête de mesure de l'éclairement du radiomètre Cimel pour les trois canaux de SPOT au cours d'une journée avec un ciel dégagé.

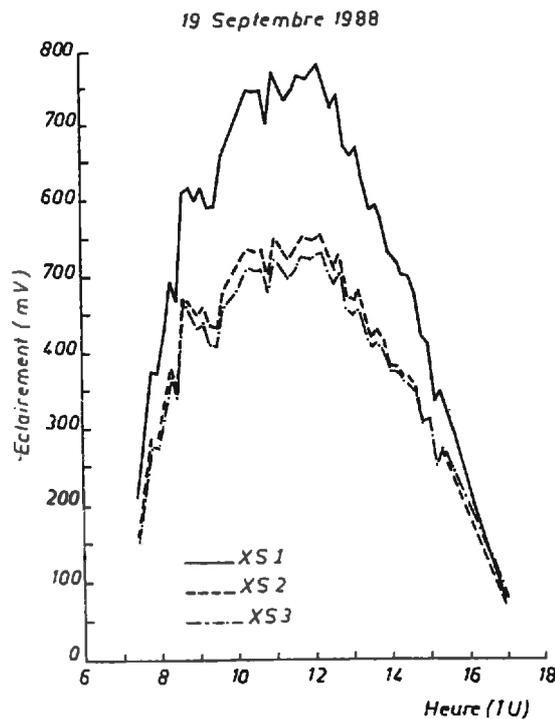


Figure 2.26 : Variation de la tension de sortie de la tête de mesure de l'éclairement du radiomètre Cimel pour les trois canaux de SPOT au cours d'une journée avec des passages nuageux.

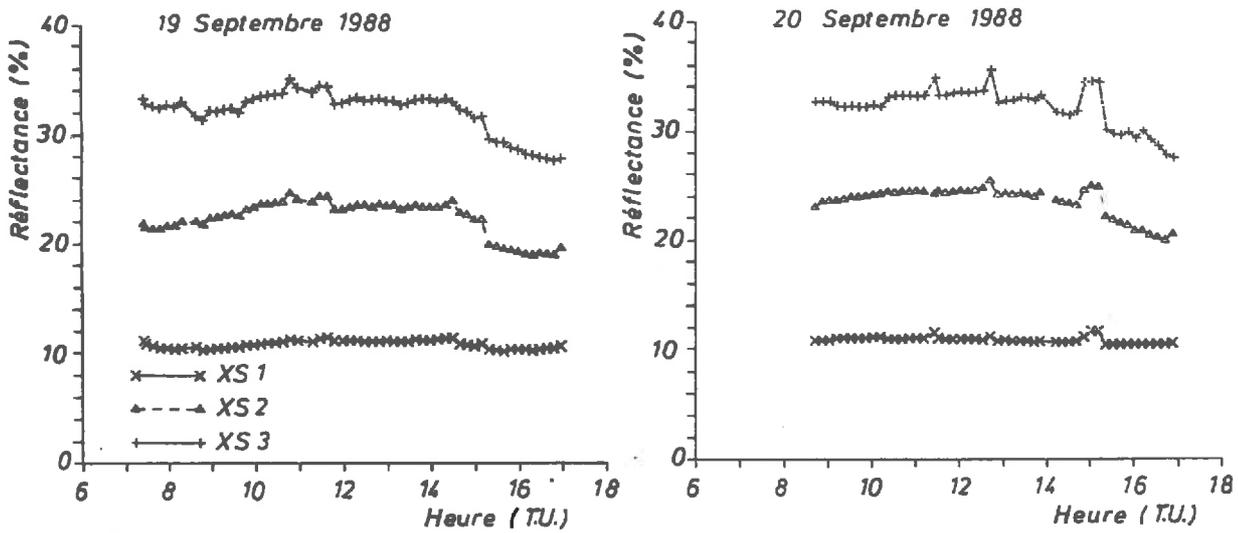


Figure 2.27 : Variation de la réflectance en un point du sol de la Crau au cours d'une journée avec un ciel clair (20 septembre) et d'une journée avec des passages nuageux (19 septembre)

Tableau 2.12 : Variation relative du facteur de réflectance vertical du site de la Crau $R_0(\theta_s)/R_0(45^\circ)$ en fonction de l'angle solaire zénithal θ_s . Les données sont corrigées en fonction de la réponse de la tête d'éclaircissement

| Canaux | θ_s | | | | | | | |
|--------|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 |
| XS1 | 1,04 | 1,03 | 1,00 | 1,00 | 0,99 | 0,98 | 0,97 | 0,98 |
| XS2 | 1,02 | 1,01 | 1,00 | 1,00 | 0,92 | 0,88 | 0,86 | 0,87 |
| XS3 | 1,03 | 1,02 | 1,01 | 1,00 | 0,96 | 0,91 | 0,89 | 0,88 |

II-5-2 Variation saisonnière de l'état de la surface

L'état de la végétation qui se développe en Crau change en fonction de la saison. On peut donc penser que la réflectance et sa variabilité spatiale peuvent être affectée. c'est pourquoi des études ont été entreprises pour essayer de quantifier ce phénomène.

Dans le paragraphe de l'analyse de la variabilité spatiale du site, nous avons constaté que le coefficient de variation de la luminance, mesurée par SPOT au dessus du site de la Crau, évolue peu au cours du temps. Le figure 2.28 montre, que la quotion des données brutes de SPOT par le consinus de l'angle solaire zénithal (qui est proportionnelle à la réflectance apparente du site), varie très peu en fonction du temps malgré l'influence atmosphérique sur les images SPOT acquises. La même conclusion peut être établie en examinant les mesures aéroportées de réflectance (Tableau 2.13).

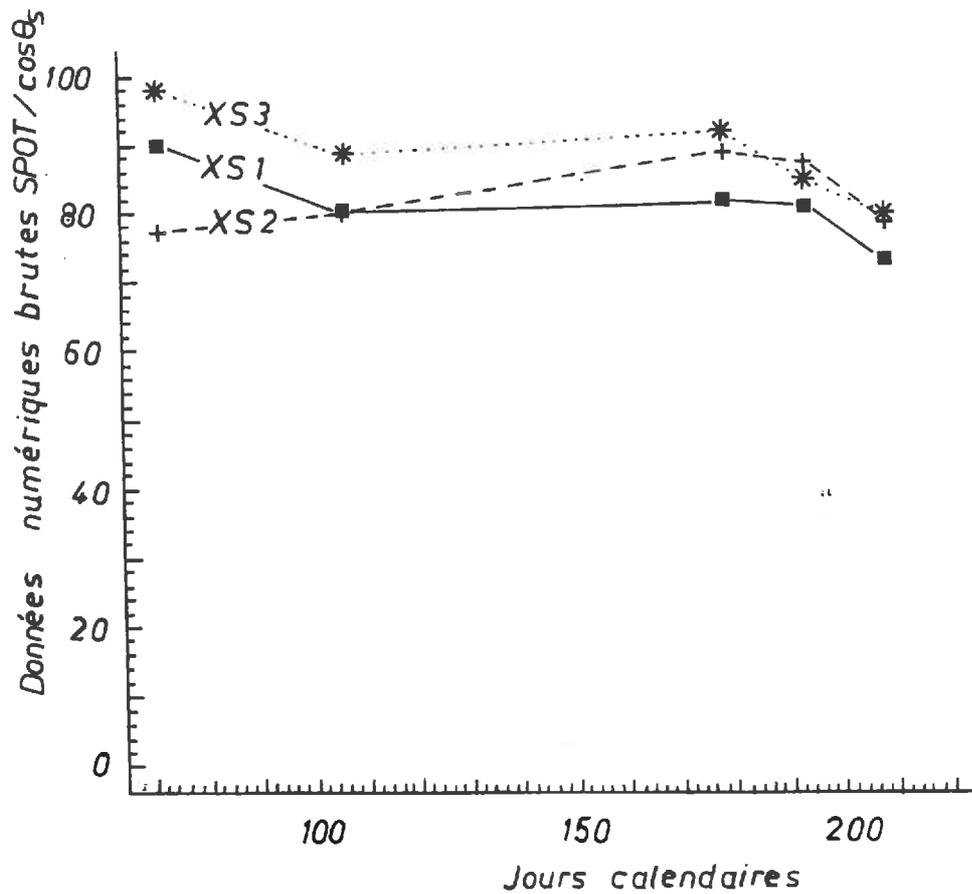


Figure 2.28 : Variation du quotient des données brutes de SPOT par le cosinus de l'angle solaire zénithal

Tableau 2.13a : Données de réflectance obtenues le 28 mars 1988 au cours des mesures aéroportées.

| | Altitude m | 300 | 600 | 600 | 600 | 600 |
|-----|------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
| | Visée | oblique | verti- cale | oblique | verti- cale | oblique |
| | N° axe | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| | Nb points | 77 | 65 | 65 | 65 | 65 |
| XS1 | Moyenne | 0,167 | 0,167 | 0,172 | 0,169 | 0,172 |
| | Ecart type | 0,007 | 0,010 | 0,007 | 0,011 | 0,004 |
| | minimum | 0,15 | 0,17 | 0,16 | 0,13 | 0,17 |
| | Maximum | 0,19 | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| | Coef. Var. | 0,041 | 0,055 | 0,030 | 0,065 | 0,022 |
| XS2 | Moyenne | 0,208 | 0,209 | 0,211 | 0,209 | 0,208 |
| | Ecart type | 0,009 | 0,010 | 0,007 | 0,013 | 0,006 |
| | minimum | 0,19 | 0,19 | 0,20 | 0,17 | 0,20 |
| | Maximum | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,22 |
| | Coef. Var. | 0,038 | 0,046 | 0,031 | 0,064 | 0,028 |
| XS3 | Moyenne | 0,341 | 0,349 | 0,349 | 0,340 | 0,338 |
| | Ecart type | 0,011 | 0,005 | 0,007 | 0,007 | 0,005 |
| | minimum | 0,31 | 0,34 | 0,34 | 0,32 | 0,32 |
| | Maximum | 0,36 | 0,36 | 0,36 | 0,35 | 0,35 |
| | Coef. Var. | 0,033 | 0,016 | 0,019 | 0,021 | 0,016 |

Tableau 2.13b : Données de réflectance obtenues le 21 juillet 1988 au cours des mesures aéroportées.

| Altitude m | | 300 | 300 | 300 | 300 | 600 | 600 |
|------------|------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|
| Visée | | oblique | verti- cale | oblique | verti- cale | oblique | verti- cale |
| N° axe | | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Nb. points | | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| XS1 | Moyenne | 0,169 | 0,180 | 0,168 | 0,178 | 0,174 | 0,171 |
| | Ecart type | 0,005 | 0,006 | 0,008 | 0,008 | 0,004 | 0,009 |
| | minimum | 0,161 | 0,161 | 0,153 | 0,159 | 0,166 | 0,152 |
| | Maximum | 0,177 | 0,194 | 0,187 | 0,191 | 0,182 | 0,186 |
| | Coef. Var. | 0,028 | 0,033 | 0,045 | 0,045 | 0,023 | 0,051 |
| XS2 | Moyenne | 0,208 | 0,228 | 0,204 | 0,219 | 0,212 | 0,215 |
| | Ecart type | 0,006 | 0,007 | 0,011 | 0,012 | 0,006 | 0,009 |
| | minimum | 0,194 | 0,202 | 0,184 | 0,192 | 0,198 | 0,188 |
| | Maximum | 0,219 | 0,243 | 0,226 | 0,242 | 0,233 | 0,229 |
| | Coef. Var. | 0,028 | 0,033 | 0,052 | 0,055 | 0,028 | 0,041 |
| XS3 | Moyenne | 0,316 | 0,332 | 0,315 | 0,326 | 0,314 | 0,315 |
| | Ecart type | 0,006 | 0,007 | 0,007 | 0,008 | 0,006 | 0,007 |
| | minimum | 0,301 | 0,309 | 0,295 | 0,306 | 0,301 | 0,298 |
| | Maximum | 0,327 | 0,350 | 0,332 | 0,340 | 0,326 | 0,332 |
| | Coef. Var. | 0,020 | 0,021 | 0,021 | 0,026 | 0,019 | 0,022 |

**III - EVALUATION DES ERREURS DE MESURE DE LA
REFLECTANCE SUR LA CRAU**

Article 2

**"Evaluation of measurement errors in ground surface reflectance
for satellite calibration"**

(accepté par Int. J. of Remote Sensing)

EVALUATION OF MEASUREMENT ERRORS IN GROUND SURFACE REFLECTANCE FOR SATELLITE CALIBRATION

Xing-fa GU, Gérard GUYOT, Michel VERBRUGGHE
INRA Bioclimatologie, BP 91, 84143 Montfavet Cédex (France)

ABSTRACT

One of the more efficient methods used for in-flight calibration of Earth resource satellites is based on measurements performed at ground level on a test site. An experimental study has been conducted in "la Crau" (South-East of France) where it is intended to establish a calibration site for SPOT satellites. The accuracy of the calibration depends critically on the accuracy of ground bidirectional reflectance factor (BRDF) measurements.

All of the different sources of error are analyzed. These are due to two series of factors depending on the characteristics of the radiometer (electronic characteristics, absolute calibration, angular setting of the radiometer) and of the ground surface (the spectral, spatial, angular and temporal variability of the BRDF). The relative weight of these different causes of error is determined from experimental data. This analysis shows that, besides the well known disturbing factors such as the calibration of the radiometer and the spatial variability of the BRDF, two other factors can introduce large measurement errors: the spectral and the angular variability of reflectance of the site.

This detailed analysis of the different causes of error is not only valid for the calibration of a satellite but it can also be used to draw up guidelines for performing accurate BRDF measurements in natural conditions, for any application.

INTRODUCTION

The comparison and the combination of multi-temporal and multi-system satellite images requires knowledge of the absolute calibration coefficients of the satellites. One of the more efficient methods used for the determination of these coefficients, in the visible and near-infrared domains is based on measurements performed at ground level on a test site (Slater et al. 1987). The radiance at the satellite level is estimated from atmospheric parameters and the measured bidirectional reflectance factor (BRDF) of the ground surface. The absolute calibration coefficient is then determined by comparing the radiance estimate to the mean digital count, corresponding to the calibration site, on the satellite image.

In the method based on test site measurements the accuracy of the satellite calibration depends, critically, on the accuracy of ground BRDF measurements. The other sources of errors are related to the determination of atmospheric spectral optical depth and gaseous transmittance, the atmospheric radiative transfer code used, and the digital count uncertainties of the test site (Slater et al. 1987). Comparison of these different sources of errors shows that the error in ground BRDF plays an important role (Slater et al. 1987, Vermote 1990). So, before initiating any calibration procedure it is necessary to determine the accuracy of the test site BRDF measurements.

The accuracy of ground BRDF measurements depends on several factors: the characteristics of the radiometer (Jackson and Robinson 1985, Guyot et al. 1984), its absolute calibration (Jackson et al. 1987, Biggar et al. 1988), the method used for irradiance measurements (Milton 1981, Kimes and Kirchner 1982, Lord et al. 1985) and the spatial variation of the BRDF (Curran and Williamson 1985, 1986, Curran and Hay 1986). Field measurements performed in order to prepare a French calibration site for the satellite SPOT have been used to analyse the errors due to these different factors.

I - MATERIALS AND METHODS

1.1. Calibration site

The calibration site is a 400x400 meter square area, used for the absolute calibration of SPOT. It is located in the centre of "La Crau Sèche", a 60 km² pebbly flat area in the South East of France, on the eastern bank of the River Rhone and at about 50 km North-West of Marseille (Gu et al. 1990). This area has a dry and sunny Mediterranean climate. The soil is mainly composed of pebbles and is sparsely covered by a low vegetation. So its optical properties vary little within the year.

1.2. Data acquisition

The BRDF measurements were performed with SPOT simulation radiometers which simultaneously measure the radiance and the irradiance in the SPOT channels (Guyot et al. 1984). In order to analyze the accuracy of BRDF measurements, we have determined the non-lambertian response of the irradiance head and reference panel and the optical characteristics of the site (spectral, spatial, angular and diurnal variations of the BRDF).

1.2.1. *Determination of the angular response of the irradiance head and reference panel*

The angular response of the irradiance head of the radiometer does not follow the cosine law because the diffusers used are not perfect (Guyot et al. 1984). It is therefore necessary to determine the correction factor which must be applied as a function of the solar zenith angle. This was determined from measurements performed during the summer of 1989. The irradiance head was fixed on a telescope stand, in order to vary the incidence of the Sun's beam for a given solar position. For each incidence angle we determined the response of the radiometer to global and diffuse irradiance (the radiometer was shadowed with a small panel masking the Sun) in order to determine its response for direct irradiance.

The angular response of the reference panel, used for the calibration of the radiometer, is also different from that of a perfect lambertian diffuser (Jackson et al. 1987, Biggar et al. 1988). Its directional response was determined in the laboratory using a goniometer and the direct illumination of a lamp (Verbrughe and Lecomte 1990).

1.2.2. *Reflectance spectra of the ground surface*

In order to determine the effect of the non-coincidence of the spectral bands of the radiometer and of the satellite it was necessary to determine the mean reflectance spectrum of the site. This was determined in the range 450-1000nm (2nm step) with a spectro-radiometer Barringer REFSPEC II A ⁽¹⁾. Sixteen spectra were determined (on May 17, 1989) on sample surfaces of 0.25m² scattered within a circle of 50m diameter.

1.2.3. *Spatial variation of the reflectance of the site*

Two series of airborne measurements were performed on March 22 and July 21, 1988. The spatial variation of the BRDF of the site was analyzed from digitized multispectral aerial photographs with square pixels of 0.60m (Gu et al. 1990). From these pixels different ground resolutions were simulated (1.2, 2.4, 4.8, 9.6, 19.2m) and the variation coefficient of the BRDF of the pixels was determined. This analysis

combined with ground level BRDF measurements enabled us to define the best sampling design for characterizing the BRDF of the site with ground level measurements.

1.2.4. *Angular variation of the reflectance of the site*

The angular variation of the BRDF of the site was determined with a SPOT simulation radiometer fixed at the extremity of an inclinable boom, mounted on wheels, in order to be easily moved from one place to another (Figure 1) (Guyot et al. 1989). With this equipment the ground BRDF was measured in vertical planes from -70° to $+70^\circ$ (5 or 10° steps). The measurements were performed for different solar zenith angles on February 18, March 9, April 14 and July 27, 1988 in azimuthal planes, with respect to the Sun position, of 0° , 45° , 90° and 135° . The obtained data were used to draw up polar diagrams representing the angular variation of the ground BRDF.

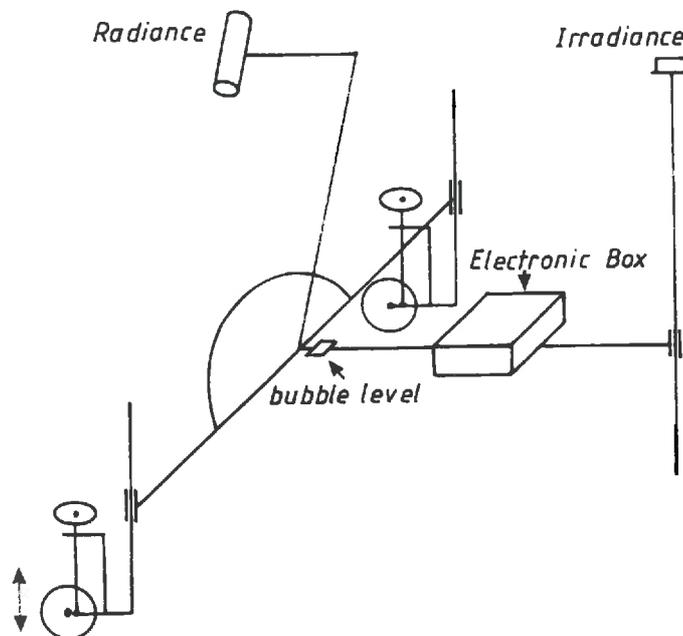


Figure 1 : Schematic representation of the mobile boom used for determining the angular variation of the ground reflectance.

1.2.5. *Diurnal variation of the ground reflectance*

The diurnal course of the ground reflectance was measured on September 19 and 20, 1988. The radiance head of the radiometer viewed vertically the same surface throughout the day. The irradiance was simultaneously measured. Data were corrected according to the variation in response of the irradiance head, as a function of the solar zenith angle, before calculating the ground BRDF.

II - EVALUATION OF MEASUREMENT ERRORS IN THE GROUND REFLECTANCE

The measurement errors are due to two series of factors related to the radiometer and to the characteristics of the viewed area.

2.1. Measurement errors due to the radiometer

The measurement errors due to the radiometer depend on the characteristics of its electronics, on its calibration and on its angular setting.

2.1.1. *Measurement errors due to the electronics of the radiometer*

Four factors can affect the response of the radiometer: the linearity of the detector and of the electronics, the background noise, the thermal drift and the long term stability.

The detector used in the radiometer is a silicon photodiode which has a good thermal stability (Jackson and Robinson 1985, Slater 1985). The electronics have been designed and the detector has been selected (Guyot et al 1984) in order to minimise the different sources of error. So the errors due to the electronics of the radiometer are the following (data supplied by the manufacturer of the components of the radiometer):

- linearity of the detector: $\pm 0.25\%$;
- linearity of the electronics: $\pm 0.10\%$;
- background noise, thermal drift, long term stability: $\pm 0.25\%$.

The total error due to the electronics of the radiometer is then $\pm 0.37\%$ (expressed as the quadratic sum).

2.1.2. *Measurement errors due to irradiance determination*

The bidirectional reflectance factor measured by the radiometer (Robinson and Biehl, 1979) corresponds to the quotient of directional radiance (measured by the radiance head) to hemispherical irradiance which can be determined in two different ways. A reference panel can be viewed between two measurements of the target with the same radiometer (Slater et al. 1986, 1987), or two heads can simultaneously measure radiance and irradiance (Duggin 1980, Duggin and Cunia 1983, Guyot et al. 1984). Three factors can introduce measurement errors: the variation of solar irradiance, the horizontality of the reference panel or of the irradiance head and the angular response of the panel or of the irradiance head.

The solar irradiance varies as a function of the sun zenith angle and of the atmospheric conditions. The Sun zenith angle introduces low frequency variations of irradiance and they can be minimized if the measurements are performed around solar noon. At the other extreme, atmospheric conditions can introduce high frequency variations (up to 100% within 5 minutes periods) (Lord et al. 1985). In order to reduce the latter effects, radiance and irradiance can be measured simultaneously. If such measurements are not possible it is necessary to select clear days and time intervals small enough to minimize the effects of irradiance variations.

The irradiance head must be set horizontally. With an inclination of $\pm 1^\circ$ the error in irradiance measurement will be $\pm 1\%$ for a Sun zenith angle of 30° and $\pm 3\%$ for a Sun zenith angle of 60° . In our case the horizontality of the irradiance head was determined with an accuracy of $\pm 0.4^\circ$ by using a precision bubble level. The error in direct irradiance was lower than $\pm 0.5\%$. But for a clear day, the direct irradiance represents about 80% of the global irradiance, so the error, due to the inclination of the irradiance head, is about $\pm 0.4\%$ for clear days.

The angular response of an irradiance head or a reference panel do not exactly follow Lambert's law (Kimes and Kirchner 1982, Guyot et al 1984, Jackson et al. 1987, Biggar et al. 1988). The two components of irradiance (direct and diffuse) must be separated and corrected independently. The direct component must be multiplied by a coefficient determined from the angular variation of the response of the panel (or of the irradiance head). The diffuse component must be multiplied by a coefficient deduced from the average directional response of the panel (or of the irradiance head). If such corrections are not applied the error introduced can reach $\pm 5\%$, depending on the sun zenith angle and atmospheric conditions (figure 2).

In natural conditions the bidirectional reflectance factor of the reference panel can be deduced from its hemispherical reflectance and its directional response (Jackson et al. 1987). The directional response corresponds to the direct solar irradiance and the hemispherical reflectance is applied to the diffuse component. The relative weight of these two components depends on atmospheric conditions. In our measurements we have used a 0.5x0.5m square panel covered with "spectralon" (Labsphere Inc., Ref SRT 99 180) ⁽¹⁾ whose mean hemispherical reflectance was 99.2% between 300 and 1600 nm (table 1). The panel was calibrated by the manufacturer using a double beam ratio recording integrating sphere reflectometer and a ceramic tile as a reference; this tile was calibrated by the National Institute of Standards and Technology. The measurement repeatability, applicable to absolute BRDF values provided by Labsphere Inc., is given to have a standard deviation less than 0.005. Thus the calibration error of the panel is less than $\pm 1.0\%$ (2 times the standard deviation).

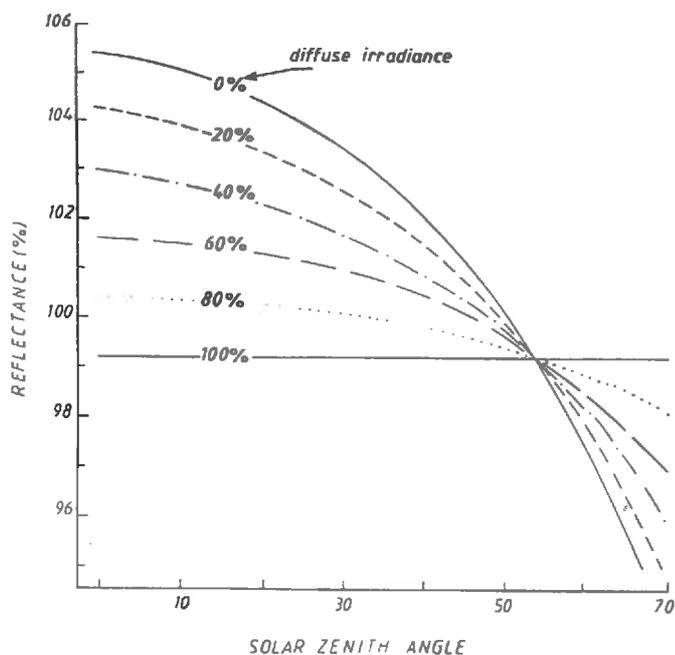


Figure 2 : Variation of the reflectance of a "spectralon" reference panel as function of sun zenith angle and for different proportions of diffuse and direct irradiance (SPOT XS1 channel).

Table 1: Hemispherical reflectance factors for the reference panel (Labsphere Target N° SRT-99-180-3617-A) (original data measured with 50nm steps).

| Wavelength (nm) | Hemispherical reflectance factor |
|-----------------|----------------------------------|
| 300 | 0.987 |
| 400 | 0.989 |
| 500 | 0.991 |
| 600 | 0.993 |
| 700 | 0.992 |
| 800 | 0.992 |
| 900 | 0.993 |
| 1000 | 0.993 |
| 1100 | 0.993 |
| 1200 | 0.992 |
| 1300 | 0.991 |
| 1400 | 0.990 |
| 1500 | 0.992 |
| 1600 | 0.992 |

But this panel is not perfectly lambertian (Verbrugghe and Lecomte 1990) and figure 2 shows the variation of its BRDF when it is viewed vertically for different sun zenith angles and different atmospheric conditions. The error, which can reach $\pm 5\%$ without any correction, can be reduced to $\pm 1\%$ if it is assumed that the global irradiance corresponds only to direct sun radiation. If the relative weight of diffuse and direct components is introduced the error can be reduced to $\pm 0.15\%$. In this case the diffuse radiation is assumed to be isotropic.

2.1.3. Measurement errors due to the radiometer calibration

The BRDF of a surface is determined from the ratio of the signals corresponding to radiance and irradiance measurements, multiplied by a calibration coefficient. This calibration coefficient is determined by viewing a calibrated reference panel.

For calibration of the SPOT simulation radiometer, the calibrated reference panel was viewed vertically in natural conditions. The angular variation of the panel BRDF was corrected using the data given on figure 2. Without these corrections the calibration coefficient would only be valid for the conditions in which it had been determined.

From this analysis the measurement errors due to the radiometer calibration are as summarized in table 2.

Table 2 : Measurement errors in radiometer calibration

| Source of errors | Error % |
|---|------------------------------|
| Electronics of the radiometer | ± 0.4 |
| Hemispherical reflectance of reference panel (calibration by the manufacturer) | ± 1.0 |
| Horizontality of the reference panel | ± 0.4 |
| Horizontality of irradiance head | ± 0.4 |
| Residual error due to the correction of non lambertian response of the reference panel | ± 1.0 |
| Non-isotropy of diffuse irradiance | ± 0.2 |
| Total error (quadratic sum) | ± 1.59 |

2.2. Measurement errors due to the characteristics of the target

2.2.1. Measurement errors due to the non-coincidence of the spectral bands of the radiometer with those of the satellite

The spectral bands of the radiometer are defined by interference filters which have optical characteristics different from those of the optical system used aboard the satellite for defining different channels. Moreover, as seen in figure 3, the two HRV instruments of SPOT1 are different (Begni 1985). If the target BRDF varies as a function of wavelength, the different instruments will not give the same data.

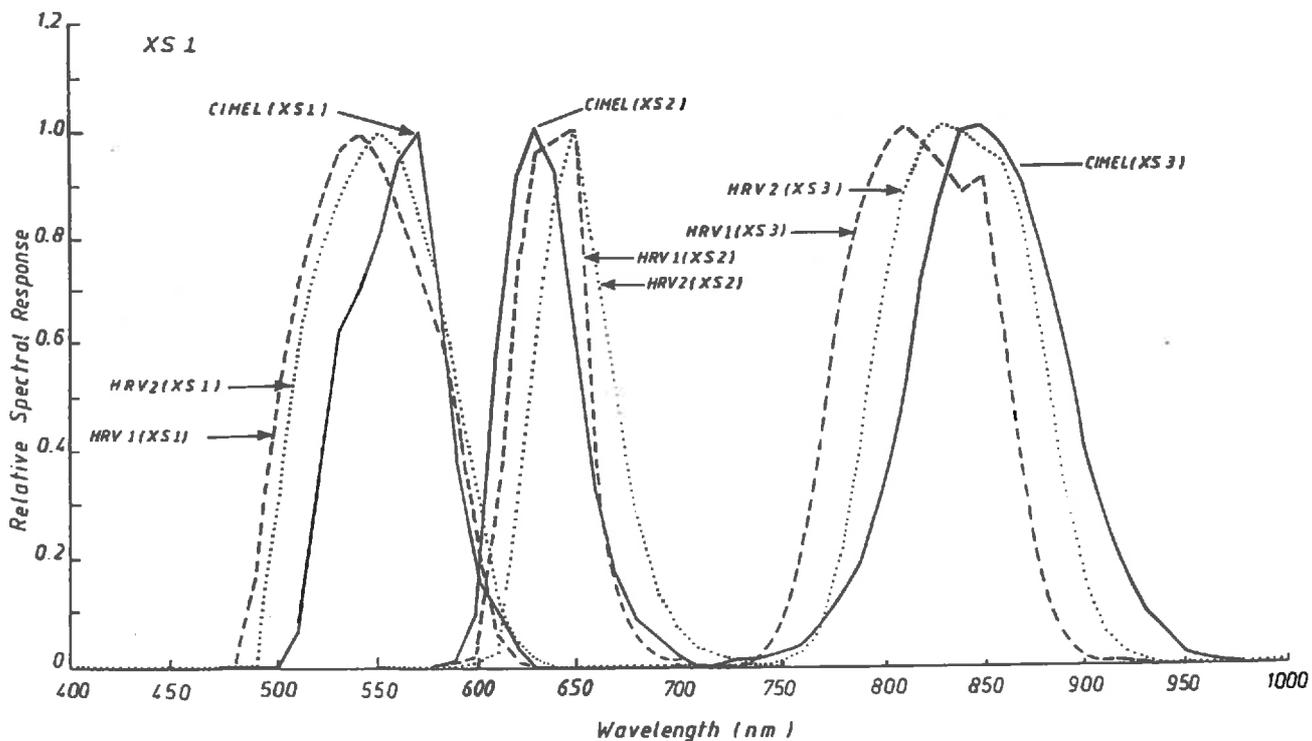


Figure 3 : Spectral responses of the SPOT simulation radiometer and of the two HRV instruments of the satellite SPOT1.

It is therefore necessary to correct for these effects. The spectral response of the sensors (Figure 3) must be combined with the ground reflectance spectrum in order to give the correction coefficient to be applied. Table 3 displays, as an example, the different BRDFs which can be measured on "la Crau" with the field radiometer and the two HRV instruments. It shows that this error cannot be neglected.

Table 3 : Mean reflectances of "la Crau" for the 3 SPOT channels as a function of the instrument considered.

| Channel | HRV1 | HRV2 | Field radiometer |
|---------|-------|-------|------------------|
| XS1 | 0.160 | 0.165 | 0.169 |
| XS2 | 0.215 | 0.219 | 0.215 |
| XS3 | 0.318 | 0.326 | 0.331 |

In our case the correction coefficients were determined from reflectance spectra obtained with a high resolution spectro-radiometer (Barringer REFSPEC II A) ⁽¹⁾. The average ground reflectance spectrum used corresponds to 16 measurements performed at different places. As can be seen in figure 4, the average ground reflectance spectrum does not present any strong absorption features. Such a spectrum is typical of a bare soil, the influence of the scarce natural vegetation being limited. In this case it is not necessary to consider the whole reflectance spectrum; It would just be sufficient to use the centre of each band and to perform a linear interpolation. If this linear interpolation is used, the residual error determined by comparison with our spectral measurements is less than $\pm 0.5\%$.

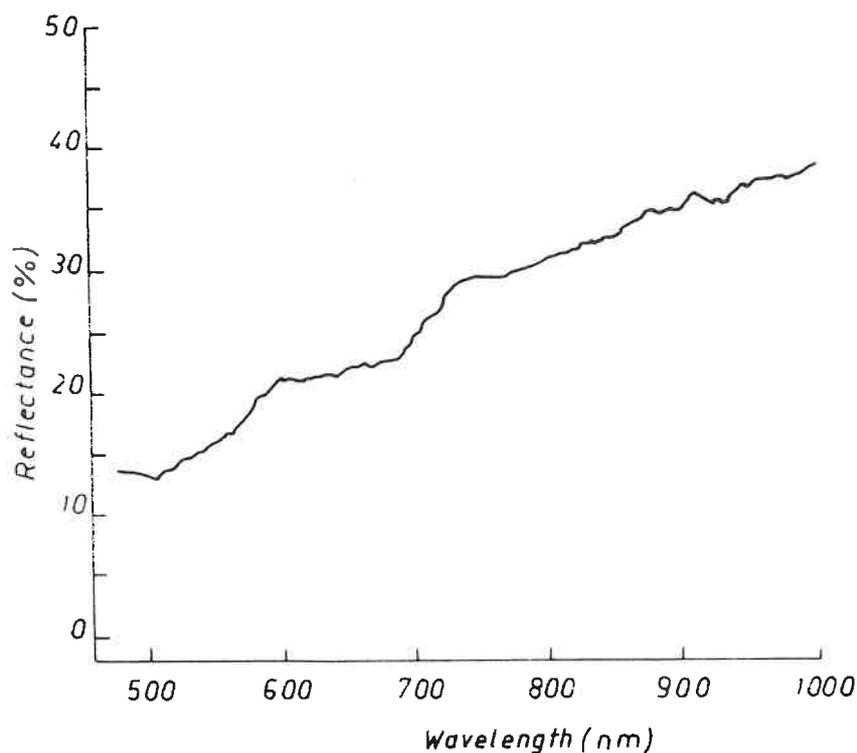


Figure 4 : Average reflectance spectrum of "la Crau" between 400 and 1000nm.

2.2.2. Measurement errors due to the spatial variation of the reflectance

A natural surface is never a perfectly homogeneous reflector. Its BRDF has a random spatial variation around the mean value. This variability of the BRDF induces measurement errors which depend on the spatial distribution of the samples, their number and their size (Curran and Williamson 1985, 1986, Curran and Hay 1986).

The effect of the size of the samples was studied on digitized multispectral aerial photographs corresponding to the central part of the calibration site (154x154m) (Guyot et al. 1989, Gu et al. 1990). This area was divided into 256x256 pixels of dimensions 0.6m square. These pixels were then combined to form larger pixels (1.2, 2.4, 4.8, 9.6, 19.2m). The coefficient of variation of the different pixels is shown in figure 5. It shows that this coefficient of variation decreases when the pixel size increases; but this decrease is relatively small because the ground heterogeneities are regularly distributed at the different scales considered. We can also note that the coefficient of variation is smaller in near infrared (XS3) than in the visible (XS1, XS2). This phenomenon is due to the particular characteristics of the calibration site where the dry vegetation has a BRDF quite comparable to that of the pebbles in near infrared while these two components of the ground surface have different optical properties in the visible domain.

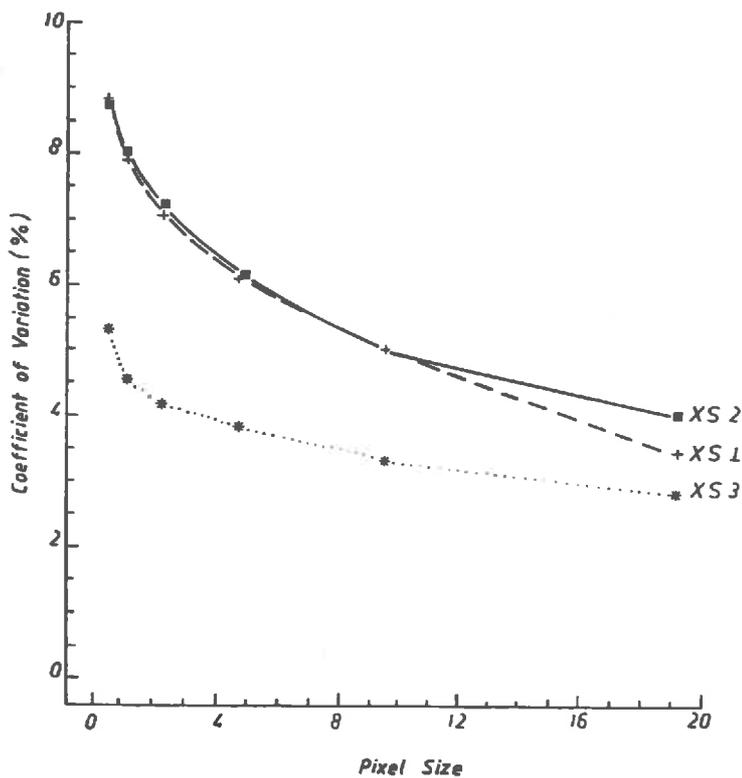


Figure 5 : Effect of the pixel size on the coefficient of variation of the BRDF. Analysis performed from digitalized multispectral photographs.

For practical estimation of the average BRDF of a given surface, a limited number of samples was considered. In our study we used the 154x154m surface with 0.6m elementary pixels. We calculated the average BRDF of this surface with increasing numbers of pixels regularly distributed. The surface was then divided into N elementary square areas, each elementary square containing Q pixels. For calculating the average BRDF of the surface, one pixel was taken in each elementary square (Q average BRDFs calculated on N pixels). We then calculated the coefficient of variation of the Q average BRDFs (Guyot et al. 1989, Gu et al. 1990). The results of these calculations are presented in figure 6. It shows that the coefficient of variation of the average BRDF decreases when the size of the pixels and their number increase.

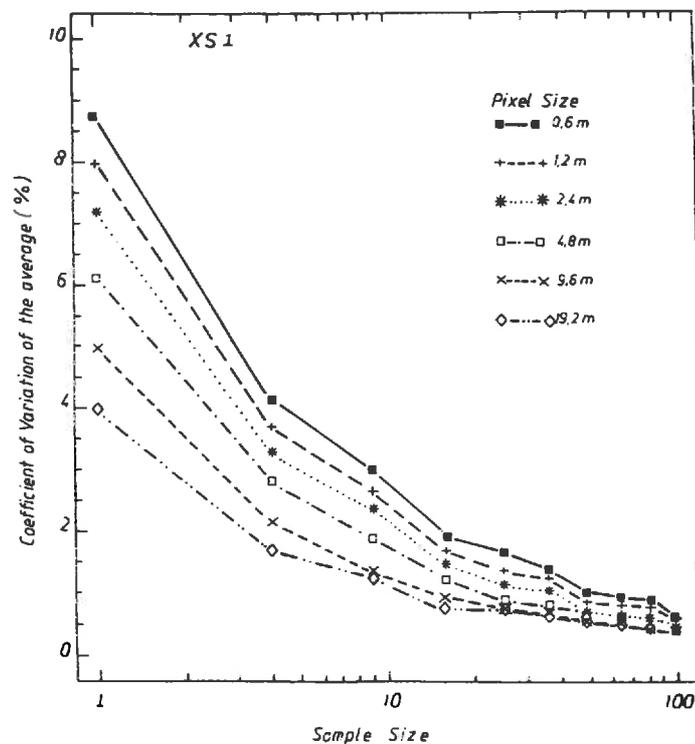


Figure 6 : Coefficient of variation of average BRDFs of the test site as a function of sample size for 6 spatial resolutions (SPOT XS1 channel, simulated from multispectral aerial photographs)

The comparison of figures 5 and 6 shows that the coefficient of variation of the average BRDF determined from N pixels practically equals the coefficient of variation of the pixels on the whole surface divided by \sqrt{N} (gaussian distribution).

Figure 6 also shows that the coefficient of variation of the average BRDF decreases asymptotically towards a limit independent of the pixel size. From a practical point of view it is therefore better to increase the number of measurements, performed with a field radiometer, than to increase the pixel size.

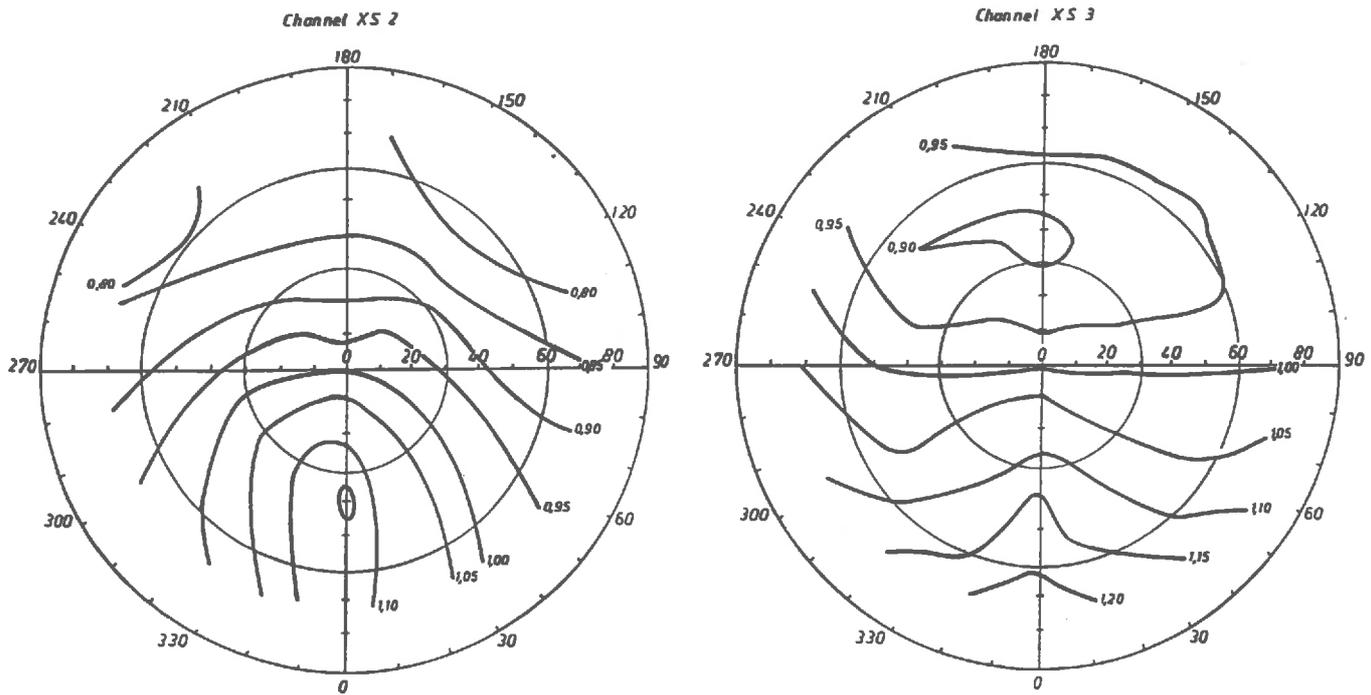


Figure 7 : Relative variation of the bidirectional reflectance factor of la Crau. The nadir measurement is taken as a reference. The concentric circles correspond to zenith view angles and the graduations, on the external circle, correspond to the azimuth with respect to the Sun. The measurements were performed in SPOT channels XS2 and XS3 on July 27, 1988 at 11h52.

When SPOT passes over a given area the azimuth of a scanning line, with respect to the Sun, depends on the time of the year and of the off-nadir view angle as indicated in table 5.

The combination of these data with figure 7 shows that the ground BRDF of la Crau, viewed by SPOT, can have variations larger than $\pm 10\%$ if we consider both nadir and $\pm 30^\circ$ off-nadir view angles. It is therefore necessary to correct for this effect.

The number N ($N > 30$) of measurements which are necessary to estimate the average BRDF (R) of a given area with precision p , is given, for a 95% confidence interval, by the following equation (Dagnelie 1970):

$$N = 2 (1.96 \sigma / p R)^2$$

in which σ is the standard deviation of the statistical distribution. Table 4 displays the results of calculations performed on ground radiometric measurements on "la Crau" (Guyot et al. 1990).

Table 4 : Number of measurements necessary for the estimation of the average BRDF of the SPOT calibration site, with a given precision.

| SPOT channels | XS1 | XS2 | XS3 |
|--------------------------|------|------|-----|
| Coefficient of variation | 10.7 | 10.0 | 5.1 |
| Precision 1% | 880 | 764 | 200 |
| Precision 1.5% | 390 | 341 | 88 |
| Precision 2% | 218 | 192 | 50 |
| Precision 2.5% | 141 | 122 | 32 |

If, for example, 200 measurements are performed on the SPOT calibration area, the precision of the average BRDF will be around 2% in the visible and around 1% in the near infrared.

2.2.3. Measurement errors due to the non lambertian characteristics of the surface

The bidirectional reflectance factor of a natural surface varies according to the Sun position and according to zenith and azimuth view angles (Guyot 1989). Figure 7 displays the results of measurements performed on "la Crau" (Guyot et al. 1989).

The azimuth, with respect to the Sun, is indicated on the external circle. The concentric circles correspond to different inclinations of the view axis. The cone corresponding to the range of variation of the inclination of the SPOT view axis, corresponds to the central circle (30°).

The angular variation of the BRDF is quite similar for the two visible channels (XS1, XS2) (Guyot et al. 1989), for this reason we have just represented the figure corresponding to XS2. In near infrared (XS3) some difference from the visible domain can be observed because the hot spot is less marked due to the presence of low vegetation.

Table 5 : Azimuth of SPOT scanning lines, over la Crau (43.34°N, 4.52°E), for different dates and different off-nadir view angles. The orientation towards East is counted positively.

| Dates | SPOT off-nadir view angles (degrees) | | | | | | |
|----------------------|--------------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | -30 | -20 | -10 | 0 | +10 | +20 | +30 |
| June 21 | 44.5 | 44.0 | 43.0 | 41.0 | 140.0 | 141.5 | 142.5 |
| March 21 Sept. 23 | 59.5 | 59.0 | 58.0 | 56.0 | 125.0 | 126.5 | 127.5 |
| Dec. 21 | 66.5 | 66.0 | 65.0 | 63.0 | 118.0 | 119.5 | 120.5 |

The correction which must be applied can be deduced from figure 7 if we know the off-nadir view angle and the orientation of the scanning lines. In this case the error on BRDF will depend on the accuracy of the diagram. In our case it is estimated to be about $\pm 1\%$.

For calibration of the satellite this error can be avoided by performing ground BRDF measurements with the same viewing geometry as the satellite. For this purpose we have designed a support for the radiance head of the radiometer which enables one to easily adjust the zenith and azimuth view angles (figure 8). It is fixed at the extremity of an horizontal arm oriented towards the Sun.

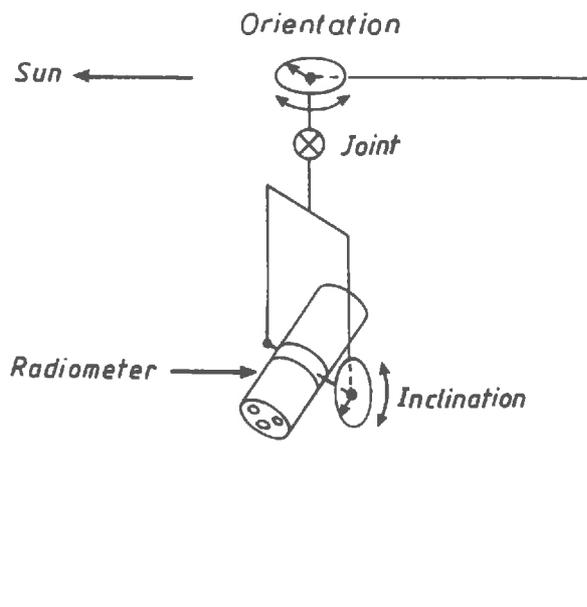


Figure 8 : Schematic representation of the support developed for the measurement of ground radiance with SPOT viewing geometry.

2.2.4. Measurement errors due to the temporal variation of the reflectance

For characterizing a surface it is necessary to make measurements over a certain number of points, with respect to the accuracy needed (table 4). During these measurements the Sun zenith and azimuth angles vary. It is therefore necessary to introduce corrections for the non-lambertian characteristics of the surface and eventually for the effect of crop row orientation. As the Sun zenith angle does not vary strongly around solar noon, this time of the day is best for performing BRDF measurements.

In our test site the BRDF of the pebbly soil covered with a sparse vegetation is relatively stable during the day as can be seen on figure 9. These data correspond to a series of measurements performed on one particular point whose reflectance was different from the mean value of the test site. If the measurements are performed around solar noon the error is less than 0.2%. A strong wind the "Mistral", can blow in this area but as the vegetation is very low, its shape is not affected by the wind and its effect has been neglected in our study.

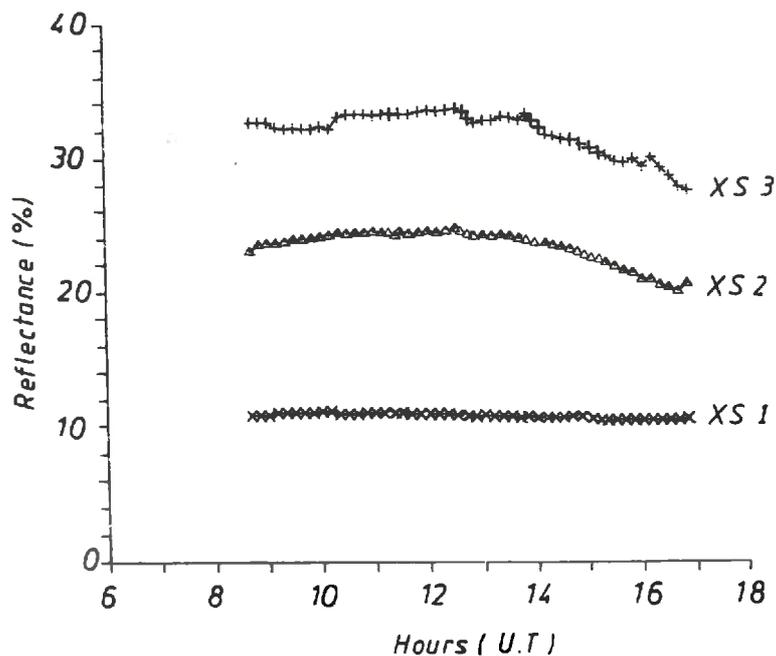


Figure 9 : Diurnal variation of the BRDFs of "La Crau" measured on September 20, 1988.

2.3. Determination of global error on the reflectance of la Crau.

The global measurement error in the BRDF of the SPOT calibration site can be determined from the preceding analysis. If we assume that the distribution of the different errors is gaussian and that they are independent, the global error can be estimated as their quadratic sum (Table 6).

Table 6 : Measurement error in the BRDF of SPOT calibration site.

| Source of error | Error % |
|--|--------------|
| Radiometer | |
| Electronics | ±0.4 |
| Irradiance | |
| Horizontality of irradiance head | ±0.4 |
| Non lambertian response (after correction) | ±0.5 |
| Calibration | ±1.6 |
| Target | |
| Non coincidence of spectral bands | ±0.5 |
| Spatial variation of reflectance (200 samples) | ±2.0* |
| Non lambertian characteristics of the surface | ±0.5 |
| Temporal variation of the reflectance | ±0.2 |
| Total error | ±2.76 |

* for XS1 and XS2 channels, for XS3 the error is ±1%

This table shows that two main sources of errors remain: the error due to the spatial variability of the site and the error due to the calibration of the radiometer. It is difficult to reduce them at the present time.

CONCLUSIONS

This study was primarily intended for determining the BRDF of the SPOT calibration site in la Crau. It has been necessary to investigate the different sources of measurement error. They are due to two series of factors depending on the radiometer used and the target viewed. The effect, on the accuracy of the BRDF measurements, of the calibration of the radiometer and of the sampling design on the target, is well known. But this study has shown that two other factors, which are often neglected, can also introduce relatively large measurement errors.

The first factor is the non-lambertian response of reference panels and of the irradiance head of SPOT simulation radiometers. If these effects are not corrected, as a function of the solar zenith angle and of the atmospheric conditions (i.e. the relative proportion of direct and diffuse irradiance), the BRDF of a reference surface can have apparent seasonal variations reaching $\pm 20\%$.

The second factor is the non-coincidence of the spectral bands of a field radiometer with those of a satellite. This effect is particularly important if the measurements by different instruments have to be compared in the same area. But while it is relatively easy to determine the corrections which must be applied for bare soils (which have a linear variation of the BRDF from visible to near-infrared), it is more difficult to determine those corresponding to a target, whose reflectance spectrum presents large variations within the spectral domain considered (such as vegetation). The correction must be based, in this case, on the detailed average reflectance spectrum of the target convoluted with the spectral response of the sensors.

The results of this study are not specific to satellite calibration. They have a wider domain of application and can be used in order to establish guidelines for performing any ground level BRDF measurement.

Acknowledgement

This study was supported by the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) under contract N°: 833/87/4891/00.

(1) : Trade names and company names are included for the convenience of the reader and imply no endorsement by the Station de Bioclimatologie de l'INRA at Avignon Montfavet (France)

REFERENCES

- Begni, G., 1985, Definition détaillée des profils des bandes spectrales SPOT. *Note interne CNES Toulouse.*
- Biggar, S. F., Labed, J., Santer, R.P., Slater R.P., Jackson R.D., and Moran M.S., 1988, Laboratory calibration of field reflectance panels. *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, **924**, 232-240.
- Curran, P. J., and Hay, A. M., 1986, The importance of measurement error for certain procedures in remote sensing at optical wavelengths. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **52**, 229-241.
- Curran, P. J., and Williamson, H. D., 1985, The accuracy of ground data used in remote-sensing investigations. *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 1637-1651.
- Curran, P. J., and Williamson, H. D., 1986, Sample size for ground and remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, **20**, 31-41.
- Dagnelie P., 1970, Théorie et méthodes statistiques. (Les presses Agronomiques de Gembloux, A.S.B.S.L., Ed. J. Duclot, S.A., Gembloux, Belgique).
- Duggin, M. J., 1980, The field measurement of reflectance factors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **46**, 643-647.
- Duggin, M. J., 1983, The effect of irradiance and reflectance variability on vegetation condition assessment. *International Journal of Remote Sensing*, **4**, 601-608.
- Duggin, M. J., and Cunia, T., 1983, Ground reflectance measurement techniques : A comparison. *Applied Optics*, **23**, 3771-3777.
- Gu, X. F., Guyot, G., and Verbrugge, M., 1990, Analyse de la variabilité spatiale d'un site test - Exemple de la Crau (France). *Photo-Interprétation*, **90** (1), Fasc. 5.
- Guyot, G., 1989, Les signatures spectrales des surfaces naturelles. (Téledétection Spatial n°5, Paradigme, Caen, France).
- Guyot, G., Gu, X. F., and Verbrugge, M., 1989, Caractérisation des propriétés optiques de la Crau. *Rapport final, Contrat n° 833/CNES/87/4891/00, INRA. Station de Bioclimatologie, Montfavet (France).*

- Guyot, G., Hanocq, J. F., Buis, J. P., and Saint, G., 1984, Mise au point d'un radiomètre de simulation de SPOT. *Second International Colloquium on Spectrale Signatures of Objects in Remote Sensing held in Bordeaux, France, on 12-16 September 1983*, (Ed. INRA Publ., Les Colloques de l'INRA N° 23), pp. 233-242.
- Jackson, R. D., Moran, M. S., Slater, P. N., and Biggar S.F., 1987, Field calibration of reference réflectance panels. *Remote Sensing of Environment*, **22**, 145-158.
- Jackson, R. D., and Robinson, B. F., 1985, Field evaluation of the temperature stability of a multispectral radiometer. *Remote Sensing of Environment*, **17**, 103-108.
- Kimes, D. S., and Kirchner, J. A., 1982, Irradiance measurement errors due to the assumption of a lambertian reference panel. *Remote Sensing of Environment*, **12**, 141-149.
- Lord, D., Desjardins, R. L., Dubé, P. A., and Brach, E. J., 1985, Variation of crop canopy spectral reflectance measurements under change sky conditions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **51**, 689-695.
- Milton, E. J., 1981, Does the use of two radiometers correct for irradiance changes during measurements? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **8**, 1223-1225
- Robinson B. F., Biehl L. L., 1979, Calibration procedures for measurement of reflectance factor in remote sensing field research. *Proc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **196**, 16-26.
- Slater, P. N., 1985, Radiometric considerations in remote sensing. *Proceedings of Institute of Electronical and Electronics Engineers (IEEE) - Geoscience and Remote Sensing Society* **73(6)**, 997-1011.
- Slater, P. N., Biggar, S. F., Holm, R. G., Jackson, R. D., Mao, Y., Moran, M. S., Palmer, J. M., and Yuan, B., 1986, Absolute calibration of the Thematic Mapper. *Proceedings of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, **660**, 2-8.
- Slater, P. N., Biggar, S. F., Holm, R. G., Jackson, R. D., Mao, Y., Moran, M. S., Palmer, J. M., and Yuan, B., 1987, Reflectance and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors. *Remote Sensing of Environment*, **22**, 11-37.
- Verbrughe, M., and Lecomte, P., 1990, Mesure de la réponse directionnelle d'un panneau de "Spectralon", *Note interne, INRA. Station de Bioclimatologie, Montfavet (France)*

Vermote, E., 1990, Effets d'atmosphère en télédétection. *Thèse Doctorat en Laser, Molécules, Rayonnement Atmosphérique, Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois (France).*

TROISIEME PARTIE

**ETALONNAGE ET INTER-COMPARAISON DES
IMAGES SATELLITAIRES DANS LES BANDES
HOMOLOGUES DU CAPTEUR HRV**

INTRODUCTION

Les résultats obtenus sur les propriétés optiques du site test, que nous avons vus dans le deuxième chapitre, ont montré que le site de la Crau est très favorable pour l'étalonnage et l'inter-comparaison des données satellitaires. Ainsi, dans une deuxième étape, nous avons réalisé un certain nombre de campagnes de mesure sur le site test pour étalonner et inter-étalonner les capteurs satellitaires. Dans ces campagnes, nous avons effectué systématiquement des mesures de réflectance du site et des mesures atmosphériques aux moments où les images satellitaires correspondantes étaient obtenues.

En analysant les images et les données des mesures au sol, nous avons pu:

- (1) valider expérimentalement le modèle de transfert radiatif 5S;
- (2) mettre au point et valider expérimentalement une méthode de correction de l'effet de la FTM sur l'image SPOT1-HRV2;
- (3) étalonner les capteurs SPOT1-HRV1, SPOT1-HRV2, LANDSAT5-TM et NOAA11-AVHRR dans les bandes homologues de celles de HRV;
- (4) inter-étalonner SPOT1-HRV2, LANDSAT5-TM et NOAA11-AVHRR dans les bandes homologues de celles de HRV;
- (5) réaliser un essai d'inter-comparaison des données satellitaires.

Les résultats obtenus seront présentés dans quatre paragraphes, essentiellement sous forme d'articles. Le premier paragraphe est composé de deux articles, qui présentent les résultats correspondant aux points (1) et (2); Le deuxième paragraphe est constitué par un article concernant l'étalonnage absolu et l'application aux images SPOT1-HRV1; Les étalonnages absolus et l'inter-étalonnage des capteurs SPOT1-HRV2, LANDSAT5-TM et NOAA11-AVHRR seront présentés dans le troisième paragraphe (un article); Dans le quatrième paragraphe, enfin, nous discuterons des effets des différents facteurs qui affectent l'inter-comparaison des données satellitaires à partir d'un certain nombre de résultats préliminaires.

**I - VALIDATION EXPERIMENTALE DU MODELE 5S ET D'UNE
METHODE DE CORRECTION DE L'EFFET DE LA FTM
SUR L'IMAGE SPOT1-HRV**

Article 3

**"Utilisation de l'opération "ART*SPOT"
pour tester le modèle 5S et la F.T.M. du satellite SPOT"**

(publié dans Cinquième Coll. Int. Mesures Physiques et Signatures en
Téledétection, 14-18 Jan. 1991, Courchevel (France), ESA SP-319: 53-56)

Article 4

"Correction de la FTM sur les images de SPOT"

(accepté par Photo-Interprétation)

UTILISATION DE L'OPERATION "ART*SPOT" POUR TESTER

LE MODELE 5S ET LA F.T.M. DU SATELLITE SPOT

X.F. Gu, G. Guyot, M. Verbrughe

INRA Bioclimatologie, 84140 Montfavet (France)

RESUME

Pour l'opération ART*SPOT 16 carrés noirs de 60m de côté, répartis sur une surface de 1,5x1,0 km, ont été installés en Crau (sud-est de la France). Ces surfaces de petites dimensions, présentant un fort contraste avec leur environnement, ont permis de mettre en évidence les effets de la FTM de SPOT-HRV sur les images acquises et de valider expérimentalement sa valeur à la fréquence de Nyquist fournie par SPOT IMAGE. L'expérience a en outre permis de valider expérimentalement la fonction d'estimation des effets atmosphériques et de l'environnement du modèle "5S" de transfert atmosphérique.

Mots clefs: SPOT, FTM, Corrections atmosphériques, corrections radiométriques.

I. INTRODUCTION

Les données qui sont acquises au niveau d'un satellite ne correspondent pas exactement aux caractéristiques radiométriques des éléments du paysage visé, telles qu'elles peuvent être mesurées au niveau de la surface du sol. Pour une surface plane, elles sont affectées par deux types de perturbations liées à l'atmosphère et aux caractéristiques propres du capteur. Ainsi, pour déduire la réflectance d'objets visés par un satellite, à partir des valeurs numériques d'une image il est nécessaire de:

- connaître le coefficient d'étalonnage absolu du capteur (Ref. 1) qui permet de relier la valeur numérique de l'image à la luminance apparente;

- corriger les effets instrumentaux et en particulier la fonction de transfert de modulation (F.T.M.) du capteur (Ref. 2) afin de restituer la luminance des pixels visés en tenant compte de l'inertie du système de mesure;
- corriger les effets atmosphériques (Ref. 3), afin de déduire la luminance du sol de la luminance apparente qui est mesurée au niveau du satellite.

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étalonnage des capteurs satellitaires (Refs. 1, 4) et à la mise au point de modèles de transfert radiatif pour évaluer les effets atmosphériques (Ref. 3). Par contre, peu d'études ont été entreprises pour tester et valider, à partir de mesures au sol, les modèles de corrections atmosphériques ainsi que l'effet de la F.T.M. (Refs 5, 6). Cela est certainement dû au fait qu'il est nécessaire, pour effectuer ces tests, de mesurer la réflectance du sol et les paramètres atmosphériques avec une haute précision et d'installer des cibles artificielles d'assez grandes dimensions.

L'opération "ART*SPOT" nous a offert une opportunité pour effectuer ces tests. Elle a été organisée par la Réserve Géologique de Haute Provence, le BRGM, le Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur et la société SPOT IMAGE, au mois d'Octobre 1989, dans la plaine de la Crau (sud-est de la France). Son objectif était la création au sol, sur une surface plane de 1,5x1,0 km, du symbole de la Terre (\odot) formé par l'assemblage de 16 carrés noirs de 60m de côté et l'acquisition d'une image SPOT de cette zone. En utilisant des mesures de réflectance effectuées sur ces cibles de petite dimension, qui présentaient un fort contraste avec leur environnement, ainsi que d'autres données expérimentales, nous avons essayé de valider le modèle 5S de transfert atmosphérique (Ref 3), de mettre en évidence les effets de la F.T.M. de SPOT-HRV et de contrôler sa valeur pour le satellite en orbite.

II. ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNEES

2.1 Les données utilisées

Le site choisi pour l'opération "ART*SPOT" se trouvait à environ 5km du site d'étalonnage de SPOT. Il présentait un double avantage: il était proche du site retenu pour l'étalonnage du satellite SPOT sur son orbite et également de la mer dont la surface pouvait être utilisée pour estimer la réflectance de l'atmosphère.

La campagne de mesure a eu lieu le 16 Octobre 1989. Nous avons acquis l'images SPOT de cette zone, et simultanément nous avons mesuré sur le site la réflectance du sol et des surfaces noires (films de polyéthylène) ainsi que l'épaisseur optique de l'atmosphère (Ref. 7).

Tableau 1: Conditions géométriques et atmosphériques au moment de l'acquisition de l'image de SPOT.

| | |
|--|-------|
| Inclinaison de la visée (°) | 2.0 |
| Azimut de la visée (°) | 101.9 |
| Angle solaire zénithal (°) | 53.1 |
| Azimut du soleil (°) | 166.7 |
| Vapeur d'eau (g.cm ⁻²) | 1.470 |
| Ozone (cm.atm) | 0.260 |
| Epaisseur optique des aérosols (à 550nm) | 0.320 |

2.2 Traitement des données

Pour valider le modèle "5S" dans nos conditions expérimentales et pour mettre en évidence les effets de la FTM de SPOT-HRV et contrôler sa valeur pour le satellite en orbite nous avons procédé par étapes successives.

2.2.1 Calcul de la réflectance apparente

La réflectance apparente R^* est calculée à partir de la valeur numérique de l'image en utilisant l'équation suivante :

$$R^* = \frac{\pi.V}{E_0 \cos(\theta_s).D_s.A} \quad (1)$$

avec :

A : Coefficient d'étalonnage

L : Luminance équivalente (W.m⁻².μm⁻¹.sr⁻¹)

V : Valeur numérique de l'image

E₀: Eclairement solaire équivalent au niveau du satellite

D_s: Facteur de distance terre-soleil (Ref 3)

θ_s: Angle solaire zénithal

2.2.2 Simulation des réflectances apparentes de la mer et d'une cible noire.

La réflectance apparente de la mer, au voisinage de la côte, dépend de celle de son environnement (c'est à dire de la réflectance de la zone côtière) et de la contribution de l'atmosphère. Nous avons utilisé, pour les réflectances spectrales de la mer, celles qui sont données dans le modèle 5S (Tableau 2). Aussi, les réflectances qui correspondent aux canaux XS1 et XS2 ne sont-elles pas très précises puisque ce sont des valeurs

moyennes données dans la littérature et non pas à des mesures sur la Méditerranée. Mais comme ces valeurs sont très faibles, l'erreur absolue qui est introduite, est limitée. Par ailleurs on sait que dans le canal XS3 (proche-infrarouge) la réflectance de la mer est nulle.

La réflectance moyenne de la zone côtière a été déterminée sur une bande de 5km de large, à partir de l'image SPOT. Pour cela nous avons inversé la forme analytique du modèle 5S (détermination de la transmittance atmosphérique et de l'albédo sphérique à partir de 5S) afin d'obtenir la réflectance du sol.

Connaissant la réflectance de la mer et celle de l'environnement nous avons alors déterminé la réflectance apparente de la mer en utilisant le modèle 5S. La valeur obtenue, comparée à celle déduite directement de l'image nous a permis de vérifier la validité de 5S dans nos conditions expérimentales (Figure 1)

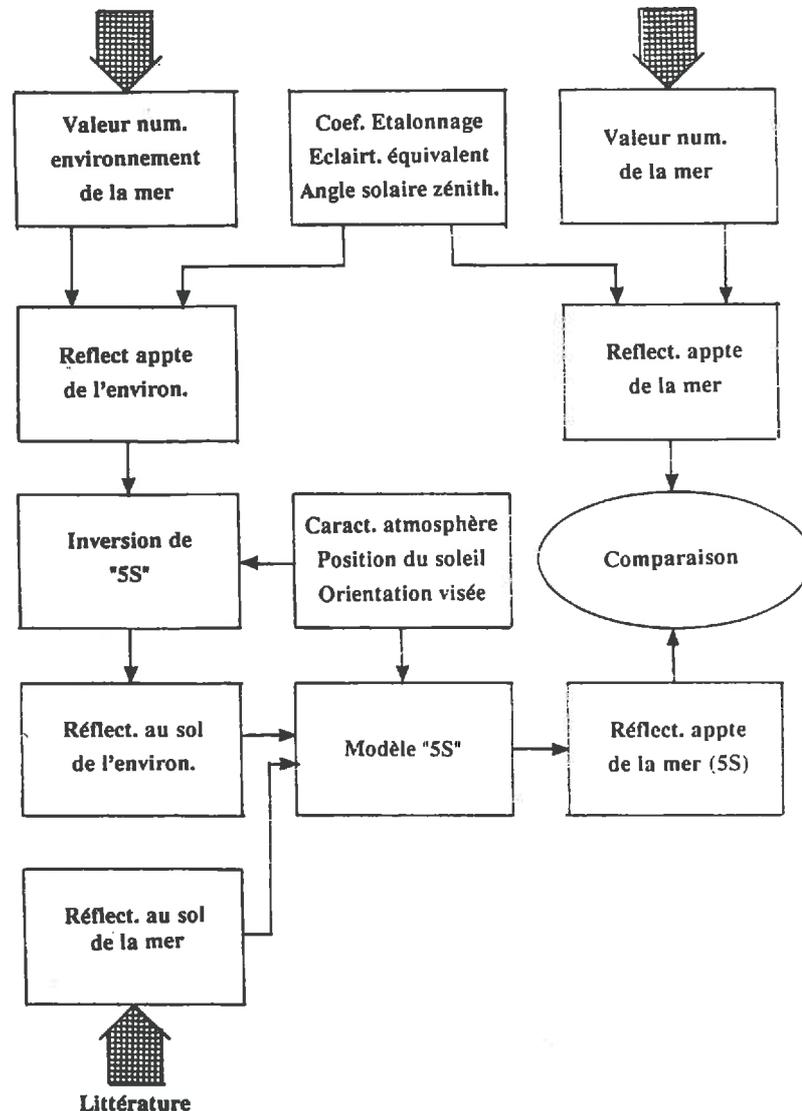


Figure 1: Validation du modèle 5S.

De même que pour la réflectance apparente de la mer, nous avons calculé la réflectance apparente de la cible noire en utilisant le modèle 5S. Mais, dans ce cas, la réflectance au sol de la cible (carré de 60m de côté) a été mesurée. La réflectance de l'environnement a été déterminée pour un cercle de 5km de rayon dont le centre était la cible noire.

2.2.3. Calcul de la transmittance atmosphérique et de la somme des réflectances de l'atmosphère et de l'environnement.

La réflectance apparente d'un objet au niveau du satellite R^* est liée à la réflectance au sol R par l'équation:

$$R^* = R_{ae} + T.R \quad (2)$$

avec :

T : transmittance de l'atmosphère

R_{ae} : somme des réflectances de l'atmosphère et de l'environnement

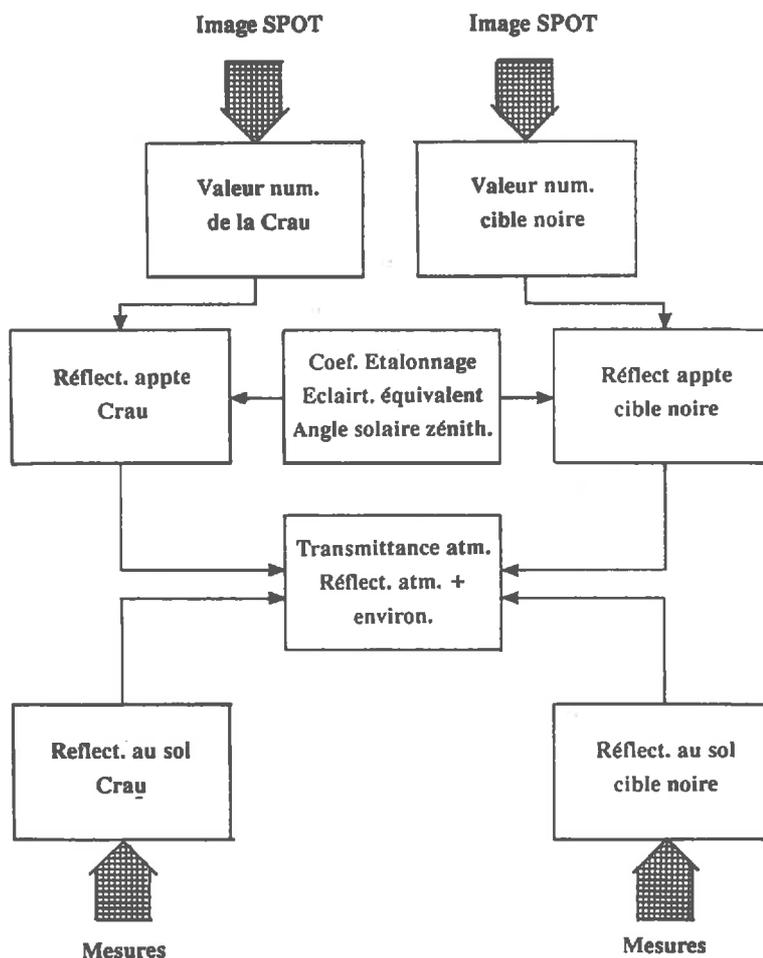


Figure 2: Détermination de R_{ae} et T .

Si on connaît les réflectances apparentes et les réflectances au sol de deux surfaces voisines (même environnement) relativement contrastées, on peut alors déduire facilement la transmittance de l'atmosphère et la somme des réflectances de l'atmosphère et de l'environnement en résolvant les deux équations linéaires obtenues, à condition toutefois que les effets instrumentaux (FTM) ne viennent pas perturber les données acquises par le satellite.

Dans notre étude nous avons ainsi déterminé R_{ae} et T à partir de mesures sur une cible noire et sur son environnement (Crau) (Figure 2). Nous avons alors comparé les valeurs obtenues avec celles qui étaient calculées par le modèle 5S afin de mettre en évidence les effets de la FTM et de vérifier également sa valeur.

2.2.4. Correction de l'effet de la FTM sur l'image

La FTM d'un capteur représente l'atténuation de l'amplitude de variation d'un signal en fonction de sa fréquence. L'image qui est obtenue à partir d'un satellite correspond à un échantillonnage effectué sur la zone visée. Elle peut ainsi être modélisée comme la convolution du signal d'entrée par la réponse impulsionnelle du capteur, suivie d'un échantillonnage (au pas du capteur). Dans ces conditions la FTM du capteur peut être définie comme la transformée de Fourier de sa réponse impulsionnelle (Ref. 2). La fréquence de Nyquist (ou fréquence de coupure) est égale à $f_e/2$ (f_e fréquence d'échantillonnage). Les fréquences plus élevées (qui correspondent à des objets plus petits que les pixels) sont altérées par le capteur et on observe alors un effet dit de "repliement de spectre". Pour les fréquences inférieures à $f_e/2$ la FTM tend vers 1 lorsque la fréquence des variations de contraste tend vers zéro.

La FTM des capteurs SPOT1-HRV n'a été mesurée qu'à la fréquence de Nyquist avant le lancement du satellite (Ref. 8). En mode multispectral, cette fréquence correspond à 25 cycles/km (40m de période). Les valeurs de la FTM ont été déterminées avec une mire présentant une variation sinusoïdale de l'intensité à la fréquence de Nyquist. Les mesures ont été effectuées avec les bandes de la mire orientées perpendiculairement et parallèlement à la ligne de détecteurs. Pour effectuer les corrections nous avons utilisé les valeurs obtenues selon les lignes ou les colonnes de l'image car elles sont différentes à cause de l'effet de filé (Tableau 4). Comme nous ne disposons pas d'informations précises sur la variation de la FTM de SPOT1-HRV en fonction de la fréquence, nous avons supposé que celle-ci était du même type que celle des capteurs de LANDSAT-TM. Les différentes mesures effectuées (Ref 6) montrent ainsi que pour les fréquences inférieures à $0,1.f_e$, la FTM est sensiblement égale à 1 et que, pour les fréquences comprises entre $0,1$ et $0,5.f_e$ (fréquence de Nyquist), elle présente une variation pratiquement linéaire. Ainsi, la FTM correspondant à un couple donné de fréquences

horizontale et verticale, a été déterminée par interpolation linéaire en utilisant les valeurs données dans le tableau 4 (Ref. 8).

Pour corriger l'image, nous avons tout d'abord appliqué, sur l'image brute une transformation en série de Fourier à deux dimensions. Nous avons alors corrigé l'image du spectre de Fourier en divisant les valeurs réelles et imaginaires, pour chaque couples de fréquences horizontale et verticale, par la valeur de la FTM correspondante. La transformation inverse appliquée à l'image du spectre corrigé nous a alors permis d'obtenir l'image corrigée de l'effet de la FTM.

III. RESULTATS

3.1. Validation du modèle 5S

Tableau 2 : Comparaison des réflectances apparentes de la mer déduite de l'image SPOT et calculée par 5S. (*)

| Bandes | XS1 | XS2 | XS3 |
|---|-------|-------|--------|
| V_{environ} | 53 | 38 | 31 |
| V_{mer} | 34 | 15 | 7 |
| R_{environ} | 0.128 | 0.125 | 0.182 |
| R_{mer} | 0.040 | 0.010 | 0.000 |
| R^*_{environ} | 0.138 | 0.134 | 0.158 |
| R^*_{mer} | 0.088 | 0.053 | 0.038 |
| $R^*_{\text{mer}}(5S)$ | 0.097 | 0.054 | 0.031 |
| $R^*_{\text{mer}}(5S) - R^*_{\text{mer}}$ | 0.009 | 0.001 | -0.007 |

V : Valeur numérique de l'image

R: Réflectance au sol

R*: Réflectance apparente

mer: indique les paramètres relatifs à la mer

environ: indique les paramètres relatifs à l'environnement de la mer

Le tableau 2 présente la comparaison des réflectances apparentes de la mer déduites de l'image SPOT R^*_{mer} et estimée à partir de 5S $R^*_{\text{mer}}(5S)$ (Figure 1). les différences qui sont observées entre les deux valeurs sont très faibles puisqu'elles varient entre +0,9% et -0,7% pour XS1 et XS3 respectivement. Les écarts observés sont tout à fait

acceptables, étant donné les incertitudes sur les réflectances de la mer (données moyennes de la littérature) et de l'environnement (estimation à partir de l'image SPOT). Dans ces conditions on peut donc estimer que le modèle 5S peut être utilisé pour corriger les effets atmosphériques et les effets d'environnement avec une précision compatible avec les déterminations que nous avons effectuées.

3.2. Mise en évidence de l'effet de la FTM

Pour mettre en évidence les effets de la FTM nous avons déterminé la transmittance atmosphérique et la réflectance apparente de l'environnement et de l'atmosphère à partir des mesures de réflectance apparente de la cible noire et de sa zone environnante (Tableau 3).

Tableau 3 : Mise en évidence de l'effet de la FTM.

| Bandes | XS1 | XS2 | XS3 |
|---|--------|--------|--------|
| V_{crau} | 62.08 | 56.73 | 44.80 |
| V_{noir} | 41.00 | 32.00 | 27.00 |
| R_{crau} | 0.143 | 0.211 | 0.271 |
| R_{noir} | 0.040 | 0.037 | 0.033 |
| R^*_{crau} | 0.160 | 0.200 | 0.244 |
| R^*_{noir} | 0.106 | 0.113 | 0.147 |
| $R^*_{\text{noir}}(5S)$ | 0.102 | 0.084 | 0.074 |
| $R^*_{\text{noir}}(5S) - R^*_{\text{noir}}$ | -0.004 | -0.030 | -0.073 |
| T | 0.531 | 0.503 | 0.408 |
| R_{ae} | 0.084 | 0.094 | 0.133 |

- crau : paramètres relatifs au site test de "la Crau"

- noir : paramètres relatifs à la cible noire

Nous pouvons constater qu'il existe un désaccord évident entre la réflectance apparente de la cible noire, déduite du modèle 5S, et celle qui est déterminée à partir de l'image SPOT. Les valeurs déterminées à partir de 5S sont systématiquement plus faibles que celles qui sont déterminées à partir de l'image et l'écart relatif passe de -4% pour XS1 à -36% pour XS2 et -99% pour XS3. Par ailleurs si on considère les valeurs de la transmittance atmosphérique et de la contribution de l'atmosphère et de l'environnement à la réflectance, qui sont déduites de l'image SPOT, on observe des valeurs tout à fait aberrantes. La transmittance atmosphérique serait ainsi de l'ordre de 50% et décroîtrait lorsque la longueur d'onde augmente et la composante R_{ae} augmenterait avec la longueur d'onde. Ces résultats sont en contradiction totale avec ce

que l'on connaît des caractéristiques de l'atmosphère. La seule explication possible à ce désaccord est le fait que la FTM de l'instrument HRV n'est pas prise en compte.

3.3. Effets des corrections de FTM

Le tableau 4 présente les réflectances apparentes de la cible noire et de la zone qui l'entoure après les corrections de FTM, ainsi que les valeurs de la transmittance atmosphérique et de la contribution de l'atmosphère et de l'environnement à la réflectance, déduites du modèle 5S et déterminées à partir de l'image SPOT corrigée. On peut remarquer l'existence d'un très bon accord entre les données simulées et déterminées à partir de l'image. On remarque également qu'avec les cibles de petites dimensions, présentant un fort contraste avec leur environnement, les corrections à apporter sont très importantes. Ainsi, par exemple, la réflectance apparente de la cible noire pour XS3 qui est de 14,69% avant la correction de FTM, passe à 8,16% après correction ce qui correspond à un écart relatif de 80%.

Tableau 4 : Résultats de la correction de la FTM

| Bandes | XS1 | XS2 | XS3 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|
| FTM horizontale | 0.41 | 0.38 | 0.36 |
| FTM verticale | 0.48 | 0.41 | 0.28 |
| FTM moyenne | 0.45 | 0.40 | 0.32 |
| V_{crau} | 62.08 | 56.73 | 44.80 |
| V_{noir} | 39.00 | 25.00 | 15.00 |
| R_{crau} | 0.143 | 0.211 | 0.271 |
| R_{noir} | 0.040 | 0.037 | 0.033 |
| R^*_{crau} | 0.160 | 0.200 | 0.244 |
| R^*_{noir} | 0.101 | 0.088 | 0.082 |
| $R^*_{noir}(5S)$ | 0.102 | 0.084 | 0.074 |
| $R^*_{noir}(5S) - R^*_{noir}$ | 0.001 | -0.005 | -0.007 |
| T | 0.583 | 0.644 | 0.682 |
| T(5S) | 0.568 | 0.671 | 0.713 |
| T(5S)-T | -0.014 | 0.027 | 0.031 |
| R_{ae} | 0.077 | 0.064 | 0.059 |
| $R_{ae}(5S)$ | 0.079 | 0.059 | 0.050 |
| $R_{ae}(5S) - R_{ae}$ | 0.002 | -0.006 | -0.004 |

Les valeurs de la transmittance atmosphérique et de la composante R_a sont également en bon accord avec les données de la littérature. Par ailleurs, les écarts qui sont constatés entre les valeurs estimées à l'aide de 5S et celles déduites de l'image corrigée, sont du même ordre de grandeur que les incertitudes dues à l'utilisation de 5S (Tableau 4). Cela permet ainsi de valider, *a posteriori*, la méthode de correction des effets de la FTM et les valeurs qui sont fournies par SPOT IMAGE.

IV. Conclusion

Cette étude nous a permis tout d'abord de vérifier expérimentalement la validité de la correction des effets d'environnement qui est incluse dans le modèle 5S. Elle nous a permis ensuite de monter l'importance des effets de la FTM lorsque l'on a des cibles de petites dimensions présentant un fort contraste avec leur environnement. Un programme de correction des images a été développé à cette occasion et les résultats qui ont déjà été obtenus montrent que ce type de correction permet d'obtenir des informations beaucoup plus précises sur les petits parcellaires agricoles en restituant les caractéristiques radiométriques des cibles, ce que ne permettent pas les méthodes de filtrage classiques.

Remerciements:

L'image SPOT utilisée pour cette étude a été financé par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) (Contrat n° 833/CNES/87/4891/02). Les auteurs tiennent à remercier M. Leroy (CNES Toulouse) pour ses remarques concernant la correction de la FTM.

(*) Compléments d'information pour le tableau 2: les différentes contributions à la réflectances apparente de la surface de la mer, calculées à l'aide du modèle 5S

| | XS1 | XS2 | XS3 |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| R_a | 0,062 | 0,038 | 0,022 |
| R_e | 0,015 | 0,010 | 0,009 |
| R_c | 0,020 | 0,006 | 0,000 |
| $R^*_{mer}(5S) = R_a + R_e + R_c$ | 0,097 | 0,054 | 0,031 |

a indique la contribution de l'atmosphère

e indique la contribution de l'environnement

c indique la contribution propre de la cible (la mer)

BIBLIOGRAPHIE

1. Santer R. et al., 1991; SPOT calibration on the test site "La Crau" (France). *Dans le même volume.*
2. Leroy M., 1990; Modèles des systèmes de mesure imageurs optiques. *In Ecole d'été en Télédétection Spatiale: aspects physiques et modélisation*, Août 1988, Toulouse, CEPADUES Ed. (France): 311-363
3. Tanré D. et al., 1986; Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum. *User's guide, L.O.A. Lille: 264p.*
4. Slater P.N. et al., 1987; Reflectance- and radiance-based methods for in-flight absolute calibration of multispectral sensors. *Remote Sens. Environ.*, 22: 11-37
5. Grunblatt J., 1987; An MTF analysis of Landsat Classification error at field boundaries. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 53: 639-643
6. Schovengerdt R.A. et al., 1985; Landsat Thematic Mapper image derived MTF. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 51: 1395-1406.
7. Gu X.F. et al., 1991; Inter-étalonnage de SPOT1-HRV, LANDSAT-TM et NOAA11-AVHRR dans les domaines du visible et du proche-infrarouge. *Dans le même volume.*
8. SPOT IMAGE, 1986; Guide des utilisateurs de données SPOT.

CORRECTION DE LA FTM SUR LES IMAGES DE SPOT

G. Guyot, X.F. Gu, P. Clastre

INRA Station de Bioclimatologie
B.P. 91, 84143 Montfavet CEDEX (France)

RESUME

La fonction de transfert de modulation (FTM) d'un capteur satellitaire représente l'atténuation de l'amplitude de variation du signal d'entrée en fonction de sa fréquence. Son effet est donc d'autant plus marqué que la fréquence spatiale de variation des éléments du paysage est plus élevée. Une méthode de correction de la FTM du capteur HRV de SPOT est proposée. Elle s'appuie sur un modèle simple représentant la variation de la FTM en fonction de la fréquence spatiale. Pour corriger une image brute, il faut tout d'abord déterminer sa transformée de Fourier bidimensionnelle. Les valeurs réelles et imaginaires, correspondant à chaque couple de fréquences horizontale et verticale, sont alors divisées par la valeur de la FTM correspondante. La transformation inverse, appliquée à l'image du spectre corrigé, permet ensuite d'obtenir l'image corrigée des effets de la FTM.

Un exemple montre l'intérêt de cette correction dans des régions très cloisonnées où les contrastes entre les champs voisins sont importants. Contrairement aux méthodes de filtrage qui réduisent le contenu en information d'une image, la correction de la FTM du capteur permet de restituer les valeurs radiométriques des différents objets visés tout en faisant ressortir les limites de parcelles et la texture à l'intérieur de celles-ci.

1. INTRODUCTION

Les données numériques acquises par un satellite ne permettent pas de déduire directement les caractéristiques radiométriques des éléments de paysage qui sont visés, car de nombreux facteurs perturbateurs interviennent. En visée verticale et au-dessus d'une zone plane et horizontale les données satellitaires sont affectées par l'atmosphère et par les caractéristiques propres du capteur. Pour déterminer les caractéristiques radiométriques des objets visés il faut donc corriger les effets de ces deux types de perturbations. Parmi les effets propres au capteur qui peuvent être corrigés, ceux qui ont le poids le plus important sont représentés par sa fonction de transfert de modulation (FTM).

Si les méthodes de correction des effets atmosphériques commencent à être bien connues des utilisateurs de données spatiales, il n'en est pas de même pour les méthodes de correction des effets de la FTM. Le guide des utilisateurs des données de SPOT (5) donne la FTM des

capteurs HRV mais aucune méthode pratique n'est proposée pour corriger cet effet. Le but de cet exposé est donc de présenter une méthode de correction de la FTM, sa validation et un exemple d'application.

2. LA FONCTION DE TRANSFERT DE MODULATION

2.1. La FTM d'un capteur satellitaire

La FTM d'un capteur satellitaire représente l'atténuation de l'amplitude de variation du signal d'entrée en fonction de sa fréquence. Elle dépend des caractéristiques de transfert du signal de nombreux éléments: système optique, détecteur, électronique de traitement du signal, atmosphère... (3). Pour simplifier l'exposé nous ne considérerons que la FTM globale, résultant de l'addition de toutes les composantes élémentaires. Elle est représentée par un coefficient compris entre 0 et 1 qui dépend de la fréquence de variation du signal (l'atténuation étant d'autant plus forte que ce coefficient est plus petit). Elle peut être définie comme la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle du capteur (3). Pour restituer le signal tel qu'il était à l'entrée du capteur il faut donc diviser la transformée de Fourier du signal de sortie par la FTM correspondante.

L'image qui est obtenue à partir d'un satellite correspond à un échantillonnage effectué sur la zone visée, au pas du capteur. Cela correspond, par exemple, à 20m pour HRV de SPOT en mode multibande et en visée verticale. La fréquence d'échantillonnage f_e est ainsi, pour HRV, de 41,6 kcycles/radian en mode multibande, ce qui équivaut à une fréquence spatiale de 50 cycles par km en visée verticale. Il est évident que l'effet de la FTM sera le plus grand lorsque deux pixels adjacents présenteront un contraste maximum. Cela correspond à une fréquence égale à $f_e/2$ qui est appelée fréquence de Nyquist ou fréquence de coupure. Pour des paysages présentant une fréquence supérieure à la fréquence de Nyquist il se produit un effet dit de "repliement du spectre" qui modifie cette fréquence en une fréquence plus faible, symétrique de la fréquence initiale par rapport à la fréquence de Nyquist. Le capteur idéal est celui pour lequel la FTM est égale à 1 pour les fréquences inférieures à la fréquence de Nyquist et à zéro pour les fréquences supérieures à la fréquence de Nyquist.

Pour un capteur réel la FTM correspondant à la fréquence de Nyquist est toujours inférieure à 1. Lorsque la fréquence des variations du paysage diminue, la FTM tend progressivement vers 1. C'est ce que montre la figure 1 qui correspond au capteur Thematic Mapper de Landsat4 (4).

2.2. FTM des capteurs HRV de SPOT

La FTM des capteurs HRV de SPOT1 n'a été mesurée qu'à la fréquence de Nyquist avant le lancement du satellite (5) en utilisant une mire présentant une variation sinusoïdale de l'intensité. Les mesures ont été effectuées avec les bandes de la mire orientées perpendiculairement et parallèlement à la ligne de détecteurs, afin d'obtenir les valeurs de la FTM selon les lignes et les colonnes de l'image. Selon les lignes, la FTM correspond au

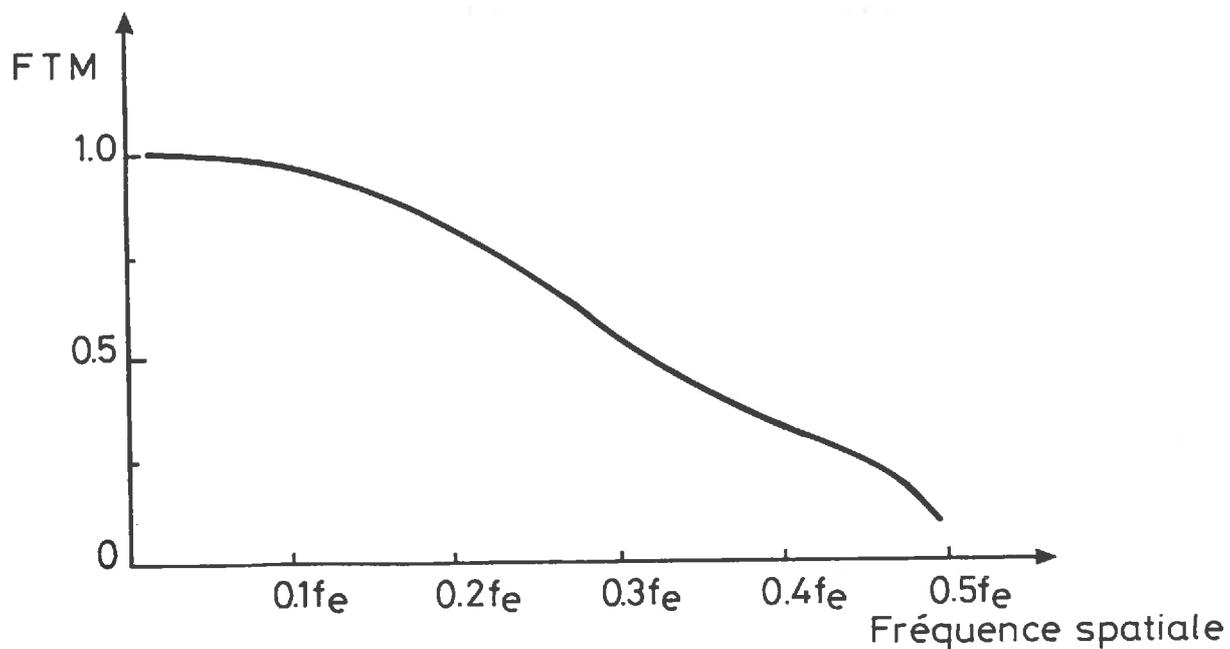


Figure 1: Variation de la FTM de LANDSAT4 THEMATIC MAPPER en fonction de la fréquence spatiale (adapté d'après Schowengerdt et al., 1985)

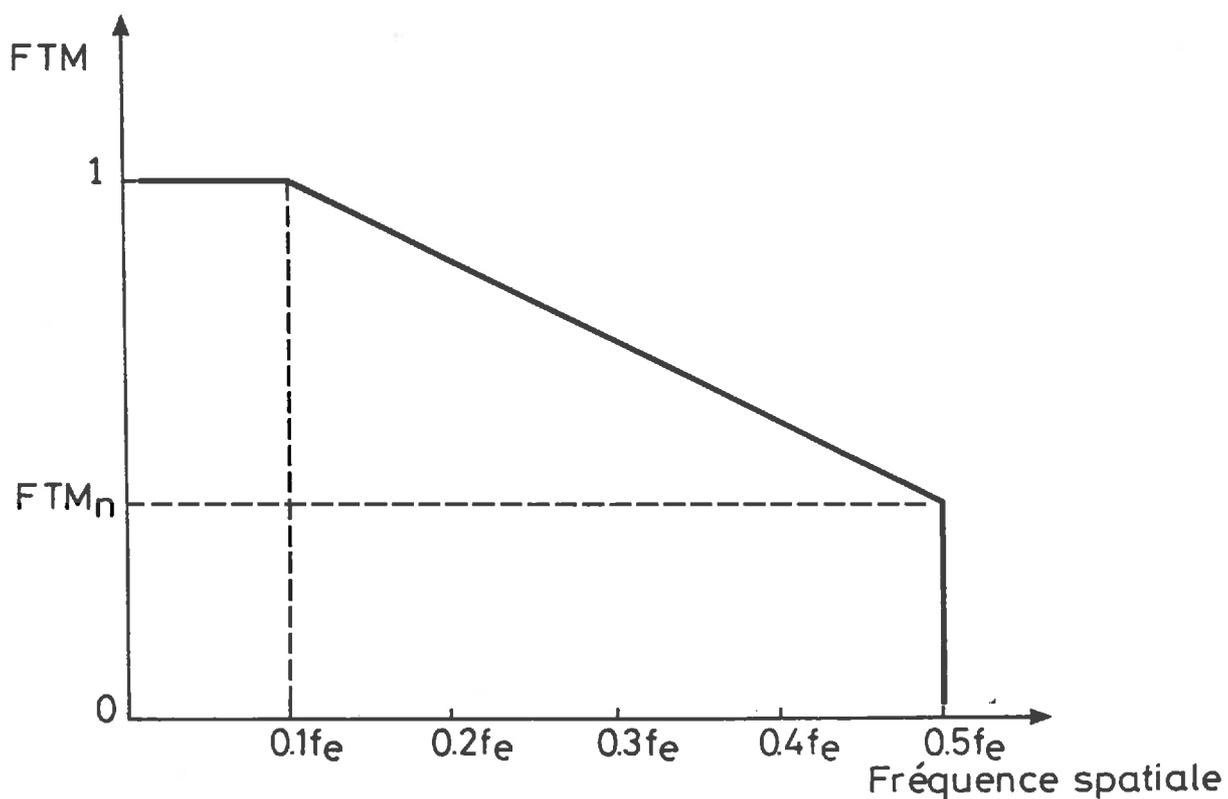


Figure 2: Modèle utilisé pour la correction de la FTM de SPOT1-HRV.

passage d'un détecteur au suivant alors que selon les colonnes on mesure, entre autres, l'effet de filé sur le même détecteur. Les valeurs qui ont été obtenues sont données dans le tableau 1.

Tableau 1: Valeurs de la FTM du capteur HRV1 de SPOT1, mesurée à la fréquence de Nyquist, avant le lancement (5).

| Bandes | XS1 | XS2 | XS3 |
|-----------------|------|------|------|
| FTM horizontale | 0.41 | 0.38 | 0.36 |
| FTM verticale | 0.48 | 0.41 | 0.28 |
| FTM moyenne | 0.45 | 0.40 | 0.32 |

Pour corriger les images il nous faut non seulement les valeurs de la FTM pour $f_c/2$, mais également leurs variations en fonction de la fréquence. Comme nous ne disposons pas de telles données pour SPOT1 nous avons donc établi un modèle approximatif par analogie avec les résultats qui ont été obtenus pour le capteur Thematic Mapper.

Si nous nous reportons à la figure 1 nous pouvons remarquer que la variation de la FTM entre $0,1f_c$ et $0,5f_c$ est pratiquement linéaire et que, lorsque la fréquence est inférieure à $0,1f_c$ la FTM est égale à 1. C'est pourquoi nous avons choisi pour représenter la variation de la FTM des capteurs HRV, le modèle qui est représenté sur la figure 2. Ainsi, la FTM correspondant à un couple donné de fréquences horizontale et verticale, a été déterminée par interpolation linéaire, à partir des valeurs données dans le tableau 1 et du modèle de la figure 2.

2.3. Correction de la FTM des capteurs HRV de SPOT

Pour corriger l'image nous avons tout d'abord appliqué sur l'image brute une transformation en série de Fourier à deux dimensions. Nous avons alors corrigé l'image du spectre de Fourier en divisant les valeurs réelles et imaginaires, pour chaque couple de fréquences horizontale et verticale, par la valeur de la FTM correspondante. La transformation inverse, appliquée à l'image du spectre corrigé, nous a alors permis d'obtenir l'image corrigée de l'effet de la FTM.

Les figure 3 et 4 donnent un exemple de résultats qui peuvent être obtenus en Crau dans le sud-est de la France. Dans cette région le parcellaire agricole est très petit et des brise-vent, constitués par des haies de cyprès ou de peupliers, protègent les cultures irriguées. La comparaison des images avant (Figure 3) et après correction de la FTM (Figure 4) permet de bien voir les améliorations qui sont apportées. Les limites de parcelles et les lignes de brise-vent apparaissent beaucoup plus nettement. Les détails du dépôt d'ordures de la ville de Marseille (coin inférieur droit des figures 3 et 4) sont beaucoup plus nets ainsi que les rives de l'étang et le village d'Entresens (au centre de la partie inférieurs de l'image).

Il faut noter que cette amélioration de la qualité de l'image n'affecte pas son contenu en



Figure 3: Vue d'une partie de la Crau entourant la zone choisie pour l'implantation de l'opération ART*SPOT, sans aucune correction. Carré de 524 pixels de côté (10,48km) extrait de la scène SPOT1 acquise par le capteur HRV1, à 10h43 (TU), avec une inclinaison de la visée de 2° à droite de l'orbite, le 16 Octobre 1989 (KJ 49-262)
(copyright SPOT IMAGE)



Figure 4: Même extrait de la scène SPOT acquise le 16 Octobre 1989 que pour la figure 3, mais après correction de la FTM.
(Copyright SPOT IMAGE)

information, au contraire, la correction de FTM permet de restituer aux données radiométriques la valeur qu'elles avaient à l'entrée du capteur.

La figure 5 représente la distribution des niveaux radiométriques corrigés (axe horizontal) en fonction des niveaux radiométriques non corrigés (axe vertical). On peut constater qu'à une valeur radiométrique de l'image non corrigée correspond un très grand nombre de valeurs de l'image corrigée (ligne horizontale). Cela est dû au fait que les corrections effectuées en un point dépendent de son environnement. La correction de la FTM facilite ainsi l'interprétation des images satellitaires.

Il faut cependant remarquer l'existence, sur la figure 5, de quelques valeurs nulles pour les données radiométriques corrigées. Malgré l'existence d'une surface d'eau, dont la réflectance est très faible, les valeurs obtenues ne peuvent pas être nulles à cause de la contribution de l'atmosphère. Ces erreurs introduites sont peut-être dues au fait que le modèle de correction utilisé n'est qu'approximatif. Quelques améliorations devraient donc être apportées.

3. VALIDATION DE LA METHODOLOGIE UTILISEE

Pour valider la méthode que nous avons utilisée nous avons profité de l'opportunité qui nous était offerte par l'opération ART*SPOT. Celle-ci a été organisée par la Réserve Géologique de Haute Provence, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières, le Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur et la société SPOT IMAGE, au mois d'Octobre 1989, dans la Plaine de la Crau. Son objectif était la création au sol, sur une surface plane de 1,5x1,0km, du symbole de la Terre (\odot) formé par l'assemblage de 16 carrés noirs de 60m de côté. Ce symbole apparaît au centre des figures 3 et 4.

Les carrés noirs étaient formés par des films de polyéthylène noir tendus au sol. Ils présentaient un fort contraste avec leur environnement constitué par un sol de galets avec une végétation éparsée et sèche. A partir de mesures au sol de la réflectance des carrés noirs et du sol environnant et des caractéristiques de l'atmosphère ainsi que de données acquises sur le site d'étalonnage de SPOT (1) situé à 10km au sud et sur la mer, nous avons pu vérifier la validité des corrections que nous avons effectuées (2).

La procédure utilisée a consisté à comparer les valeurs de la réflectance apparente des surfaces noires et du sol environnant, telles qu'elles peuvent être déduites des valeurs numériques des images corrigées et telles qu'elles peuvent être estimées à partir des mesures au sol après correction des effets atmosphériques.

Au niveau d'un satellite, la luminance qui est mesurée correspond à celle de la cible visée, atténuée par la transmission atmosphérique et à laquelle s'ajoutent la luminance de l'atmosphère et la contribution de l'environnement de la cible (à cause de la diffusion atmosphérique). La luminance apparente peut être transformée en réflectance apparente en introduisant l'éclairement équivalent du soleil hors de l'atmosphère. On écrit ainsi:

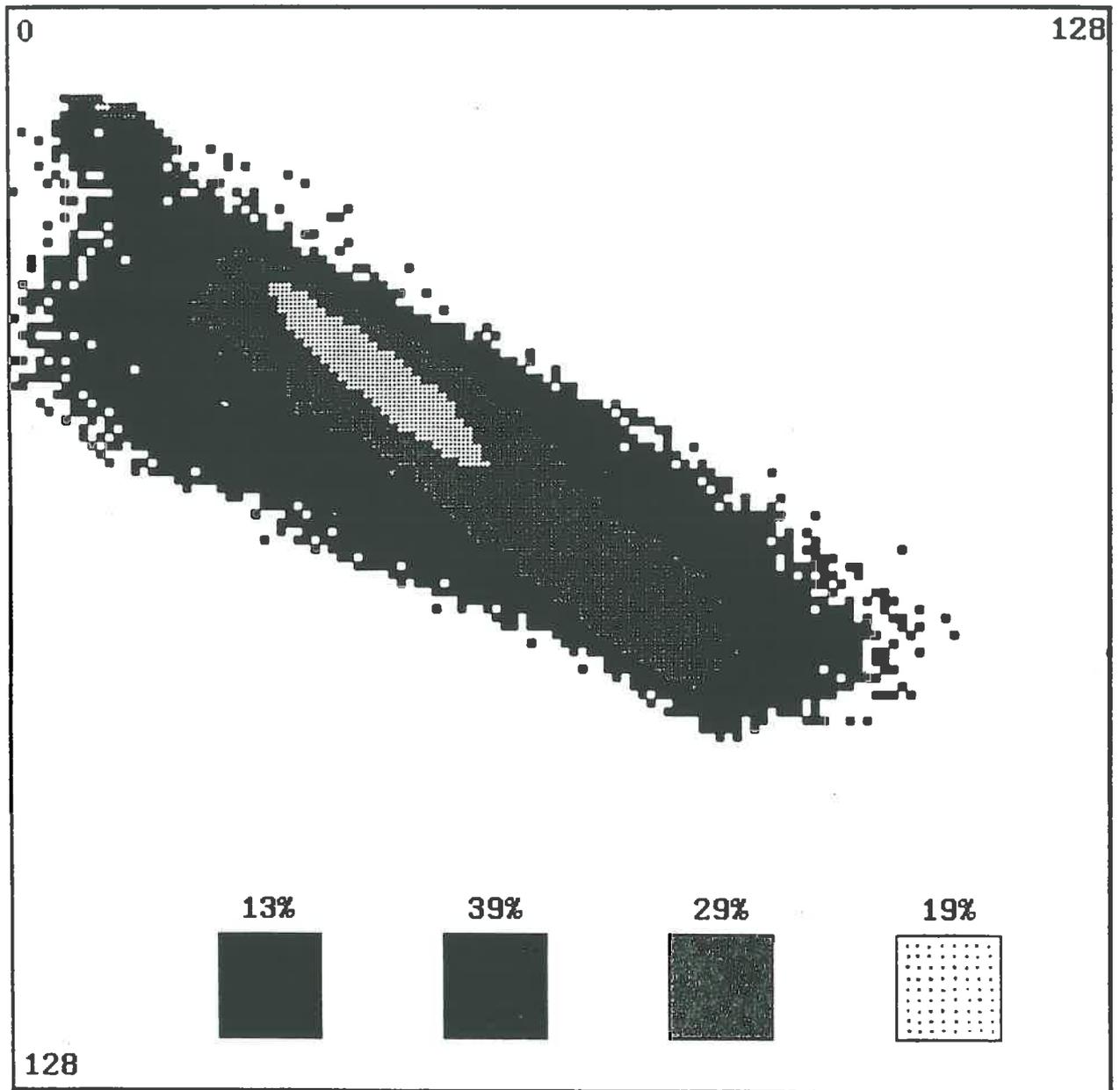


Figure 5: Histogramme bidimensionnel représentant la distribution des niveaux radiométriques corrigés (axe horizontal) en fonction des niveaux radiométriques non corrigés (axe vertical). Quatre niveaux ont été distingués dans les corrections qui ont été apportées, de faibles (gris clair) à très fortes (noir). Les pourcentages de pixels affectés sont indiqués au-dessus de chaque nuance de gris.

$$R^* = R_{ae} + T.R$$

avec:

R^* : réflectance apparente;

R_{ae} : somme de la réflectance de l'atmosphère et de la contribution de l'environnement;

T: transmittance de l'atmosphère.

R: réflectance de la cible, mesurée au sol.

Si on connaît les réflectances apparentes et les réflectances au sol de deux surfaces voisines (même environnement) relativement contrastées, on peut alors déduire facilement R_{ae} et T en résolvant les deux équations linéaires obtenues, à condition toutefois que la FTM ne vienne pas perturber les données acquises par le satellite.

Pour effectuer ces comparaisons il faut donc tout d'abord valider le modèle de correction des effets atmosphériques que nous utilisons. Nous avons employé le modèle "5S" (Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire) (6) que nous avons validé dans nos conditions expérimentales (2). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2. Il montre un très bon accord entre les données simulées à partir des mesures au sol et les données déduites de l'image SPOT corrigée.

Tableau 2: Comparaison des valeurs de la réflectance apparente R^* (noir: cible noire, mer: surface de la mer), de la transmittance de l'atmosphère T et de la somme de la réflectance de l'atmosphère et de la contribution de l'environnement R_{ae} , déduites de l'image SPOT et déterminées à partir du modèle 5S. (d'après 7)

| Bandes | XS1 | XS2 | XS3 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|
| R^*_{mer} | 0.088 | 0.053 | 0.038 |
| $R^*_{mer}(5S)$ | 0.097 | 0.054 | 0.031 |
| $R^*_{mer}(5S) - R^*_{mer}$ | 0.009 | 0.001 | -0.007 |
| R^*_{noir} | 0.101 | 0.088 | 0.082 |
| $R^*_{noir}(5S)$ | 0.102 | 0.084 | 0.074 |
| $R^*_{noir}(5S) - R^*_{noir}$ | 0.001 | -0.005 | -0.007 |
| T | 0.583 | 0.644 | 0.682 |
| T(5S) | 0.568 | 0.671 | 0.713 |
| T(5S)-T | -0.014 | 0.027 | 0.031 |
| R_{ae} | 0.077 | 0.064 | 0.059 |
| $R_{ae}(5S)$ | 0.079 | 0.059 | 0.050 |
| $R_{ae}(5S) - R_{ae}$ | 0.002 | -0.006 | -0.004 |

Les valeurs de la transmittance atmosphérique et de la composante R_{ae} , calculées à partir de

l'image corrigée, sont en bon accord avec celles de la littérature (7). Par ailleurs, ces valeurs présentent de faibles écarts avec celles qui sont estimées à partir de 5S. Ils sont de l'ordre de grandeur des incertitudes liées à l'utilisation du modèle 5S. Cela permet ainsi de valider la méthode de correction des effets de la FTM.

Enfin il faut remarquer qu'avec les cibles de petite dimension, présentant un fort contraste avec leur environnement, les corrections des effets de la FTM sont très importantes. C'est ce que montre le tableau 3 dans lequel sont données les réflectances apparentes de la cible noire au niveau du satellite, avant et après la correction de la FTM.

Tableau 3: Valeurs de la réflectance apparente R^* d'une cible noire avant et après la correction de la FTM

| Bandes | XS1 | XS2 | XS3 |
|------------------|-------|-------|-------|
| Avant correction | 0,106 | 0,113 | 0,147 |
| Après correction | 0,101 | 0,088 | 0,082 |
| Ecart % | 5 | 28 | 79 |

4. CONCLUSION

Cette étude a permis de montrer l'importance et l'intérêt des corrections de la FTM des capteurs satellitaires. Le modèle très simple qui est proposé pour corriger la FTM de SPOT est certainement encore très grossier mais la validation expérimentale que nous avons effectuée montre qu'il peut déjà être utilisé de façon opérationnelle. Pour l'améliorer il faudrait, en particulier, déterminer expérimentalement la variation de la FTM de SPOT sur son orbite en fonction de la fréquence de variation du paysage, ce qui est prévu dans l'avenir.

Contrairement aux méthodes de filtrage qui réduisent le contenu en information d'une image, la correction de la FTM du capteur permet de restituer les valeurs radiométriques qui correspondent aux différents objets visés tout en faisant ressortir les limites de parcelles et la texture à l'intérieur de celles-ci. Il faut cependant remarquer que les valeurs radiométriques restituées sont celles qui parviennent au satellite hors de l'atmosphère. La détermination des réflectances au niveau du sol nécessite donc que la correction de FTM soit suivie de la correction des effets atmosphériques.

BIBLIOGRAPHIE

1. Gu X.F., Guyot G., Verbrugghe M., 1990; Analyse de la variabilité spatiale d'un site test - Exemple de la Crau (France). *Photo-Interprétation*: 90-1 (5): 39-52.
2. Gu X.F., Guyot G., Verbrugghe M., 1991; Utilisation de l'opération ART*SPOT pour tester le modèle 5S et la FTM du satellite SPOT; In *Cinquième Coll. Int. Mesures Physiques et Signatures en Télédétection*, 14-18 Jan. 1991, Courchevel (France) Ed. ESA Publ. Div. (sous presse).
3. Leroy M., 1990; Modèles des systèmes de mesure imageurs optiques. In *Ecole d'Eté en Télédétection Spatiale: Aspects Physiques et Modélisation*, Août 1988, CEPADUES Ed. (France): 311-363.
4. Schowengerdt R.A., Archwamety C., Wrigley R.C., 1985; Landsat Thematic Mapper image-derived MTF. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 51: 1395-1406.
5. SPOT IMAGE, 1986; Guide des utilisateurs de données SPOT: SI/GP/86.0005 f, Annexe 02, pages 32-33.
6. Tanré D., Deroo C., Herman M., Morcrette J.J., Perbos J., Deschamps P.Y., 1986; Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum. *User's guide*, LOA Lille: 264p.
7. Tanré D., Herman M., Deschamps P.Y., de Lefte A., 1979; Atmospheric modeling for space measurements of ground reflectances, including bidirectional properties. *Applied Optics* 18: 3587-3594.

II - ETALONNAGE DU CAPTEUR HRV DE SPOT1

Article 5

"SPOT calibration on the test site "La Crau" (France)"

(soumis à Remote Sensing of Environnement)

SPOT CALIBRATION ON THE TEST SITE "LA CRAU" (FRANCE)

R.Santer*, X.F. Gu**, G.Guyot**, J.L. Deuzé*, C. Devaux*,
E. Vermote*, M. Verbrugge**,

(*) L.O.A. Université de Lille I, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex (France)

(**) INRA Bioclimatologie, BP 91, 84143 Montfavet Cedex (France)

ABSTRACT

In-flight calibrations of SPOT1 were performed in 1989 using a French site located in La Crau (S-E of France). A full description of the procedure is presented which includes both the characterization of the ground and of the atmosphere. To predict the radiance at the satellite level, we take into account the non-lambertian properties of the test site and the surround contribution. A detailed error budget is carefully conducted; the overall error of the method is around $\pm 3\%$. The three calibrations performed are self consistent and are in close agreement with calibration data obtained by CNES for B2 and B3. A discrepancy of 8% is observed for B1 and its origin is under study.

Key Words: Calibration, Satellite, SPOT

I INTRODUCTION

In France, the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) is highly concerned by the calibration of HRV cameras aboard SPOT. From the preflight calibration (Begni et al., 1985), two internal calibration devices (Dingirard and Maisoneuve, 1980), using respectively the Sun and a lamp as light sources, can be used to follow the sensitivity loss of the system. Moreover, an in-flight calibration is conducted by Slater et al. (1987) all over the life time of SPOT1. The used method combines the measurement of the reflectance of a test site (White Sands in New Mexico or Edward Base in California) with the characterization of the atmosphere at the time of the satellite overpass. Using an atmospheric transfer code, the incoming radiance at the sensor is predicted and compared to digital counts registered over the test site.

For different reasons, CNES wished to develop an alternative calibration site in Europe. A previous investigation was divided into two successive steps. From a first study performed on satellite data, several potential sites over Europe and North Africa were compared (Rouquet, 1985) and La Crau was selected. Then ground-based and airborne reflectance measurements of La Crau enabled to define the position of the test site and to characterize its bidirectional properties and its spatial and temporal variabilities (Gu et al., 1990).

The aim of this paper is to present the results of the last step of the analysis and the results of two SPOT calibration campaigns conducted in 1989 in order to validate the used methodologies.

II GROUND REFLECTANCE MEASUREMENTS

The calibration site, a 400x400 m square area, is located in the centre of "La Crau Seche", a 60km² flat area of pebbles at about 50km North-West of Marseille. A detailed description of the measurement procedure is reported by Gu et al. (1990). SPOT simulation radiometers simultaneously measure the reflected radiance and the incident irradiance in the SPOT channels. The ground reflectance is obtained by ratioing the two measurements and a calibration is done, using a halon panel. Departures from the cosine law of the irradiance head and of the reflectance panel have been measured and the corresponding corrections are introduced in the data reduction. The analysis of the sampling variance of the 400x400m test site enabled to define the number of measurements which are necessary for obtaining a given accuracy (Dagnelie, 1970). With 200 samples (0.6m diameter) the error on the ground reflectance is lower than $\pm 2\%$ for SPOT Channels 1 (B1) and 2 (B2) and lower than $\pm 1\%$ for channel 3 (B3) (Gu et al., 1990). For the direct-direct path, nadir reflectance measurements were performed at the time of satellite overpass (within ± 30 minutes). For SPOT off-nadir viewing a correction was applied using a set of bidirectional measurements. As these

measurements are performed with a mobile boom and are time consuming, they are restricted to few samples. In order to reduce the error, due to the view angle correction, the future ground-level reflectance measurements will be performed using a new support enabling to measure the ground radiance with the same geometry as SPOT (Guyot et al., 1989; Gu et al., 1991)

Two measurement campaigns were performed in March and June 1989. On March 22, the geometrical conditions were suitable for an intercalibration between NOAA-11 AVHRR, LANDSAT5 TM and SPOT1 (Gu et al., 1991). Then this day was selected for the measurements. In June all the SPOT available windows were recorded and two dates were used in regard with the atmospheric conditions.

Table 1 gives the geometrical conditions of the observations. Table 2 reports, for each date, the number of samples, the mean value of the reflectance measured in SPOT channels and their standard deviations. It must be pointed out that the number of measurements is limited and the accuracy of the reflectance estimate is reduced as compared to an ideal figure of 400 samples allowing an accuracy better than $\pm 1\%$ (Gu et al., 1990). For these measurements only one radiometer was available and 100 measurements required about one hour. Moreover, on June 7, cloudy conditions before SPOT overpass reduced this number.

Table 1: Geometric conditions of the SPOT observations (θ : zenith angle; ϕ : azimuth angle; s : sun angle; v : view angle).

| Date | Time of overpass (U.T.) | θ_s (°) | ϕ_s (°) | θ_v (°) | ϕ_v (°) |
|-------|-------------------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 22-03 | 10.42 | 45.9 | 156.6 | 2.7 | 99 |
| 07-06 | 11.01 | 22.4 | 156.4 | 25.5 | 279 |
| 13-06 | 10.46 | 33.8 | 155.8 | 3.7 | 99 |

Table 2: Mean reflectances (ρ) of la Crau in the 3 SPOT-HRV bands and their standard deviations (σ). The number of measurements is indicated between brackets under the date.

| Date | Parameters | B1 | B2 | B3 |
|----------------|------------|------|------|------|
| 22-03 (106) | ρ | 12.3 | 17.7 | 29.8 |
| | σ | 1.3 | 1.8 | 1.6 |
| 07-06 (56) | ρ | 14.2 | 19.8 | 27.7 |
| | σ | 1.1 | 1.4 | 1.4 |
| 13-06 (108) | ρ | 16.0 | 22.2 | 30.0 |
| | σ | 1.1 | 1.3 | 1.1 |

III ATMOSPHERIC MEASUREMENTS

In order to apply the atmospheric corrections, it is necessary to characterize the aerosols and also the amount of gazes which absorb the light in the SPOT bands. These atmospheric characteristics are determined from passive optical measurements. On the other hand the Rayleigh scattering is deduced from barometric pressure.

3.1. Description of the measurements

Different radiometers measure the extinction of the solar beam in the range 0.45 to 2.2 μm . A single wavelength radiometer, referred as ETAL, (at 450nm) was calibrated on the extra terrestrial irradiance during stratospheric flights. From the gondola of the stratospheric balloon, the ETAL radiometer is aimed in direction of the sun and when the altitude is higher than 25 km, the atmospheric attenuation of the solar beam is quite negligible. The other radiometers are cross-calibrated directly in the blue band. For the other channels, the calibration is initialized using the classical Langley-Bouguer plotting with a linear regression on the logarithm of the radiometer output voltage $V(\lambda)$ and the air mass M .

$$\text{Log } V(\lambda) = \text{Log } V_s(\lambda) - \delta(\lambda).M \quad (1)$$

Equation (1) provides the intercept $V_s(\lambda)$ and the slope $\delta(\lambda)$. It is well known that the stability of the atmosphere, required for this method, is a first approximation. The suggested improvement consists in monitoring the instantaneous variation of the optical

thickness $\delta_a(t)$ from the Langley plot with the assumption that it is mainly due to variations of the amount of aerosols, supposed to be stable in nature. We get then:

$$\frac{\Delta\delta_a(t,\lambda)}{\delta_a(\lambda)} = \frac{\Delta\delta_a(t, 450\text{nm})}{\delta_a(450\text{nm})} \quad (2)$$

The mean value of δ_a at λ and 450nm are derived from the Langley linear regression after removing the Rayleigh contribution. The instantaneous variations of the aerosol optical thickness at 450nm is measured by the calibrated radiometer ETAL. Then the plotting $\text{Log } V(\lambda) + \Delta\delta_a(t,\lambda).M$ gives a better estimates of $V_s(\lambda)$ and of $\delta_a(\lambda)$.

Aureole measurements are also performed at $\lambda = 850\text{nm}$. The radiometer with 1° field of view is initially aiming the Sun. Then a small rotation in azimuth allows to collect measurements in the range of the scattering angle, between 2° and 30° . The diffuse radiance is quite proportional to the aerosol phase function. This first estimate allows to correct for the signal due to the multiple scattering, using a simple iterative method proposed by Weinman et al. (1975).

The last measurements consist of scans in the principal plane of the radiance and of the polarization ratio. The photopolarimeter described by Herman et al. (1986), has two bands at 850 and 1650 nm in order to minimize the Rayleigh scattering contribution.

3.2. Aerosol characterization

We have then a complete set of measurements devoted to the aerosol characterization. The aerosols thicknesses are the fundamental parameters quite directly produced by the extinction measurements. We are not concerned by the actual complexity of the aerosols, both in their composition and their vertical distribution. We just need a convenient description of the medium which allows to retrieve the optical properties, in order to apply the atmospheric corrections. The used aerosol model corresponds to a "modified" Junge size distribution with:

$$\begin{aligned} n(r) &= C.r_0^\nu & \text{if } r \leq r_0 \\ n(r) &= C.r^\nu & \text{if } r \geq r_0 \end{aligned} \quad (3)$$

and a particle refractive index ($m - ik$), independant of the size.

It is then necessary to define our strategy concerning the inversion. As demonstrated by Santer (1984) the inversion of the polarization and of the radiance at two wavelengths allows to retrieve the main optical properties of the medium. The inversion is conducted as follow: first we use a simple but accurate approximate of the signal (Deuzé et al., 1987), which includes the Rayleigh scattering, the multiple scattering and a boundary

condition, corresponding to a lambertian reflector. Then, for a given refractive index m and a set of r_0 values, we adjust the polarization ratio at 1650nm. Finally the 850nm retrieval provides a unique solution (r_0, ν) .

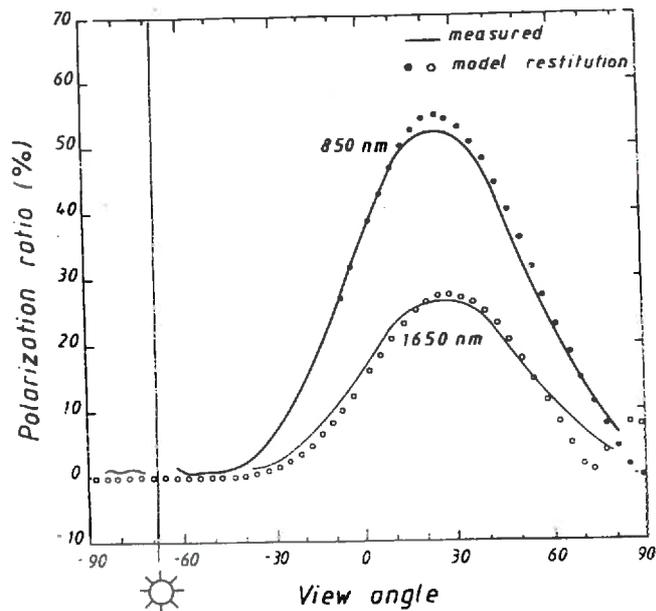


Figure 1: Measured polarization ratio compared to the restitution with an aerosol model defined by $r_0 = 0.15 \mu\text{m}$, $\nu = -3.7$, $m = 1.50$ and $\delta_a^{850} = 0.056$. The measurements were performed with a low sun at 6 am on June 7th, 1989.

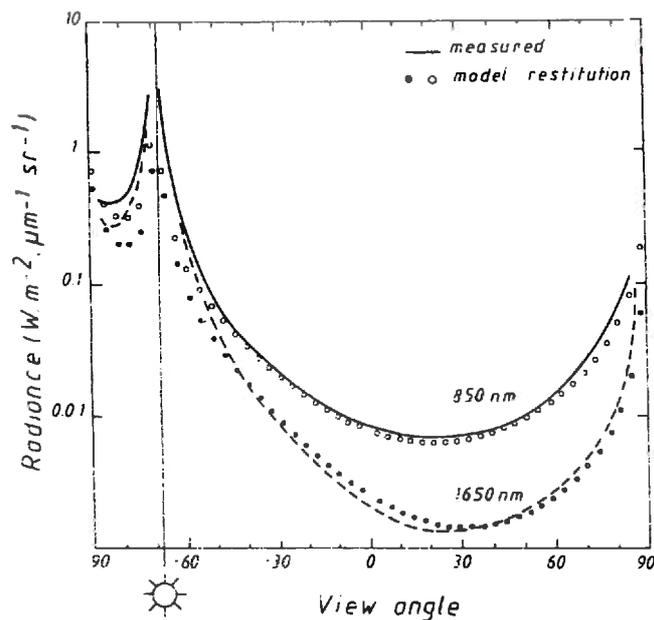


Figure 2: Measured radiance compared to the restitution with an aerosol model defined by $r_0 = 0.15 \mu\text{m}$, $\nu = -3.7$, $m = 1.50$ and $\delta_a^{850} = 0.056$. The measurements were performed with a low sun at 6 am on June 7th, 1989.

As an example we give the restitution of polarization measurements (figure 1) and of the radiance (figure 2) performed on June 7th, around 6.00 am, when the sun was low.

The restitution of the polarization can be achieved unregardless of the particle refractive index. To retrieve the polarization ratio around $\theta = 100^\circ$, we just need larger particles when the refractive index decreases. Conversely the aureole measurements are not sensitive to the refractive index (major contribution of the diffraction) but highly dependant upon the particle size. The complementarity between polarization and aureole measurements is illustrated in figure 3 where a typical value of $m = 1.50$, characteristic of continental materials, appears to be suitable.

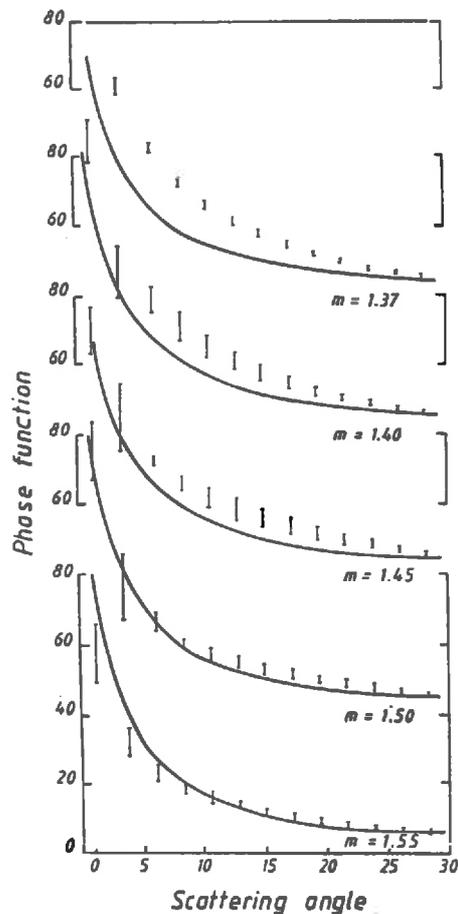


Figure 3: Restitution of the aureole measurements for June 7th. Aureole measurements are converted into phase function (continuous line) and compared to phase function computed for models deduced from the inversion of the polarization at different refractive indices. Error bars result from unaccuracies introduced in the measurements. The computations are normalized at $\theta = 30^\circ$ and the increase of the error bars in the forward scattering is a direct consequence.

3.3. Gaseous contents

The ozone amount is derived from the seasonal values. For the vapor content, two weather stations bounded the site. We got from Marignane (located at 10km S-E of the site) temperature and relative humidity from which we derived the water vapour density at ground level. We also have from Nimes (40km N-W) radiosondages at 0 am and 12 am. The integrated water vapour content on the site, at the time of SPOT overpass, is the result of spatio-temporal interpolations between the two data sets.

As a matter of fact, the ground based station is able to control these informations. The extinction measurements include the Chapuis band and the model of aerosols is well defined enough to predict their contribution in this band from outside measurements (Biggar et al., 1990). In the same way, a differential technique (Frouin and Gauthier, 1987) associates a broad and a narrow filters in the water vapor band at 950nm to derive the integrated amount (table 3).

Table 3: Atmospheric water content and ozone concentration for thr 3 days of measurements.

| Date | U_{H_2O} (g.cm ⁻²) | U_{O_3} (cm.atm) |
|-------|----------------------------------|--------------------|
| 22-03 | 1.83 | 0.390 |
| 07-06 | 1.27 | 0.383 |
| 13-06 | 1.27 | 0.388 |

3.4. Results

Table 4 gives, for three days of measurements, the aerosol optical thickness as measured in the SPOT bands; the two flexible parameters (r_0, ν) of the Junge size distribution, are derived from the polarization measurements and the refractive index is the result of the aureole retrieval for March 22nd and June 7th. For June 13th, the characterization of the aerosols was only done by extinction measurements with a portable sun-radiometer working between 0.45 and 0.85 μm . The slope of the Junge size distribution follows the spectral dependance of $\delta_a(\lambda)$ while the refractive index value is reconducted.

Table 4: Aerosol characteristics

| Date | Optical thickness | | | Size distribution | | Refraction index |
|-------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------|------------------|
| | B1 | B2 | B3 | r_0 | ν | m |
| 22-03 | 0.049 | 0.042 | 0.032 | 0.10 | -4.0 | 1.50 |
| 07-06 | 0.072 | 0.065 | 0.056 | 0.15 | -3.7 | 1.50 |
| 13-06 | 0.334 | 0.285 | 0.218 | 0.10 | -4.0 | 1.50 |

We have to point out that the aerosol model is close to the standard continental model (Deirmendjian, 1964) defined with $r_0 = 0.1\mu\text{m}$, $\nu = -4$, $m = 1.50$. The extremely good visibilities observed on March 22nd and June 7th correspond to a Mistral regime, the continental dry wind which blows in the Rhone valley.

IV COMPUTATION OF THE SIGNAL

4.1. Standard computation

To express the apparent reflectance ρ_i^* in the channel i , we decouple absorption and scattering with:

$$\rho_i^* = T_g^i \cdot \rho_i^0 \quad (4)$$

The gaseous transmittance T_g^i is computed using the "5S" code (Tanré et al., 1990). The spectral response of the SPOT internal filters R_λ^i are provided by CNES and the other inputs are the integrated values both for ozone and water vapour. The reflectance ρ_i^0 corresponds to the reflectance observed over a lambertian reflector ρ_g for a non absorbing atmosphere. The computation is achieved using the method of successive orders of scattering (Deuzé et al., 1989). The inputs are the inverted aerosol model (r_0 , ν , m , δ_a^i), mixed with the Rayleigh scattering, assuming a scale length of 2km for the aerosols and the ground reflectance ρ_g .

The computation is monochromatic and the Rayleigh and aerosol optical thickness have been integrated over the filter response.

$$\delta = \frac{\int_0^\infty E_s(\lambda) \cdot R_\lambda^i \cdot d(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty E_s^\lambda \cdot R_\lambda^i \cdot d\lambda} \quad (5)$$

with:

- R_λ^i : spectral responsivity of the sensor;

- E_s^λ : equivalent solar irradiance;

The spectral dependance of δ is in λ^{-4} for the rayleigh and in $\lambda^{-\alpha}$ for the aerosols where the Angström coefficient α is derived from the measurements.

This basic version of the resolution of the transfer equation in a plane-parallel atmosphere, does not take into account the actual non lambertian properties of the surface and the non spectral homogeneity of the target.

4.2. Departures from the lambertian approximation

The bidirectional properties of La Crau have been measured by Gu et al. (1990). For example, during summer, at the SPOT overpass time, the reflectance decreases of about 10% in the specular direction to increase of 20% in the hot spot.

The successive order transfer code is based on a Fourier series decomposition of the signal and a suitable expansion of the boundary condition is:

$$\rho(\mu_v, \mu_s, \phi_v - \phi_s) = \sum_{s=0}^4 \rho^s(\mu_v, \mu_s) \cdot \cos s(\phi_v - \phi_s) \quad (6)$$

with $\mu = \cos\theta$

Since the surface reflection is quite isotropic, the Fourier series expansion is restricted to five terms. The components $\rho^s(\mu_v, \mu_s)$ are computed in a polynomial form for a complete set of bidirectional measurements at different solar elevations. The principle of reciprocity is used to double the available points. Figure 4 reports the relative error on ρ_1^0 if we neglect the bidirectionality of the reflectance. These computations, versus the view angle θ_v , are done for 3 solar zenith angles 30°, 50°, 60° for $\phi_v - \phi_s = 50^\circ$ which closely corresponds to the SPOT azimuth angle (see table 1).

The errors depends slightly upon the viewing angles and decrease with the wavelength with the decreasing atmospheric effects. Since they can be as high as 3%, the bidirectional effects have to be included in the calibration process. Fortunately the properties of the ground are quite stable with time, mainly in their angular distribution. We can then add extensive precollected data to the measurements done the day of a SPOT calibration.

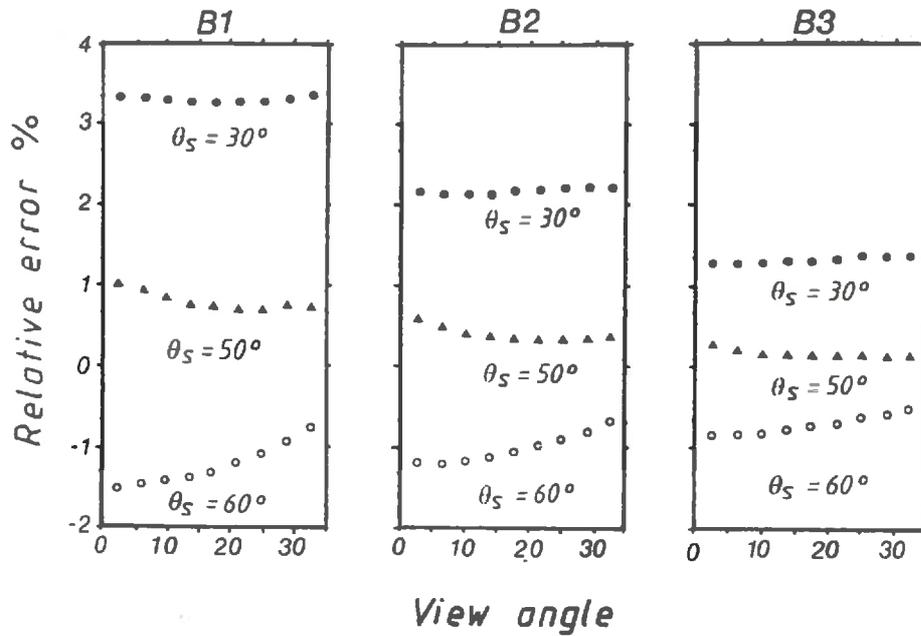


Figure 4: Relative difference between a lambertian target and la Crau in the vertical plan, perpendicular to the sun azimuth. The continental aerosol model is used with a visibility of 50km. The simulations correspond for each SPOT bands to 3 sun zenith angles.

4.3. Effect of the environment

La Crau is reduced in size (about 10km diameter); the contribution of the surround may then have a significant contribution. A simple case is proposed for computation in 5S: an homogeneous disk surrounded by an homogeneous ground. An immediate modification can be done by dividing the surround into elementary coronets. Figure 5 gives the digital counts average for coronets 200m thick as measured by SPOT in the three bands. As reported in annexe, from the contrast on the digital counts between the target and its environment, and for a given atmosphere, we can derive the environment effect. For example, for a visibility of 50km with continental aerosols and a solar zenith angle of 30° , the environment, as shown in figure 5, decreases the reflectance by 2% in B1, 1.7% in B2 and 0.4% in B3, compared to a spatially uniform ground. Again it appears necessary to include this effect in a calibration procedure.

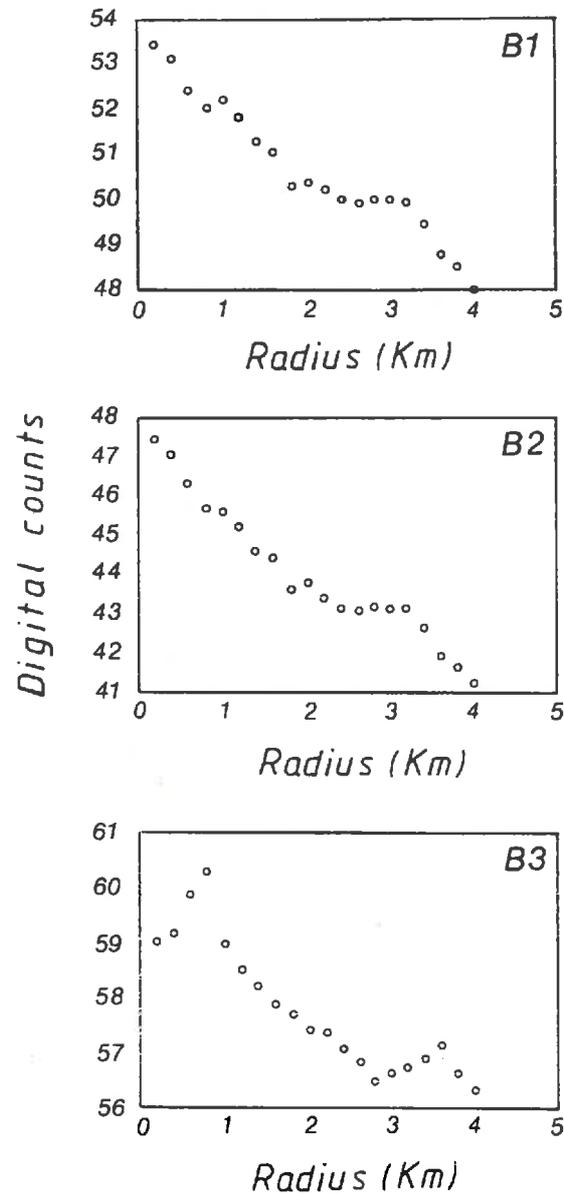


Figure 5: Variation of the mean digital counts of the SPOT image, as a function of the diameter of the circle centered on the test site, for the 3 SPOT channels.

V CALIBRATION AND RELATED ERRORS

5.1. Calibration coefficients

The incoming parameter at the sensor is the integrated radiance

$$L_i = \int_0^{\infty} R_i^\lambda \cdot L_\lambda \cdot d\lambda \quad (\text{w.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}) \quad (7)$$

with L_λ : monochromatic radiance at the sensor.

Generally, in order to be independant of the absolute amplitude of the spectral response, the integrated radiance L_i is transformed into an equivalent radiance L_i^e :

$$L_i^e = \frac{L_i}{\int_0^{\infty} R_{\lambda}^i \cdot d\lambda} \quad (8)$$

The offset is removed by CNES; since the detection is linear, the calibration equation is:

$$DC_i = A_i \cdot L_i^e \quad (9)$$

$$\text{or } DC_i = A_i \cdot 1.3^{(m_i-3)} \cdot L_i^e \quad (10)$$

DC_i being the digital count and m_i the gain of the HRV instrument for the channel i .

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 96 | 91 | 92 | 96 | 95 | 97 | 95 | 92 | 93 | 94 | 93 | 95 | 95 | 98 | 96 | 97 | 96 | 97 | 94 | 91 |
| 95 | 95 | 94 | 92 | 95 | 94 | 94 | 94 | 96 | 95 | 97 | 95 | 95 | 96 | 97 | 91 | 88 | 92 | 91 | 91 |
| 91 | 93 | 94 | 95 | 95 | 96 | 95 | 97 | 97 | 95 | 97 | 96 | 93 | 91 | 91 | 93 | 91 | 90 | 92 | 94 |
| 94 | 95 | 96 | 96 | 97 | 96 | 97 | 95 | 95 | 95 | 90 | 93 | 94 | 92 | 93 | 92 | 94 | 97 | 97 | 97 |
| 98 | 99 | 98 | 98 | 97 | 94 | 95 | 92 | 94 | 95 | 96 | 95 | 93 | 95 | 97 | 96 | 96 | 97 | 98 | 96 |
| 97 | 96 | 94 | 94 | 93 | 95 | 97 | 97 | 97 | 96 | 95 | 98 | 97 | 96 | 95 | 98 | 94 | 95 | 95 | 95 |
| 93 | 94 | 95 | 95 | 98 | 97 | 96 | 96 | 97 | 96 | 95 | 97 | 97 | 94 | 93 | 94 | 95 | 95 | 93 | 93 |
| 93 | 95 | 95 | 96 | 97 | 97 | 94 | 95 | 95 | 97 | 94 | 95 | 93 | 97 | 95 | 95 | 97 | 95 | 97 | 96 |
| 97 | 96 | 95 | 95 | 96 | 97 | 95 | 95 | 95 | 96 | 95 | 95 | 93 | 95 | 97 | 94 | 99 | 97 | 96 | 97 |
| 99 | 97 | 97 | 95 | 97 | 98 | 95 | 93 | 92 | 92 | 95 | 96 | 95 | 95 | 97 | 94 | 99 | 97 | 96 | 97 |
| 95 | 97 | 98 | 96 | 94 | 92 | 94 | 98 | 96 | 92 | 97 | 99 | 93 | 93 | 95 | 98 | 98 | 97 | 96 | 99 |
| 96 | 95 | 95 | 97 | 98 | 95 | 95 | 98 | 99 | 94 | 90 | 95 | 96 | 98 | 96 | 98 | 98 | 95 | 95 | 95 |
| 97 | 97 | 95 | 95 | 96 | 96 | 95 | 94 | 99 | 98 | 99 | 97 | 97 | 96 | 93 | 97 | 96 | 94 | 94 | 94 |
| 95 | 94 | 96 | 96 | 97 | 99 | 99 | 99 | 98 | 95 | 95 | 95 | 97 | 95 | 95 | 95 | 94 | 95 | 96 | 99 |
| 97 | 99 | 97 | 93 | 92 | 95 | 94 | 95 | 94 | 95 | 95 | 95 | 97 | 95 | 95 | 95 | 97 | 98 | 97 | 95 |
| 91 | 92 | 95 | 96 | 94 | 93 | 94 | 93 | 95 | 96 | 93 | 93 | 95 | 96 | 97 | 96 | 93 | 91 | 92 | 94 |
| 94 | 93 | 94 | 92 | 95 | 95 | 95 | 93 | 93 | 95 | 95 | 96 | 96 | 94 | 92 | 93 | 92 | 94 | 92 | 92 |

Figure 6: Spatial distributions over the test site of SPOT-HRV digital counts for band 2 on June 7th, 1989.

The digital count corresponds here at the average value for the 20x20 pixels of the test site reported in table 5 and the variability of which is illustrated in figure 6. The transfer code produces the apparent reflectance ρ_i^* related to L_i^e by:

$$L_i^e = \mu_s \cdot E_s^i \cdot \rho_i^* / \pi \cdot d^2 \quad (11)$$

where E_s^i is the equivalent solar irradiance and d the Earth-Sun distance (expressed in u.a.).

Table 5: Digital counts observed for the three SPOT bands

| Date | Parameters | B1 | B2 | B3 |
|-------|--------------------|------|-------|------|
| 22-03 | Mean | 67.7 | 66.6 | 61.9 |
| | Minimum | 59 | 58 | 58 |
| | Maximum | 73 | 72 | 65 |
| | Standard deviation | 2.1 | 2.1 | 1.1 |
| 07-06 | Mean | 88.8 | 95.2 | 75.9 |
| | Minimum | 82 | 88 | 73 |
| | Maximum | 94 | 99 | 78 |
| | Standard deviation | 1.9 | 2.0 | 1.0 |
| 13-06 | Mean | 93.1 | 100.5 | 77.4 |
| | Minimum | 88 | 94 | 75 |
| | Maximum | 97 | 105 | 80 |
| | Standard deviation | 1.6 | 1.9 | 0.9 |

The flow chart reported in figure 7 illustrates the all calibration procedure. Ignoring the gaseous transmission, the apparent reflectance is computed with the optical parameters as first inputs. The boundary conditions correspond, for the direct to direct path, to the measured average values of the reflectances on the calibration site and, for the other terms, to an up-date experimental description of the bidirectional function expended in a Fourier series. The gaseous transmission is computed separately using the "5S" code to ponderate the former result. The apparent reflectance is transformed into radiance. On the other hand, since the evolution of the environment effect is achieved on the digital counts, we deconvolute the average value of the test site instead of correcting this surround effect on the predicted value of the outgoing radiance.

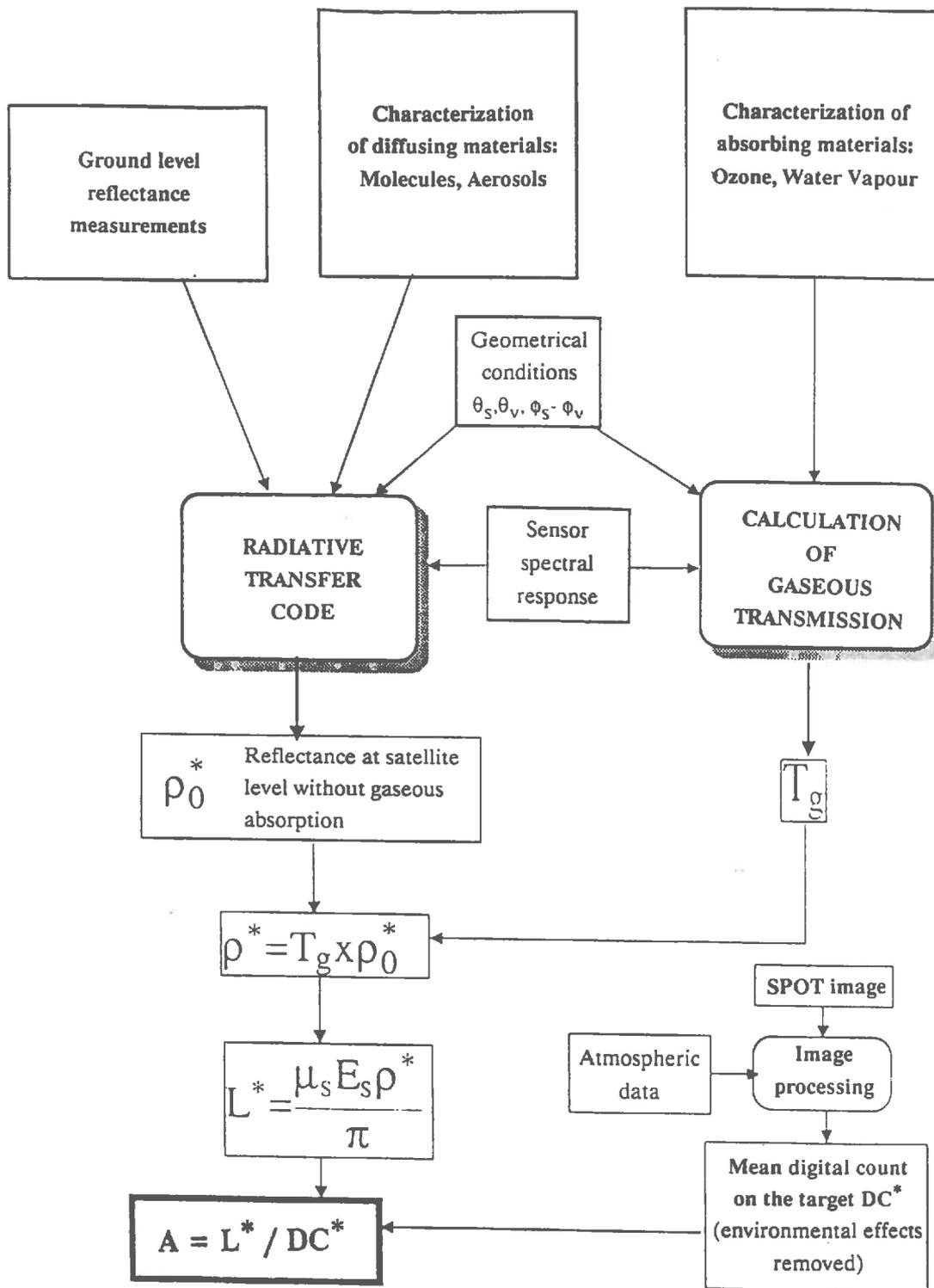


Figure 7: Flow chart representing the calibration procedure.

For the three dates, the calibration coefficients are reported in table 6. We also reported the coefficients proposed by CNES (Dinguirard and Briottet, 1989) and also the relative difference between the two sets. For B2 and B3, the agreement is quite good and

obviously within the error domains. The large discrepancies in B1 are under investigation. One explanation lies in a possible yellowing of the lamp used for SPOT internal calibration.

Table 6: Comparison of SPOT1-HRV2 calibration coefficients determined from La Crau and from the internal calibration (CNES).

| Date | Origin | B1 | B2 | B3 |
|-------|--------------|-------|-------|-------|
| 22-03 | Crau | 0.518 | 0.376 | 0.555 |
| | CNES | 0.469 | 0.381 | 0.567 |
| | Difference % | +10.4 | -1.3 | -2.3 |
| 07-06 | Crau | 0.505 | 0.391 | 0.562 |
| | CNES | 0.466 | 0.380 | 0.567 |
| | Difference % | +8.4 | +2.9 | -0.9 |
| 13-06 | Crau | 0.495 | 0.389 | 0.561 |
| | CNES | 0.466 | 0.380 | 0.567 |
| | Difference % | +6.2 | +2.4 | -1.1 |

5.2. Error budget

Table 7 gives a detailed error budget for June 7th. For the spectral response we assume that the shift of the interferential filters, due to vacuum effect, has been controlled by Matra Company at ground level with twin filters. The uncertainties on R_{λ}^i correspond to CNES specifications. The impacts of R_{λ}^i inaccuracies are on the determination of E_s^i and on the computation of the signal (mainly on the gaseous transmission). The instrumental noises are proportional to μ_s . The errors on the reflectance of the ground are computed following Gu et al. (1990), taking into account the actual number of samples. The apparent contribution of the surface is weighted by the atmospheric transmittances which reduce, in the same way, the error in the ground contribution estimation. As expected, the errors on the gaseous content are more effective in B1 for O_3 and B3 for H_2O . The uncertainties on the barometric pressure (δh_p) have been introduced for the Rayleigh scattering. For the aerosols, the error budget is more complex, resulting of the impacts of measurement errors on the optical thickness, on the polarization ratio and on the aureole measurements. Moreover, since our inversion scheme is not sensitive to imaginary part of the refractive index, we introduced this parameter as arbitrary defined in the range $0.5 \cdot 10^{-3}$. The transformation of the reflectance into radiance is affected by uncertainties on θ_s and E_s^i with its natural variation (within 0.2%), plus a systematic bias of 1% depending on the data source. At

last we saw how to correct for the environment effects and a residual unaccuracy appears.

Table 7: Detailed error budget for June 7th.

| Origin | Relative error (%) | | |
|------------------------------|--------------------|------|------|
| | B1 | B2 | B3 |
| Spectral response | 0.60 | 0.90 | 0.60 |
| Instrumental noise | 1.60 | 1.45 | 1.05 |
| Apparent refl. of the target | 1.95 | 1.97 | 1.60 |
| Water vapour | 0.30 | 0.31 | 0.52 |
| Ozone | 0.58 | 0.47 | 0.00 |
| Molecules | 0.12 | 0.05 | 0.01 |
| Aerosols | 0.61 | 0.48 | 0.36 |
| E_s variation | 0.20 | 0.20 | 0.20 |
| E_s determination | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Sun zenith angle | 0.14 | 0.14 | 0.14 |
| Surround effect | 0.50 | 0.50 | 0.10 |

Finally, table 8 gives, for the three days, the errors as a quadratic sum. The errors are of the order of 3% except on June 13th because the visibility was low. More over, the atmospheric measurements were reduced to visible extinction measurements and the error budget was adapted consequently.

Table 8: Relative error (%) on calibration coefficients.

| Date | B1 | B2 | B3 |
|-------|-----|-----|-----|
| 22-03 | 3.2 | 3.1 | 2.0 |
| 07-06 | 3.0 | 3.0 | 2.4 |
| 13-06 | 6.3 | 4.4 | 5.0 |

VI CONCLUSIONS

The case of La Crau as a calibration site for SPOT has been demonstrated and should be undergo on a routine basis at a biannual rate. For further campaigns some improvements are planned. The number of samples of the target reflectance will be increased by using a second radiometer. Moreover, the radiometers will be tilted in the

SPOT viewing direction and measurements will be performed in the adequate azimuthal plane. For atmospheric measurements, global and diffuse measurements are planned in order to control the absorption of the aerosols.

The 1991 campaign in La Crau will be integrated in the European NASA ER2 campaign with a special attention paid to intercalibration with AVIRIS, the JPL spectro-imager, and with POLDER, a photopolarimetric camera developed at Lille. For more general purposes, the annex provide the suitable tool to introduce the surround effect from the image content.

Acknowledgement

This study was supported by the Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) under contract n° 833/89/5935/00. We thank M. Herman (LOA) and M. Leroy (CNES) for helpful discussions.

ANNEXE

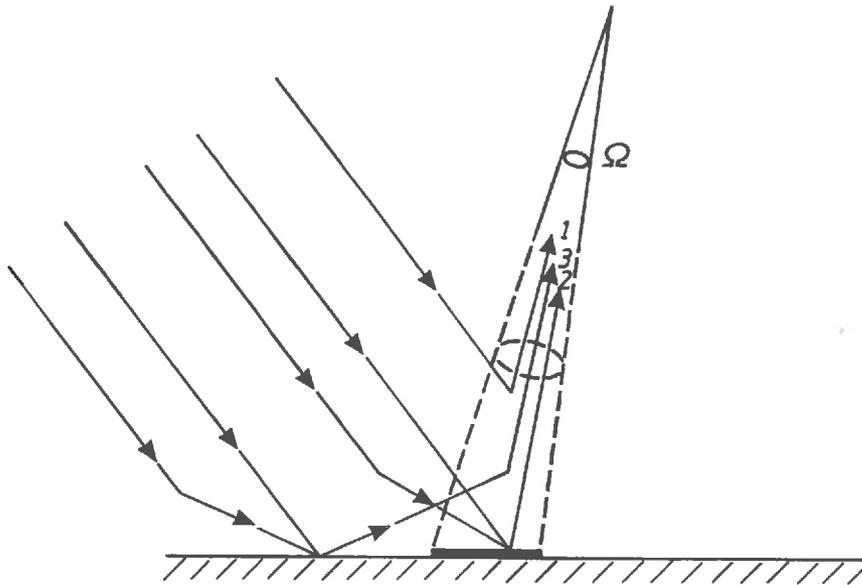


Figure 8: Schematic representation of the different contributors to the upward reflectance.

Figure 8 depicts, as proposed by Tanré et al. (1990), the different contributors to the upward reflectance:

1. ρ_a is the atmospheric path radiance;
2. the contribution of the pixel of reflectance ρ is:

$$T(\mu_s) \cdot \rho \cdot e^{-\delta/\mu_v} \quad (12)$$

where $T(\mu_s)$ is the total transmittance (i.e. the downward global irradiance divided by the solar incident flux) and where $e^{-\delta/\mu_v}$ describes the attenuation on the direct atmospheric path.

3. The surround can be viewed diffusely and its contribution expressed as:

$$T(\mu_s) \cdot \langle \rho \rangle \cdot t_d(\mu_v) \quad (13)$$

where t_d is the diffuse transmittance and where $\langle \rho \rangle$ is the mean reflectance of the environment, expressed as:

$$\langle \rho \rangle = \int_0^{\pi} \rho(r) \cdot f(r) \cdot dr \quad (14)$$

The environment function $f(r)$ describes the probability for a photon reflected by the ground at a distance r from the target center to be scattered within the solid angle Ω .

Finally, the sum of the contributions gives:

$$\rho_i^0 = \rho_a + \frac{T(\mu_s)(\rho \cdot e^{-\delta/\mu_v} + \langle \rho \rangle t_d(\mu_v))}{1 - \langle \rho \rangle s} \quad (15)$$

where the multiple interactions between the ground and the atmosphere, introduced in the denominator, involved the spherical albedo s . We have to point out that equation (14) corresponds to a nadir observation. According to Tanré et al. (1990) this formulation is still valid up to a view angle of 30° which is suitable for SPOT observations. The atmospheric functions ρ_a , T , t_d , s are computed using the successive orders of scattering method for the relevant inputs.

The in situ measurements are restricted to the calibration site. The computation of the environment effect is then based on the contrast

$$C(r) = DC(r)/DC(o) \quad (16)$$

between the digital counts observed at a distance r of the target and for the target. From equations (14) to (16), it can be demonstrated that:

$$\langle \rho \rangle = \frac{\rho_a \cdot (P-1) + P \cdot \rho \cdot T(\mu_s) \cdot e^{-\delta/\mu_v}}{s \cdot \rho_a \cdot (P-1) + T(\mu_s)(T(\mu_v) - P \cdot t_d(\mu_v))} \quad (17)$$

$$\text{Where } P = \int_0^\infty f(r) \cdot C(r) \cdot dr \quad (18)$$

REFERENCES

- Begni G., 1985; The radiometric calibration of the SPOT HRV sensors. *Acta Polytechnica Scandinavia* Ed. T. Friberg and Pirkko Oittinen. *Proc. Image Science*, 2:10-11.
- Biggar S.F., Santer R.P., Slater P.N., 1990; Irradiance-based calibration of imaging sensors. *Proc. IGARSS 90, Washigton DC, May 1990* (in press)
- Dagnelie P., 1970; Théorie et méthodes statistiques vol 2. *Les Presses Agronomiques de Gembloux, A.S.B.S.L.*, Ed. J. Duclot S.A., Gembloux (Belgium): 451p.
- Deirmendjian D., 1964; Scattering and polarization properties of water clouds and hazes in the visible and inrfared. *Appl. Opt.*, 3 : 187-196
- Deuzé J.L., 1987; Modélisation de l'état de polarisation du rayonnement atmosphérique ascendant. Partie 1 Atmosphère limitée par un sol lambertien. Rapport contrat CNES
- Deuzé J.L. et al. 1989; Fourier series expansion of the transfer equation in the atmosphere-ocean system. *J. Quant. Spectrosc. Transfer*, 41 : 483-494
- Dinguirard M., Briottet X., 1989; Bilan d'étalonnage absolu SPOT1. Troisième bilan semestriel. *Rapport CNES S-NT-OB1-561-CN*
- Dinguirard M., Maisoneuve J.M., 1980; Description du dispositif d'étalonnage absolu de la caméra HRV. *Rapport CNES Toulouse (France) S-NT-OB1-0090-CN.*
- Frouin R., Gautier C., 1987; Calibration and NOAA-7 AVHRR, GOES-5, and GOES-6 VISSR/VAS solar channels. *Remote Sens. Environ.* 22 : 73-101
- Gu X.F., Guyot G., Verbrughe M., 1990; Analyse de la variabilité spatiale d'un site test - Exemple de la Crau (France). *Photo-Interprétation*: 90-1 (5) : 39-52
- Guyot G., Gu X.F., Verbrughe M., 1989; Caractérisation des propriétés optiques du site de la Crau. *Rapport final contrat 833/CNES/87/4891/00*, INRA Bioclimatologie, Montfavet (France): 79p.
- Herman M. et al. 1986; Stratospheric aerosols observation from a balloon-borne polarimetric experi-ment. *Appl. Optics* 25: 3573-3584.

Rouquet M.C., 1987; Faisabilité de la calibration HRV-SPOT sur des cibles tests. *Rapport Contrat CNES Toulouse (France)*, 833/CNES/87/4891/00.

Santer R., 1984; Caractérisation des aérosols à partir de la polarisation du rayonnement solaire diffusé. Application aux atmosphères de la Terre, de Vénus et de Saturne. *Thèse d'Etat, Lille*.

Slater P.N., Biggar S.F., Holm R.D., Jackson R.D., Mao Y., Moran M.S., Palmer J.M., Yuan B., 1987; Reflectance and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors. *Remote Sens. Environ.* 22: 11-37.

Tanré D., Deroo C., Duhaut P., Herman M., Morcrette J.J., Perbos J., Deschamps P.Y., 1990; Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: The 5S code. *Int. J. Remote Sens.*, 11: 659-668.

Vermote E., 1990; Effets d'atmosphère en télédétection. *Thèse Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois (France)*

Weinman J.A., Twilley J.T., Browning S.R., Herman B.M., 1975; Derivation of phase function from multiple scattered sunlight transmitted through a hazy atmosphere. *J. Atm. Sci.* 32: 577.

**III - INTER-ETALONNAGE DES INSTRUMENTS SATELLITAIRES
HRV, TM ET AVHRR**

Article 6

**"Inter-étalonnage de SPOT1-HRV, LANDSAT5-TM, et NOAA11-AVHRR
dans les domaines du visible et du proche infrarouge"**

(publié dans Cinquième Coll. Int. Mesures Physiques et Signatures en
Télédétection, 14-18 Jan. 1991, Courchevel (France), ESA SP-319: 45-48)

INTER-ETALONNAGE DE SPOT1-HRV, LANDSAT5-TM ET NOAA11-AVHRR - DANS LES DOMAINES DU VISIBLE ET DU PROCHE INFRAROUGE

X.F. Gu, M. Verbrugghe, G. Guyot
INRA Bioclimatologie, BP 91, 84143 Montfavet CEDEX (France)

RESUME

L'inter-étalonnage des capteurs des satellites SPOT1-HRV, LANDSAT5-TM et NOAA-AVHRR a été réalisé sur le site de la "Crau sèche", plaine caillouteuse du sud-est de la France. La méthode utilisée a consisté à choisir des journées claires au cours desquelles la Crau était visée par les 3 satellites (30-09 et 16-10-89) et à déterminer la réflectance du sol et les épaisseurs optiques des composantes de l'atmosphère au moment de l'acquisition de chaque image. Ces données ont ensuite servi à déterminer les coefficients d'étalonnage et d'inter-étalonnage des instruments satellitaires. Les résultats obtenus montrent que les méthodes qui ont été développées conduisent à des résultats stables et peuvent être considérées comme opérationnelles.

Mots clef: inter-étalonnage, satellites, SPOT,
LANDSAT-TM, NOAA-AVHRR

I. INTRODUCTION

L'inter-étalonnage des capteurs des satellites consiste à établir, le plus précisément possible, les rapports entre les coefficients d'étalonnage dans des bandes spectrales homologues (Ref. 1). Différentes méthodes peuvent être utilisées mais la plus précise consiste à étalonner tous les satellites le même jour sur un même site test. C'est celle que nous avons choisie. Les mesures ont ainsi été effectuées dans le visible et le proche-infrarouge sur le site test de "la Crau" (Ref. 2) au cours de journées avec une bonne visibilité durant lesquelles le site était visé par les 3 satellites SPOT1-HRV, LANDSAT5-TM et NOAA11-AVHRR.

II. MATERIEL ET METHODE

2.1 Le site expérimental

L'interétalonnage de SPOT1-HRV et de LANDSAT5-TM a été effectué sur le site d'étalonnage de "la Crau". Ce site est une surface de 400x400m située au centre de la

Crau sèche, plaine caillouteuse du sud-est de la France, située à 50km au nord-ouest de Marseille. L'analyse détaillée des propriétés optiques de ce site et des conditions climatiques locales a permis de montrer qu'il était bien adapté pour les étalonnages de satellites (Refs. 2, 3, 4). Pour l'étalonnage de NOAA11-AVHRR, l'ensemble de la Crau sèche (60km²), qui est relativement homogène, a été utilisé.

2.2 Acquisition et traitement des données

Deux séries d'images de SPOT1-HRV1, LANDSAT5-TM et NOAA11-AVHRR ont été acquises les 30 Septembre et 16 Octobre 1989. Ces mêmes jours des mesures de réflectance du sol et d'épaisseur optique de l'atmosphère ont été effectuées au moment du passage des satellites SPOT et LANDSAT.

2.2.1 Mesures de réflectance du sol

Les mesures ont été réalisées avec un radiomètre de simulation de SPOT à 3 canaux en suivant la procédure décrite par Gu et al. (Ref. 2).

Une centaine de mesures de réflectance ont été effectuées dans l'heure qui encadre le passage des satellites. Elles ont été régulièrement espacées sur l'ensemble du site d'étalonnage et correspondaient à des surfaces élémentaires circulaires de 0,53m de diamètre. Les réflectances dans les bandes des satellites ont été déduites des mesures effectuées avec des radiomètres en tenant compte du spectre moyen de réflectance du sol (Ref. 3) et des courbes de réponse des capteurs des satellites (Tableau 1). De plus, pour l'étalonnage de SPOT, les mesures de luminance ont été effectuées en visant le sol avec la même inclinaison et la même orientation que l'instrument HRV.

Tableau 1 : Réflectances du sol ajustées en fonction de la sensibilité spectrale des capteurs et de la géométrie de visée.

| Capteur | Dates | Bandes spectrales | | |
|---------|-------|-------------------|-------|--------|
| | | vert | rouge | P.I.R. |
| HRV1 | 30/09 | 0,148 | 0,223 | 0,282 |
| | 16/10 | 0,142 | 0,211 | 0,271 |
| TM | 30/09 | 0,168 | 0,214 | 0,276 |
| | 16/10 | 0,168 | 0,214 | 0,276 |

2.2.2 Mesure de l'épaisseur optique des aérosols

L'épaisseur optique des aérosols a été déterminée au moment du passage des satellites à partir de mesures effectuées avec un photomètre pistolet à 5 bandes, conçu par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique de l'Université de Lille (L.O.A.), et pointé sur le soleil. Son angle d'ouverture est de 2°. Il possède 5 bandes spectrales et parmi celles-ci nous en avons utilisé 3 centrées sur 449, 644 et 845nm et dont la largeur était de 18nm. Les épaisseurs optiques totales de l'atmosphère ont alors été déterminées à partir du tracé de droites de Bouger. Celle des aérosols a ensuite été calculée en déterminant la contribution moléculaire et celle de l'ozone. Pour cela nous avons utilisé le modèle "5S" (Ref. 9). La quantité intégrale de vapeur d'eau a été déterminée à partir des données des radio-sondages effectués à Nimes (40km au nord-ouest du site). La quantité d'ozone qui a été considérée est celle qui est donnée par London et al. (Ref. 6). Compte tenu des résultats des premiers étalonnages de SPOT (Ref. 7) nous avons utilisé le modèle d'aérosol continental pour les calculs. Les résultats des déterminations des différentes épaisseurs optiques pour les deux journées de mesure sont rassemblés dans le tableau 2.

Tableau 2: Teneurs de l'atmosphère en vapeur d'eau et en ozone et épaisseur optique des aérosols (à 550nm).

| Dates | 30/09 | 16/10 |
|------------------------------------|-------|-------|
| Vapeur d'eau (g.cm ⁻²) | 1.516 | 1.470 |
| Ozone (cm.atm) | 0.265 | 0.260 |
| Aérosols | 0.300 | 0.320 |
| Visibilité (km) | 20 | 30 |

2.3 Détermination des coefficients d'étalonnage et d'inter-étalonnage des capteurs des satellites

La méthode utilisée consiste à déterminer les coefficients d'étalonnage absolus des 3 satellites et à déduire ensuite les coefficients d'inter-étalonnage.

Le coefficient d'étalonnage d'un satellite est déterminé à partir de l'équation :

$$L_i = D_s \cdot R_i \cdot E_{oi} \cdot \cos\theta / \pi \quad (1)$$

$$A_i = (V_i - V_{oi}) / L_i \quad (2)$$

avec:

- A : Coefficient d'étalonnage
- L : Luminance équivalente ($\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}.\text{sr}^{-1}$)
- D_s : Facteur de distance Terre-Soleil
- R : Réflectance apparente au niveau du satellite
- E_o : Eclairement équivalent ($\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}.\text{sr}^{-1}$)
- θ : Angle solaire zénithal
- V : Valeur numérique de l'image
- V_o : Offset de l'instrument
- i : Indique la bande spectrale du satellite

Il faut noter toutefois que l'offset de SPOT-HRV est ramené à zéro et que les gains sont différents selon le canal considéré. Aussi une équation d'étalonnage différente peut-elle être utilisée afin d'avoir un coefficient A_i indépendant des gains :

$$A_i = (1,3)^{3-m} \cdot V_i / L_i \quad (3)$$

avec m : gain du capteur.

Pour les bandes spectrales homologues le coefficient d'inter-étalonnage entre, par exemple, LANDSAT5-TM et SPOT1-HRV s'écrit:

$$C = A_{TM} / A_{HRV} \quad (4)$$

Le même type de calcul peut être effectué pour l'inter-étalonnage des autres satellites. La précision avec laquelle ces coefficients sont déterminés dépend de celle de l'étalonnage des satellites.

2.4 Etalonnage des satellites

Trois méthodes différentes ont été utilisées pour l'étalonnage des satellites :

2.4.1. Etalonnage direct de SPOT1-HRV et de LANDSAT5-TM

La méthode utilisée est décrite dans une autre communication (Ref. 7) (Figure 1). Elle consiste à déterminer les réflectances au sol du site test (400x400m) dans les bandes de SPOT et les épaisseurs optiques des constituants de l'atmosphère au moment du passage du satellite. Ces dernières sont ensuite utilisées pour calculer les réflectances apparentes du site vu par SPOT ou LANDSAT-TM, dans chacune de leurs bandes spectrales, à partir du modèle 5S. Les coefficients d'étalonnage sont alors déterminés en comparant les luminances équivalentes et les valeurs numériques moyennes du site sur l'image correspondante.

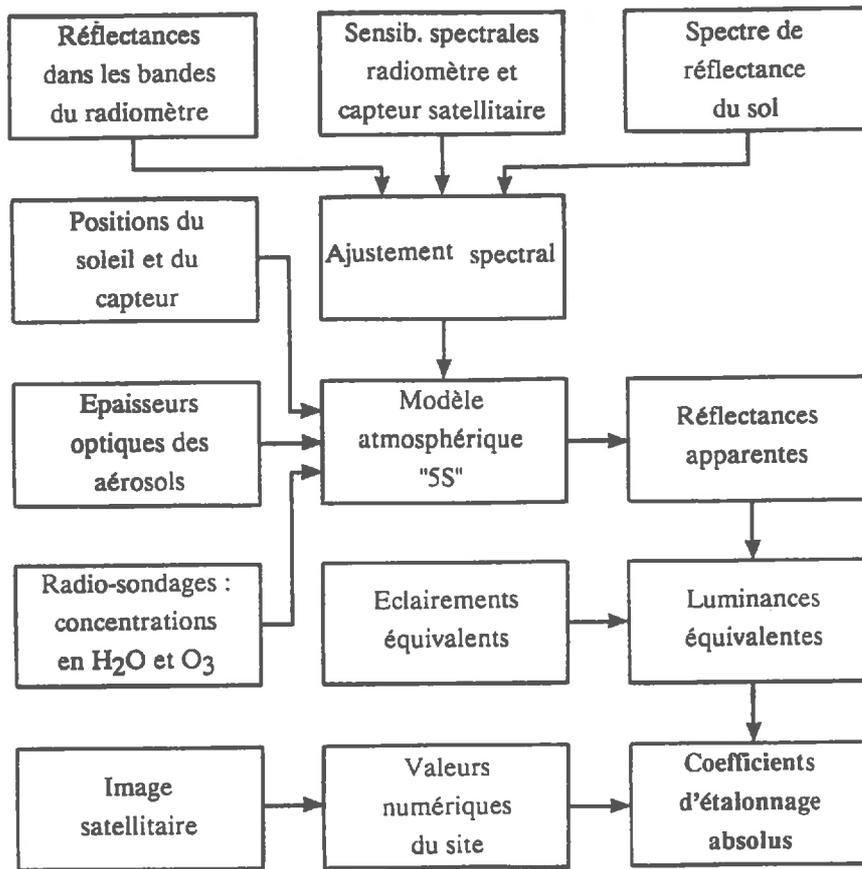


Figure 1: Etalonnage direct de SPOT-HRV et de LANDSAT5-TM.

2.4.2 Etalonnage indirect de LANDSAT5-TM

Cette méthode permet d'obtenir un second jeu de coefficients d'étalonnage de TM, indépendants de ceux qui sont obtenus par la méthode directe. L'intérêt de cette seconde méthode, qui est moins précise que la première, est de permettre de détecter d'éventuelles erreurs de mesure.

Comme le montre la figure 2 les luminances du site test dans les bandes de TM sont déduites de celles qui sont mesurées dans les bandes homologues de HRV en tenant compte des courbes de réponse spectrale des deux instruments, de la hauteur du soleil et en supposant que les conditions atmosphériques sont identiques lors du passage des deux satellites (9h30 et 10h30 TU). Nous avons choisi, par ailleurs une visée

pratiquement verticale de SPOT de manière à ne pas avoir à corriger les effets dus à la variation angulaire de la réflectance du sol (Tableau 3).

Tableau 3 : Conditions géométriques dans lesquelles les images satellitaires ont été acquises. (θ_v , Φ_v , inclinaison et azimut de la visée; θ_s , Φ_s , inclinaison et azimut des rayons solaires).

| | SPOT1 -HRV1 | | LANDSAT5 -TM | | NOAA11 -AVHRR | |
|------------|----------------|-------|-----------------|-------|------------------|-------|
| | 30/09 | 16/10 | 30/09 | 16/10 | 30/09 | 16/10 |
| θ_v | *10,0 | *02,0 | 0 | 0 | 52,3 | 17,8 |
| Φ_v | 283,1 | 101,9 | | | 69,4 | 75,6 |
| θ_s | 47,1 | 53,1 | 51,3 | 56,6 | 47,5 | 55,4 |
| Φ_s | 166,3 | 166,7 | 147,1 | 151,2 | 193,9 | 204,4 |

(*) Visées: Ouest le 30/09, Est le 16/10

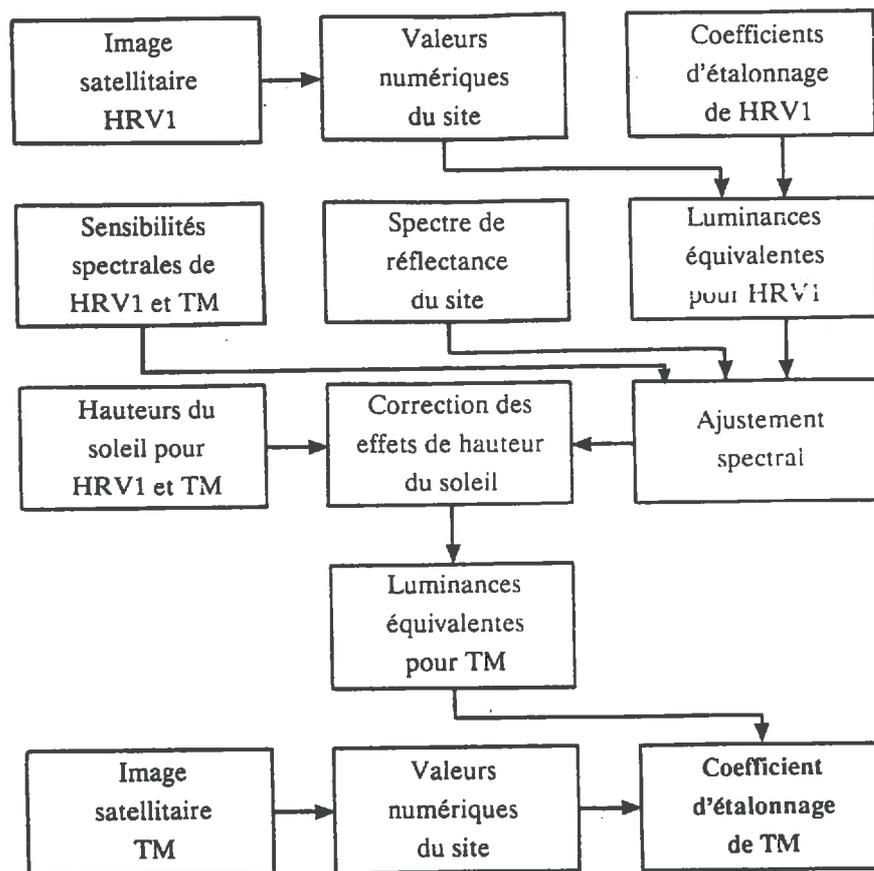


Figure 2: Etalonnage indirect de LANDSAT5-TM.

2.4.3. Etalonnage de NOAA-AVHRR

Les pixels vus par ce satellite sont nettement plus grands que le site d'étalonnage de SPOT et de LANDSAT. Aussi avons-nous utilisé la réflectance moyenne de l'ensemble de la Crau sèche (environ 60km²) qui est relativement homogène. Comme il n'était pas possible de déterminer la réflectance moyenne d'une telle surface par des mesures au sol nous avons utilisé les données fournies par SPOT-HRV (Figure 3). Cela nous a permis d'obtenir la réflectance moyenne du site pour les bandes de AVHRR et avec l'inclinaison de sa visée. A partir de là nous avons utilisé la même procédure que pour l'étalonnage direct des autres satellites.

III. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Coefficients d'étalonnage des satellites

Le tableau 4 présente les différents coefficients d'étalonnage qui ont été déterminés, comparés à ceux qui ont été obtenus par différents auteurs. Il montre que les coefficients d'étalonnage de SPOT1-HRV1 sont en bon accord avec les coefficients d'étalonnage fournis par SPOT IMAGE sur la bande magnétique et les résultats de l'étalonnage qui a été effectué en 1989 sur le site de White Sands par Slater (Ref. 8). Ces coefficients sont également voisins de ceux qui ont été déterminés sur le site de la Crau pour l'instrument HRV2 (Ref. 7). La faible variation des coefficients d'étalonnage d'une série de mesure à l'autre montre également que la procédure qui est utilisée conduit à des résultats stables.

En ce qui concerne LANDSAT5-TM on observe un très bon accord entre les résultats des étalonnages effectués aux Etat Unis par Slater (Refs. 8, 9, 10) et en Crau pour les bandes TM2 (vert), TM3 (rouge) et TM4 (proche-infrarouge). On observe également une bonne concordance entre les coefficients obtenus par les méthodes directe et indirecte.

Les coefficients d'étalonnage qui ont été déterminés en Crau pour AVHRR correspondent à une visée très inclinée (52,3°). Malgré cela ils sont en bon accord avec ceux de la littérature.

Tableau 4 : Comparaison des coefficients d'étalonnage des instruments spatiaux avec ceux qui ont été obtenus par différents auteurs. (*) méthode directe; (**) méthode indirecte.

| Auteurs (Ref.) | Date | Capteur | Bandes spectrales | | |
|-------------------|-----------|---------|-------------------|-------|-------|
| | | | vert | rouge | P.I.R |
| CNES | | HRV1 | 0,470 | 0,337 | 0,541 |
| Slater | 8/89 (10) | | 0,471 | 0,331 | 0,524 |
| INRA | 30/09/89* | | 0,500 | 0,316 | 0,525 |
| INRA | 16/10/89* | | 0,485 | 0,316 | 0,524 |
| Slater | (9) | TM | 0,646 | 0,850 | 0,992 |
| Slater | (8) | | 0,683 | 0,909 | 1,060 |
| INRA | 30/09* | | 0,689 | 0,919 | 1,091 |
| INRA | 16/10* | | 0,682 | 0,931 | 1,096 |
| INRA | 16/10** | | 0,706 | 0,902 | 1,085 |
| Guenther | (11) | AVHRR | | 1,81 | 2,79 |
| Justus | (12) | | | 1,80 | 2,70 |
| Holben | (13) | | | 1,67 | 2,44 |
| Slater | (8) | | | 1,79 | 2,37 |
| INRA | 30/09 | | | 1,78 | 2,26 |

3.2 Coefficients d'inter-étalonnage des satellites

3.2.1 Incertitude sur les coefficients d'inter-étalonnage

Un bilan détaillé des erreurs sur les coefficients d'étalonnage de SPOT-HRV présenté dans le même ouvrage (Ref. 7). Les coefficients d'étalonnage de LANDSAT5-TM sont déterminés avec pratiquement les mêmes incertitudes. Aussi, en supposant que toutes ces incertitudes sont statistiquement indépendantes, l'incertitude globale sur l'inter-étalonnage de HRV et TM est égale à la somme quadratique des incertitudes sur chacun des coefficient d'étalonnage, ce qui correspond à environ $\pm 4,5\%$ pour les canaux du visible et $\pm 3\%$ pour le proche-infrarouge.

L'incertitude sur l'inter-étalonnage de SPOT-HRV et de NOAA-AVHRR est légèrement plus élevée à cause des incertitudes supplémentaires sur l'estimation de la réflectance de la Crau sèche, l'ajustement spectral (les bandes de NOAA- AVHRR sont moins proches de celles de SPOT-HRV que celles de LANDSAT-TM) et la correction

des effets de visée oblique. Elle est ainsi estimée à $\pm 6\%$ pour le visible et $\pm 5\%$ pour le proche-infrarouge.

3.2.2. Coefficients d'inter-étalonnage

Tableau 5 : Coefficients d'inter-étalonnage des différents instruments satellitaires.

| Coefficients | Bandes spectrales | | |
|--------------------------|-------------------|--------|--------|
| | vert | rouge | P.I.R. |
| A_{TM}/A_{HRV1} | 1,393 | 2,928 | 2,086 |
| $A_{TM}/A_{HRV1} (*)$ | 0,636* | 1,025* | 1,234* |
| A_{AVHRR}/A_{HRV1} | | 5,645 | 4,311 |
| $A_{AVHRR}/A_{HRV1} (*)$ | | 1,977* | 2,551* |

(*) : en utilisant les gains standards du capteur HRV: 6, 7 et 5 pour XS1, XS2 et XS3 respectivement.

Le tableau 5 présente l'ensemble des coefficients d'inter-étalonnage qui ont été obtenus. On peut remarquer sur celui-ci que si l'on tient compte des gains de HRV1, le coefficient d'étalonnage absolu de TM dans la bande verte est plus faible que celui de HRV1; dans la bande rouge les coefficients sont presque égaux et, dans le proche-infrarouge c'est le gain de TM qui est le plus élevé. Aussi la résolution radiométriques des deux instruments est-elle différentes et les valeurs numériques qui correspondent à une image TM sont plus faibles que celles de HRV1 dans les bandes du visible et plus élevées dans le proche-infrarouge. Cependant les différences observées ne correspondent pas uniquement aux rapports des coefficients d'étalonnage. Elles dépendent également des rapports des réflectances apparentes du sol qui varient en fonction des conditions atmosphériques, des types d'occupation du sol, de l'angle de visée du satellite et du rapport des cosinus des angles solaires zénithaux lors du passage des satellites.

IV CONCLUSION

Les résultats qui ont été obtenus montrent que les méthodes, qui ont été développées pour l'inter-étalonnage des satellites, peuvent être considérées comme opérationnelles. Elles conduisent à des résultats stables qui sont tout à fait comparables à ceux qui ont été obtenus par d'autres équipes, compte-tenu de la précision avec laquelle ce type de détermination peut être effectué.

Cette étude montre également que le site de la Crau, sur lequel les mesures ont été réalisées, est bien adapté pour les étalonnages de satellites.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS), contrat n° AI/0693/1769.

REFERENCES

1. Leroy M., 1990; Modèles des systèmes de mesure imageurs optiques. *In Ecole d'été en Télédétection Spatiale: aspects physiques et modélisation*, Août 1988, Toulouse, CEPADUES Ed. (France): 311-363
2. Gu X.F. et al., 1990; Analyse de la variabilité spatiale d'un site test - Exemple de la Crau (France). *Photo-interprétation* 90-1, Fasc. 5: 39-52
3. Guyot G. et al., 1989; Caractérisation des propriétés optiques de la Crau. *Rapport final. Marché CNES INRA Bioclimatologie Montfavet* (France): pp 79.
4. Gu X.F. et al., 1990; Evaluation of measurement errors on the reflectance of "La Crau", the French SPOT calibration area. *In Proc. 10th EARSeL Symp.*, Toulouse, 5-8 June 1990, 121-134
5. Tanré D. et al., 1986; Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum. *User's guide, L.O.A. Lille*: 264
6. London J. et al. 1976; Atlas of the global distribution of total ozone July 1957-June 1967. *NACAR Technical Note* No 113 + str: pp 276.
7. Santer R. et al., 1990; SPOT calibration on the test site "La Crau" (France). *In the same volume.*
8. Slater P.N., Gellman D.I., 1990; Communication personnelle.

9. Slater P.N. et al., 1987; Reflectance- and radiance-based methods for in-flight absolute calibration of multispectral sensors. *Remote Sens. Environ.*, 22: 11-37
10. Slater P.N., 1989; The calibration of SPOT-1, HRV-1 at Maricopa Agricultural Center, Arizona on 12 August, 1989. *Report Optical Sciences Center*: 8p
11. Guenther B., 1990; Results from the NASA ER-2 aircraft experiment at White Sands, N.M.; *Meeting on radiometric calibration of satellite sensors of reflected solar radiation*, NOAA/NESDIS, March 27-28, 1990.
12. Justus C.G., 1989; An operational procedure for calibrating and assessing the stability and accuracy of shortwave satellite sensors. *NOAA cooperative agreement NA84AA-H-00010*, November 1989
13. Holben B.N. et al., 1990; NOAA-11 AVHRR visible and near-IR in-flight calibration. *Int. J. Remote Sens.* 11: 1511-1519

IV - MISE EN EVIDENCE DES FACTEURS PERTURBATEURS SUR L'INTER-COMPARAISON DES DONNEES SATELLITAIRES

IV-1 Les facteurs affectant l'intercomparaison des données satellitaires

Du point de vue radiométrique, les images satellitaires peuvent être classées en différents niveaux, suivant les corrections radiométriques effectuées:

- niveau 0: Image correspondant aux valeurs numériques brutes;
- niveau 1: Image correspondant aux valeurs numériques, après correction des perturbations instrumentales comme l'effet strié et la FTM;
- niveau 2: Image des luminances équivalentes après application des coefficients d'étalonnage absolus;
- niveau 3: Image des réflectances apparentes, déduites des luminances équivalentes en tenant compte de la géométrie du soleil au moment de l'acquisition et de la sensibilité spectrale du capteur;
- niveau 4: Image des réflectances au sol correspondant à des surfaces planes et horizontales, après correction des effets atmosphériques;
- niveau 5: Image des réflectances au sol après correction des effets topographiques.

Le nombre des facteurs qui affectent l'intercomparaison des données provenant de différents capteurs dépend du niveau de correction radiométrique effectué sur une image. Plus le niveau de correction est élevé, moins les facteurs perturbateurs sont nombreux (tableau 3.1).

IV-2 La relation entre les valeurs numériques des images obtenues par deux capteurs

En général, les images satellitaires ont subi systématiquement des prétraitements radiométriques, et les perturbations instrumentales ont été bien corrigées sauf celle de la FTM. Comme on l'a constaté dans le premier paragraphe de ce chapitre, l'effet de la

FTM ne peut être négligé, particulièrement quand la zone est hétérogène et quand on compare les images de deux capteurs pixel par pixel. La correction des effets de la FTM d'un capteur nécessite de connaître sa variation en fonction de la fréquence spatiale. Malheureusement, les valeurs fournies par les distributeurs de données ne sont généralement pas suffisantes. Il sera nécessaire, dans le futur, d'évaluer expérimentalement la FTM des capteurs satellitaires en orbite. En effet, une fois que la FTM du capteur est déterminée, ses effets peuvent être éliminés avec une très bonne précision.

Parmi les différents facteurs qui affectent l'intercomparaison des données satellitaires (tableau 3.1.), l'étalonnage, l'éclairement équivalent du soleil, la hauteur du soleil et la distance terre-soleil (B; C1, C2 et C3) produisent des effets linéaires. Autrement dit, s'il n'y a que ces effets sur les images, la relation entre les valeurs numériques fournies par deux capteurs différents est tout à fait linéaire, sans aucune dispersion. Rappelons ici la relation entre la réflectance apparente, R , mesurée par le capteur et la valeur numérique correspondante de l'image, V :

$$V_k = A_k \cdot D_{sk} \cdot R_k \cdot E_{0k} \cdot \cos\theta / \pi + V_{0k} \quad (3.1)$$

| | | |
|------|------------|--|
| avec | A : | Coefficient d'étalonnage |
| | D_s : | Facteur de distance Terre-Soleil |
| | R : | Réflectance apparente au niveau de satellite |
| | E_0 : | Eclairement équivalent, en $W \cdot m^{-2} \cdot m^{-1} \cdot sr^{-1}$ |
| | θ : | Angle solaire zénithal |
| | V : | Valeur numérique de l'image |
| | V_0 : | Off-set de l'image |
| | k : | Indique le numéros du capteur considéré |

Supposons que l'off-set de l'image ait été retranché de l'image, la relation entre la valeur numérique fournie par le capteur 1 et celle fournie par le capteur 2 peut s'écrire:

$$V_2 = V_1 \frac{R_2}{R_1} \frac{A_2}{A_1} \frac{E_{02}}{E_{01}} \frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1} \frac{D_{s2}}{D_{s1}} \quad (3.2)$$

Avec A_2/A_1 coefficient d'inter-étalonnage et E_{02}/E_{01} rapport des éclairagements équivalents solaires, qui peuvent être considérés comme deux coefficients constantes pour une période donnée. Pour un couple d'images provenant de deux capteurs, $\cos\theta_2/\cos\theta_1$ et D_{s2}/D_{s1} sont également deux rapports bien déterminés.

Tableau 3.1 : Effets sur l'inter-comparaison des données satellitaires en fonction du niveau (N) de corrections radiométriques effectuées

| N | Traitement* | Type d'image | Facteurs perturbateurs |
|---|--|---|---|
| 0 | Sans | valeur numérique bruitée | A1 effet strié A2 effet de la FTM B étalonnage absolu C1 éclairement équivalent du soleil C2 hauteur du soleil C3 distance terre-soleil D effets atmosphériques E effets topographiques F1 effets spectraux F2 effets de la géométrie de visée |
| 1 | corrections des bruits striés et de la FTM | valeur numérique corrigée | B étalonnage absolu C1 éclairement équivalent du soleil C2 hauteur du soleil C3 distance terre-soleil D effets atmosphériques E effets topographiques F1 effets spectraux F2 effet de la géométrie de visée |
| 2 | étalonnage | luminance | C1 éclairement équivalent du soleil C2 hauteur du soleil C3 distance terre-soleil D effets atmosphériques E effets topographiques F1 effets spectraux F2 effet de la géométrie de visée |
| 3 | calcul de la réflectance apparente | réflectance apparente | D effets atmosphériques E effets topographiques F1 effets spectraux F2 effets de la géométrie de visée |
| 4 | correction atmosphérique | réflectance au sol en supposant la surface plane et horizontale | E effets topographiques F1 effets spectraux F2 effets de la géométrie de visée |
| 5 | correction topographique | réflectance au sol vraie | F1 effets spectraux F2 effets de la géométrie de visée |

* : l'ensemble des effets pris en compte dans la correction correspondent à l'addition de tous les effets pris en compte pour les niveaux inférieurs et égal au niveau considéré.

IV-3 Phénomène de dispersion sur la relation entre les valeurs numériques des images de deux capteurs

Dans l'équation 3.2, R_2/R_1 est un rapport variable qui est influencé par les effets atmosphériques, topographiques, spectraux et directionnels (D, E, F1, F2). Ces effets introduisent des dispersions sur la relation entre les valeurs numériques des images de deux capteurs: pour une valeur de l'image d'un capteur, il y aura plusieurs valeurs sur l'image d'un autre capteur, et réciproquement. Cela peut être confirmé par les histogrammes bidimensionnels entre les images HRV et TM dans les bandes homologues (figure 3.1). Pour éviter les effets de la FTM, ces histogrammes ont été calculés à partir d'images dont la taille des pixels était de 240m de côté (soit la moyenne de 12x12 pixels pour l'image HRV et 8x8 pixels pour l'image TM).

Les effets atmosphériques et topographiques ont été discutés par de nombreux scientifiques, et peuvent être corrigés. Par contre, les effets spectraux et directionnels (F1 et F2) ont été très peu étudiés, et sont très difficiles à corriger. Pour une surface plane, les effets spectraux et directionnels sont les deux principales causes des phénomènes de dispersion observés sur la relation entre les valeurs numériques des images provenant de deux capteurs. Cela est dû au fait que la variation de la réflectance, en fonction de longueur d'onde et de l'angle de visée, est différente d'une surface à une autre et d'un pixel à un autre.

IV-4 Effet spectral sur l'inter-comparaison des images

Les bandes spectrales homologues des capteurs ne sont pas identiques (voir tableau 1.1 du paragraphe II-2-1 de la première partie) : leurs centres et largeurs sont généralement différents. Ainsi, dans deux bandes spectrales homologues, la réflectance de la cible peut être différente suivant le capteur. La différence des réflectances d'une cible données par deux capteurs dépend de la variation spectrale de la réflectance de la cible, et peut être positive ou négative.

Pour évaluer cet effet, nous avons comparé les images TM et HRV de la région du site test du 16 octobre 1989. Les conditions atmosphériques de ce jour là étaient stables, et la visée de l'instrument HRV peut être considérée comme verticale. De plus, nous avons dégradé la résolution spatiale des images à 240m pour éviter les effets de la FTM et pour diminuer l'effet de la diffusion de l'environnement. Ainsi, la dispersion sur la relation entre les images TM et HRV, dans les bandes homologues, est due uniquement à l'effet spectral.

La figure 3.2 montre l'histogramme bidimensionnel entre les valeurs numériques de l'image HRV pour la bande XS1 (axe vertical) et de son image homologue TM2 de TM

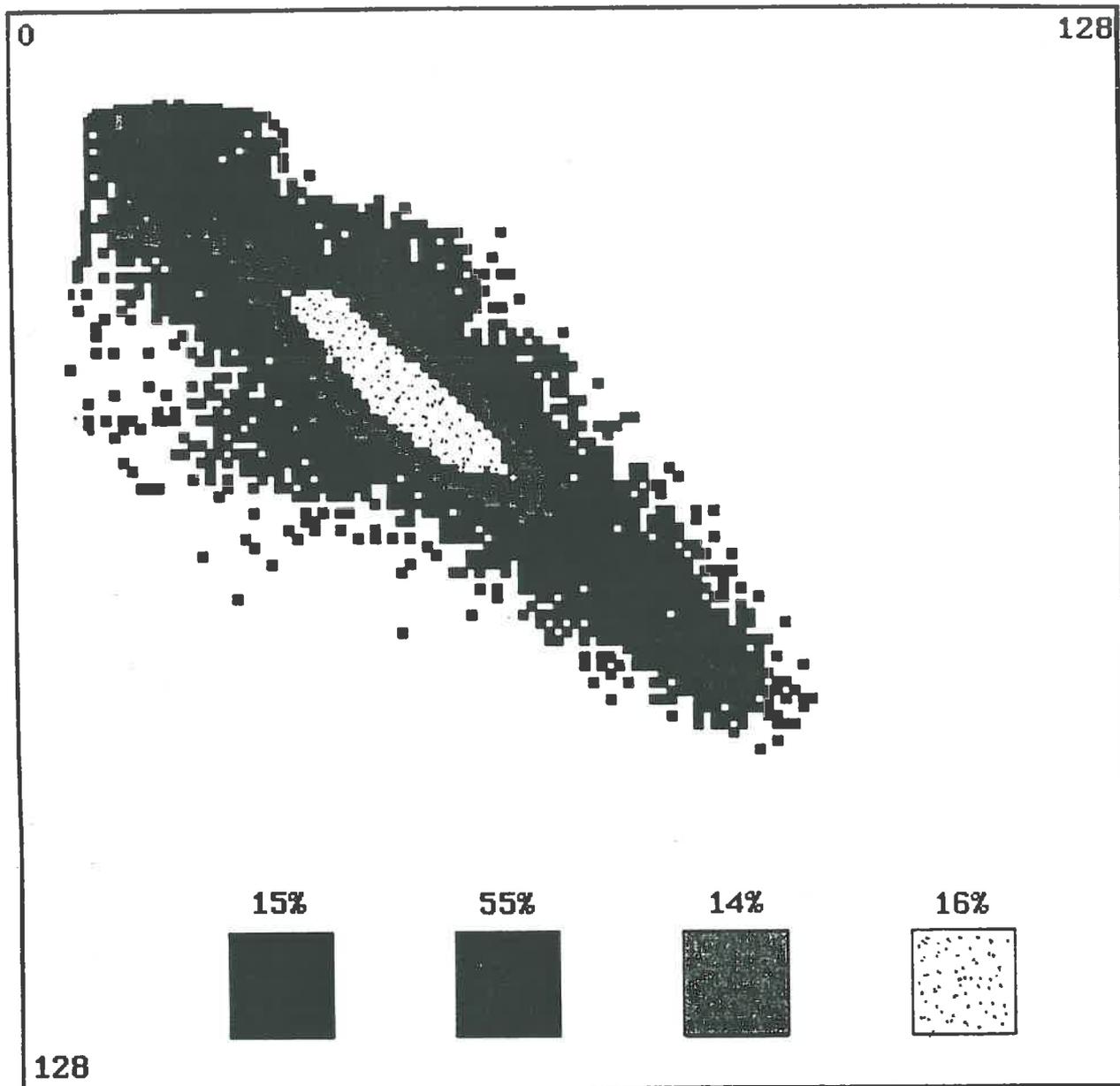


Figure 3.1: Histogramme bidimensionnel représentant la distribution des valeurs numériques données par TM (bande spectrale TM4) le 16/10 (axe horizontal) en fonction de celles données par HRV (bande spectrale XS3) le 30/09 (axe vertical). Quatre niveaux ont été distingués, et les pourcentage de pixels affectés sont indiqués au dessus de chaque nuance de gris (mise en évidence du phénomène de dispersion sur la relation entre les valeurs numériques des images de deux capteurs dans des bandes homologues).

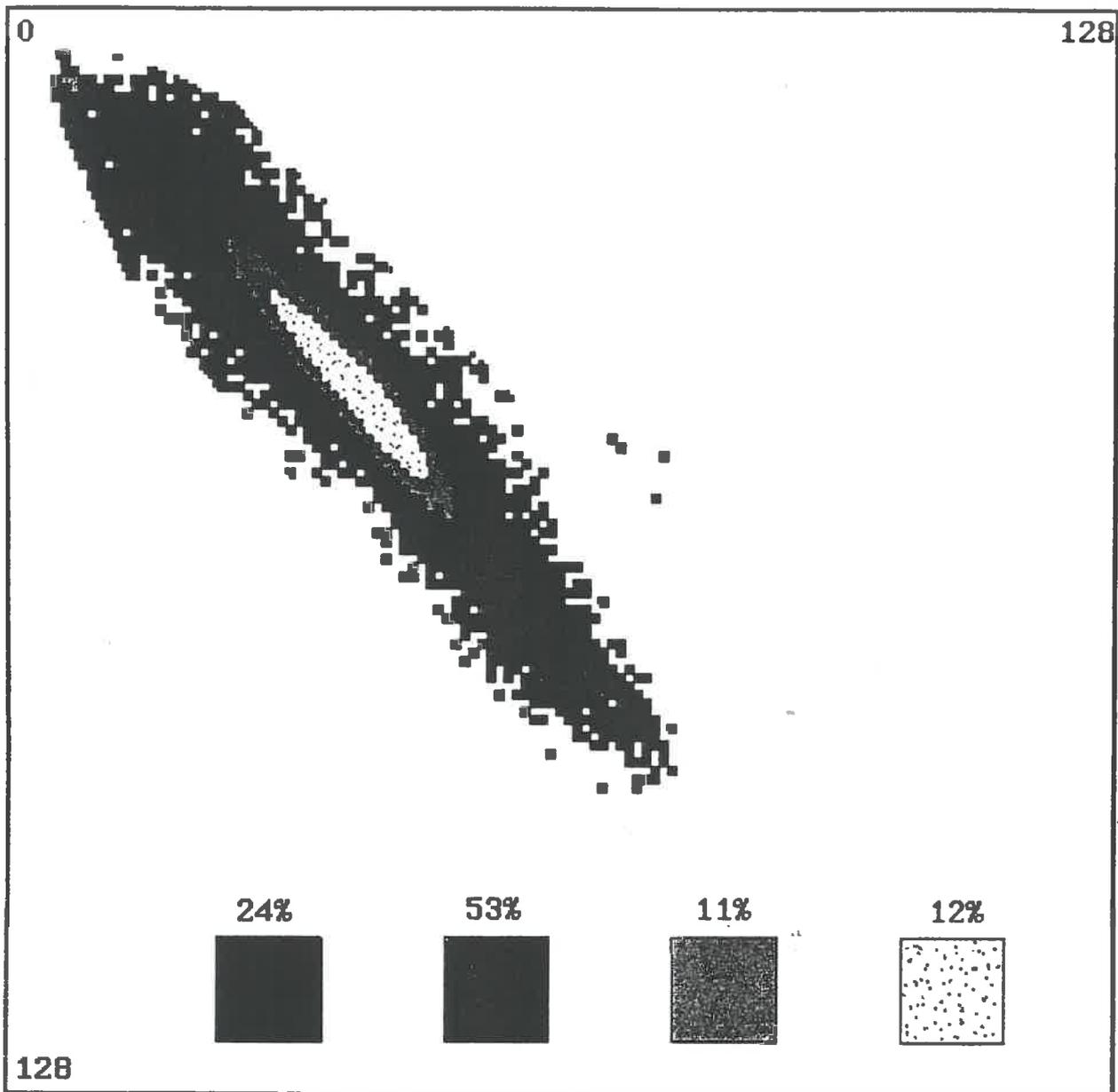


Figure 3.2: Histogramme bidimensionnel représentant la distribution des valeurs numériques données par TM (bande spectrale TM4) (axe vertical) en fonction de celles données par HRV (bande spectrale XS3) (axe horizontal) le 16/10. Quatre niveaux ont été distingués, et les pourcentage de pixels affectés sont indiqués au dessus de chaque nuance de gris (mise en évidence de l'effet spectral sur la relation entre les valeurs numériques des images de deux capteurs dans des bandes homologues).

(axe horizontal). On peut constater une dispersion importante correspondant à plusieurs niveaux de valeurs numériques.

Afin de quantifier la différence de réflectance due à l'effet spectral, nous avons choisi 8 zones test avec différents types d'occupation du sol. Nous avons calculé les moyennes de leurs valeurs numériques qui sont ensuite restituées en réflectance au sol en corrigeant les effets atmosphériques par l'inversion du modèle 5S. Les tableaux 3.2 et 3.3 représentent les réflectances au sol de 8 zones test dans les bandes vert (XS1 ou TM2), rouge (XS2 ou TM3) et proche infrarouge (XS3 ou TM4).

Tableau 3.2 : Réflectances au sol de 8 zones test dans les bandes de HRV (images du 16/10/89, visée verticale)

| Numéros | Type de surface | Réflectance au sol (en %) | | |
|---------|--------------------|---------------------------|-------|--------|
| | | vert | rouge | P.I.R. |
| 1 | Crau sèche | 13.1 | 19.0 | 26.7 |
| 2 | Sol nu | 13.8 | 16.6 | 24.5 |
| 3 | Prairie | 7.7 | 7.5 | 37.8 |
| 4 | Arbres fruitiers | 8.5 | 12.0 | 28.0 |
| 5 | Forêt 1 (montagne) | 5.9 | 7.9 | 21.2 |
| 6 | Forêt 2 (montagne) | 5.3 | 6.0 | 19.0 |
| 7 | Marais | 7.5 | 8.6 | 20.2 |
| 8 | Etang (eau) | 12.6 | 12.0 | 7.8 |

Le tableau 3.4 représente les différences de réflectance dans les bandes homologues de deux capteurs. On voit qu'elles ne sont pas négligeables. On peut penser que ces différences sont liées à la tendance de la variation spectrale de réflectance, mais la comparaison entre le tableau 3.4 et 3.3 (ou 3.2) montre que ce n'est pas aussi simple que cela. En réalité, la variation spectrale de réflectance d'une cible peut soit être monotone et quasiment linéaire (cas du sol nu), soit présenter des discontinuités (bandes

d'absorption) (cas de la végétation) dans le domaine spectral couvert par le capteur d'un satellite. Lorsque la réflectance varie quasiment linéairement avec la longueur d'onde, il est possible d'estimer les réflectance dans les bandes du capteur 2 à partir de celles qui sont mesurées dans les bandes homologues du capteur 1 et d'établir des coefficients de passage. Par contre, lorsque le spectre de réflectance présente des discontinuités, les corrections sont beaucoup plus difficiles à réaliser. Il faut, en effet, connaître la forme exacte du spectre de réflectance de la cible et la convoluer avec la courbe de sensibilité spectrale du capteur satellitaire. Théoriquement cela est possible, mais dans la pratique, on ignore la forme des spectres de couverts végétaux. Aussi, les données de réflectance fournies par deux capteurs différents vont présenter des écarts dûs aux caractéristiques instrumentales. Elles peuvent être soit considérées comme du "bruit" (et il faudra alors que les différences à mettre en évidence soient supérieures à celui-ci), ou bien alors elles peuvent être utilisées pour fournir des informations supplémentaires sur les surfaces visées (différences liées à la forme des spectres de réflectance).

Tableau 3.3 : Réflectances au sol de 8 zones test dans les bandes de TM (images du 16/10/89, visée verticale)

| Numéros | Type de surface | Réflectance au sol (en %) | | |
|---------|--------------------|---------------------------|-------|--------|
| | | vert | rouge | P.I.R. |
| 1 | Crau sèche | 15.4 | 20.5 | 26.8 |
| 2 | Sol nu | 14.4 | 17.1 | 23.9 |
| 3 | Prairie | 6.9 | 6.4 | 39.0 |
| 4 | Arbres fruitiers | 8.8 | 11.0 | 28.4 |
| 5 | Forêt 1 (montagne) | 5.5 | 6.8 | 20.1 |
| 6 | Forêt 2 (montagne) | 4.2 | 4.7 | 17.8 |
| 7 | Marais | 7.0 | 7.7 | 20.1 |
| 8 | Etang (eau) | 13.5 | 12.2 | 4.7 |

Tableau 3.4: Différence entre les réflectances de TM (R_{TM}) et les réflectances de HRV (R_{HRV}) dans les bandes homologues (mise en évidence de l'effet spectral)

| Numéros | Type de surface | $R_{TM} - R_{HRV}$ (en %) | | |
|---------|--------------------|---------------------------|-------|--------|
| | | vert | rouge | P.I.R. |
| 1 | Crau sèche | 2.3 | 1.5 | 0.1 |
| 2 | Sol nu | 0.6 | 0.5 | 0.6 |
| 3 | Prairie | -0.2 | -1.1 | 1.2 |
| 4 | Arbres fruitiers | 0.3 | -1.0 | 0.4 |
| 5 | Forêt 1 (montagne) | -0.4 | -1.1 | -1.1 |
| 6 | Forêt 2 (montagne) | -1.1 | -1.3 | -1.2 |
| 7 | Marais | -0.5 | -0.9 | -0.1 |
| 8 | Etang (eau) | 0.9 | 0.2 | -3.1 |

IV-5 Effet de l'angle de visée et effet temporel sur l'inter-comparaison des images

Quand on veut effectuer une analyse temporelle, on utilise souvent des images prises sous différents angles de visée pour réduire l'intervalle entre deux acquisitions d'images. Mais, pour une surface naturelle, la réflectance peut être différente selon la direction de la visée. Ainsi, même pour deux images obtenues le même jour avec un même capteur sous deux angles de visée différents, il y aura une dispersion sur la relation entre les valeurs de ces deux images. Pour évaluer cet effet, nous avons utilisé les deux couples d'images TM et HRV du 30 septembre et 16 octobre 1989.

Le même type de traitement que celui qui est décrit dans la partie consacrée à l'évaluation de l'effet spectral, a été utilisé pour calculer les réflectances au sol de 8 zones test (tableau 3.5, 3.6). Les deux images HRV (une est quasiment verticale, une autre oblique) permettent d'estimer l'effet de l'angle de visée (ou effet directionnel). Mais ces deux images étaient obtenues à un intervalle de 16 jours, la différence de réflectance est due à la fois aux effets temporels et directionnels (tableau 3.7). Il est donc nécessaire de retrancher l'effet temporel sur ces deux images. Cela a été réalisé en utilisant les deux images TM (dont la prise de vue est toujours verticale). Le tableau 8

Tableau 3.5: Réflectances au sol de 8 zones test dans les bandes de HRV (images du 30/09/89, visée oblique)

| Numéros | Type de surface | Réflectance au sol (en %) | | |
|---------|--------------------|---------------------------|-------|--------|
| | | vert | rouge | P.I.R. |
| 1 | Crau sèche | 13.3 | 18.9 | 26.2 |
| 2 | Sol nu | 13.2 | 15.8 | 25.0 |
| 3 | Prairie | 7.4 | 7.3 | 37.6 |
| 4 | Arbres fruitiers | 8.4 | 11.3 | 26.9 |
| 5 | Forêt 1 (montagne) | 6.6 | 8.1 | 21.0 |
| 6 | Forêt 2 (montagne) | 6.2 | 6.5 | 19.4 |
| 7 | Marais | 7.9 | 8.7 | 21.2 |
| 8 | Etang (eau) | 14.7 | 16.2 | 13.5 |

Tableau 3.6 : Réflectances au sol de 8 zones test dans les bandes de TM (images du 30/09/89, visée verticale)

| Numéros | Type de surface | Réflectance au sol (en %) | | |
|---------|--------------------|---------------------------|-------|--------|
| | | vert | rouge | P.I.R. |
| 1 | Crau sèche | 15.7 | 20.4 | 25.5 |
| 2 | Sol nu | 14.4 | 16.4 | 24.1 |
| 3 | Prairie | 7.4 | 6.4 | 37.4 |
| 4 | Arbres fruitiers | 8.5 | 9.9 | 26.6 |
| 5 | Forêt 1 (montagne) | 6.5 | 7.4 | 19.6 |
| 6 | Forêt 2 (montagne) | 5.7 | 5.8 | 18.0 |
| 7 | Marais | 7.8 | 8.0 | 20.6 |
| 8 | Etang (eau) | 15.0 | 15.8 | 11.9 |

Tableau 3.7: Différence entre les réflectances données par HRV les 16/10 [$R_{HRV}(16/10)$] et 30/09 [$R_{HRV}(30/09)$] (effet directionnel-temporel)

| Numéros | Type de surface | $R_{HRV}(16/10)-R_{HRV}(30/09)$ (en %) | | |
|---------|--------------------|--|-------|--------|
| | | vert | rouge | P.I.R. |
| 1 | Crau sèche | -0.2 | 0.3 | 0.5 |
| 2 | Sol nu | 0.6 | 0.8 | -0.5 |
| 3 | Prairie | -0.3 | 0.2 | 0.2 |
| 4 | Arbres fruitiers | 0.1 | 0.7 | 1.1 |
| 5 | Forêt 1 (montagne) | -0.7 | -0.2 | -0.2 |
| 6 | Forêt 2 (montagne) | -0.9 | -0.5 | -0.4 |
| 7 | Marais | -0.4 | -0.1 | -1.0 |
| 8 | Etang (eau) | -2.1 | -4.2 | -5.7 |

Tableau 3.8: Différence entre les réflectances données par TM les 16/10 [$R_{TM}(16/10)$] et 30/09 [$R_{TM}(30/09)$] (effet temporel)

| Numéros | Type de surface | $R_{TM}(16/10)-R_{TM}(30/09)$ (en %) | | |
|---------|--------------------|--------------------------------------|-------|--------|
| | | vert | rouge | P.I.R. |
| 1 | Crau sèche | -0.3 | 0.1 | 1.3 |
| 2 | Sol nu | 0.0 | 0.7 | -0.2 |
| 3 | Prairie | -0.5 | 0.0 | 1.6 |
| 4 | Arbres fruitiers | 0.3 | 1.1 | 1.8 |
| 5 | Forêt 1 (montagne) | -1.0 | -0.6 | 0.5 |
| 6 | Forêt 2 (montagne) | -1.5 | -1.1 | -0.2 |
| 7 | Marais | -0.8 | -0.3 | -0.5 |
| 8 | Etang (eau) | -1.5 | -3.6 | -7.2 |

représente la différence de réflectance entre deux images TM (effet temporel), et l'effet directionnel obtenu est présenté dans le tableau 3.9. On constate que l'effet directionnel est faible (tableau 3.9). Cela peut être dû fait que l'angle de visé est faible (10° par rapport au nadir), l'azimut de la visée est plutôt proche du plan perpendiculaire au soleil (117° par rapport à la position du soleil). Par contre, bien que les deux images soient acquises à un intervalle assez court (16 jours) et que l'état des surfaces dans cette période soit relativement stable, l'effet temporel ne peut pas être négligé (tableau 3.8). Pour les utilisateurs qui considèrent que l'effet directionnel fournit une information utile, il aurait fallu réduire l'intervalle entre l'acquisition des images et choisir des images obtenues dans un plan vertical proche du celui du soleil avec un angle de visée important.

Tableau 3.9: Effet directionnel (réflectance oblique R_O - réflectance verticale R_V)

| Numéros | Type de surface | $R_O - R_V$ (en %) | | |
|---------|--------------------|--------------------|-------|--------|
| | | vert | rouge | P.I.R. |
| 1 | Crau sèche | 0.1 | 0.2 | -0.8 |
| 2 | Sol nu | 0.6 | 0.1 | -0.3 |
| 3 | Prairie | 0.2 | 0.2 | -1.4 |
| 4 | Arbres fruitiers | -0.2 | -0.4 | -0.7 |
| 5 | Forêt 1 (montagne) | 0.3 | 0.4 | -0.3 |
| 6 | Forêt 2 (montagne) | 0.6 | 0.6 | -0.2 |
| 7 | Marais | 0.4 | 0.2 | -0.5 |
| 8 | Etang (eau) | -1.6 | -0.6 | 1.5 |

IV-6 Les effets combinés

Quand il y a plusieurs effets sur les images, la différence de réflectance peut être plus ou moins importante lorsqu'il n'y a qu'un seul effet. C'est ce qui est montré par le tableau 3.7 (effet directionnel-temporel), la tableau 3.10 (effet spectral-directionnel) et le

tableau 3.11 (effet spectral-directionnel-temporel). Pour avoir une idée plus claire de ces trois effets, nous avons calculé la distance moyenne à la réflectance de référence (DMR) par la formule suivante (tableau 3.12):

$$DMR = \sqrt{(\sum DR^2)/N} \quad (3.3)$$

avec : DR : différence de réflectance
N : nombre total de zones pris en compte dans le calcul

Le tableau 3.12 a été obtenu en considérant 7 zones. La zone 8 (la surface d'eau) n'est pas stable (probablement à cause de l'effet des vagues produit par le Mistral), et n'a pas été prise en compte dans le calcul. Dans ces tableaux, on peut voir que l'effet spectral est le facteur principal qui perturbe l'inter-comparaison de données satellitaires, et que la moyenne des différences de réflectance au sol varie entre $\pm 0.34\%$ et $\pm 1.32\%$ en réflectance. Cela veut dire que la variation temporelle de la réflectance d'une surface, obtenue à partir des images provenant de différent capteurs, devra dépasser ces valeurs pour être considérée comme une variation due au changement de la surface étudiée.

Tableau 3.10: Différence entre les réflectances données par TM [$R_{TM}(30/09)$] et HRV le 30/09 [$R_{HRV}(30/09)$] (effet spectral-directionnel)

| Numéros | Type de surface | $R_{TM}(30/09) - R_{HRV}(30/09)$ (en %) | | |
|---------|--------------------|---|-------|--------|
| | | vert | rouge | P.I.R. |
| 1 | Crau sèche | 2.4 | 1.7 | -0.7 |
| 2 | Sol nu | 1.2 | 0.6 | -0.9 |
| 3 | Prairie | 0.0 | -0.9 | -0.2 |
| 4 | Arbres fruitiers | 0.1 | -1.4 | 0.3 |
| 5 | Forêt 1 (montagne) | -0.1 | -0.7 | -1.4 |
| 6 | Forêt 2 (montagne) | -0.5 | -0.7 | -1.4 |
| 7 | Marais | -0.1 | -0.7 | -0.6 |
| 8 | Etang (eau) | 0.3 | -0.4 | -1.6 |

Tableau 3.11 Différence entre les réflectances données par TM le 16/10 [$R_{TM}(16/10)$] et par HRV le 30/09 [$R_{HRV}(30/09)$] (effet spectral-temporel-directionnel)

| Numéros | Type de surface | $R_{TM}(16/10) - R_{HRV}(30/09)$ (en %) | | |
|---------|--------------------|---|-------|--------|
| | | vert | rouge | P.I.R. |
| 1 | Crau sèche | 2.1 | 1.8 | 0.6 |
| 2 | Sol nu | 1.2 | 1.3 | -1.1 |
| 3 | Prairie | -0.5 | -0.9 | 1.4 |
| 4 | Arbres fruitiers | 0.4 | -0.3 | 1.5 |
| 5 | Forêt 1 (montagne) | -1.1 | -1.3 | -0.9 |
| 6 | Forêt 2 (montagne) | -2.0 | -1.8 | -1.6 |
| 7 | Marais | -0.9 | -1.0 | -1.1 |
| 8 | Etang (eau) | -1.2 | -4.0 | -8.8 |

Tableau 3.12 Distances moyennes à la réflectance de référence DMR

| Perturbations | DMR (réflectance en%) | | |
|--------------------|-----------------------|-------|--------|
| | vert | rouge | P.I.R. |
| spectrale (S) | 1.03 | 1.10 | 0.81 |
| temporelle (T) | 0.79 | 0.69 | 1.07 |
| directionnelle (D) | 0.39 | 0.34 | 0.71 |
| S + D | 1.03 | 1.03 | 0.90 |
| T + D | 0.53 | 0.47 | 0.65 |
| S + T + D | 1.32 | 1.30 | 1.22 |

V - CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE

Les résultats présentés et les analyses entreprises dans ce chapitre nous permettent, en conclusion, de faire ressortir les points suivants :

1. Le modèle de transfert radiatif 5S donne des estimations des valeurs des réflectances et des transmittances atmosphériques, comparables à celles déterminées expérimentalement. Il peut donc être utilisé lors de l'étalonnage et inter-étalonnage des capteurs satellitaires.
2. L'effet de la FTM sur les valeurs numériques des images ne peut pas être négligé pour des zones hétérogènes avec un petit parcellaire ; la correction peut pratiquement conduire au doublement de la valeur numérique obtenue dans la bande XS3 du capteur SPOT1-HRV en mode multibande. Cet effet est non seulement gênant pour obtenir les luminances vraies ou réflectances vraies des cibles, mais aussi pour les applications dans lesquelles les valeurs relatives sont utilisées pour distinguer deux cibles différentes à partir d'une simple analyse statistique (classification). Il paraît donc nécessaire, dans le futur, d'évaluer la FTM des capteurs satellitaires en orbite afin de pouvoir effectuer des corrections systématiques permettant une utilisation quantitative des images.
3. L'ensemble des méthodologies développées pour l'étalonnage des capteurs HRV de SPOT donne des résultats satisfaisants. Elles peuvent donc être utilisées opérationnellement. La précision de l'étalonnage peut toutefois être encore améliorée si on augmente sensiblement le nombre de mesures de réflectance au sol en utilisant des radiomètres supplémentaires parfaitement inter-étalonnés (l'intervalle de temps disponible pour ces travaux étant limité).
4. Les méthodes d'inter-étalonnage des capteurs satellitaires donnent des résultats dont la répétitivité temporelle est bonne. De plus, ils sont tout à fait comparables à ceux obtenus par d'autres équipes. Ces méthodes peuvent donc être appliquées opérationnellement dans l'avenir. Les coefficients d'inter-étalonnage entre les capteurs HRV et TM ont une bonne précision pour les images de cette période. Par contre, les coefficients d'inter-étalonnage de AVHRR avec les autres capteurs sont peu précis car l'image AVHRR utilisée correspondait à une visée très oblique (52° par rapport à la verticale). Malgré cela les coefficients obtenus sont voisins de ceux qui ont été obtenus par différents auteurs, ce qui montre la validité des méthodes de correction utilisées dans nos calculs.
5. De nombreux effets affectent la comparaison des images provenant de deux capteurs dans les bandes homologues. Certains sont bien connus et peuvent être corrigés comme l'inter-étalonnage, l'éclairement équivalent, la hauteur du soleil etc... D'autres, comme

les effets spectraux, directionnels, temporels etc., sont plus difficilement maîtrisables et vont produire des phénomènes de dispersion (ou des "bruits") sur la relation entre les valeurs d'images fournies par deux capteurs. Ainsi les utilisateurs des images multi-capteurs, pour les analyses multi-temporelles ou stéoradiométriques doivent être prudents dans leurs interprétations quand les différences mises en évidence sont inférieurs ou du même ordre de grandeur que celle des "bruits".

6. A travers les résultats obtenus, on peut dire que La Crau est un bon site pour l'étalonnage et l'inter-comparaison des données satellitaires.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

En dehors des corrections des effets atmosphériques et topographiques dont l'intérêt est bien connu, celles de la FTM, ainsi que l'établissement des coefficients d'étalonnage d'un capteur et d'inter-étalonnage de différents capteurs jouent également un rôle très important pour les analyses quantitatives des images satellitaires. L'ensemble de travaux présentés dans la thèse nous a permis de traiter ces trois problèmes en utilisant le site test de la Crau..

L'ensemble de méthodologies développées a permis de caractériser un site test pour l'étalonnage et l'inter-étalonnage des capteurs satellitaires. Les résultats obtenus montrent que le site est facile à réperer, que les variabilités spatiale, angulaire et temporelle de la réflectance, pour la zone réservée aux étalonnages et son environnement, sont faibles, et que la variation spectrale de la réflectance du site en fonction de la longueur d'onde, est régulière et stable. A partir du bilan d'erreurs effectué sur les mesures de réflectance sur le site, et en tenant compte de la forte probabilité d'acquisition d'images satellitaires (région la plus ensoleillée de France) et de la faible concentration de l'atmosphère en aérosols grâce au Mistral, vent froid et sec qui balaie la région, le site test de La Crau apparait comme un bon site pour l'étalonnage et l'inter-étalonnage des capteurs satellitaires.

Les facteurs affectant la précision des mesures de réflectance sur une surface naturelle sont de 2 types: ceux qui sont liés au radiomètre utilisé et ceux qui dépendent des propriétés optiques de la surface. Parmi le premier groupe, l'étalonnage des radiomètres est le facteur qui a le poids le plus important dans le bilan d'erreur. La nouvelle méthodologie qui a été mise au point à la suite des résultats de nos premières mesures, tient compte de la réponse directionnelle du panneau de référence et du rapport de l'éclairement diffus sur l'éclairement global. Cela permet de réduire l'incertitude à une valeur inférieure à $\pm 0.5\%$. Dans le deuxième groupe, en dehors des effets bien connus comme ceux du nombre d'échantillons et de la géométrie de visée, l'effet de la non-coïncidence des bandes spectrales entre le radiomètre et le capteur satellitaire doit être pris en considération.

L'ensemble des procédures développées pour l'étalonnage des capteurs HRV de SPOT

donne de bons résultats ; elles peuvent être utilisées opérationnellement. L'incertitude sur les coefficients d'étalonnage obtenus a été estimée à $\pm 3\%$. Elle pourra être réduite, par la suite, en augmentant la précision des mesures de réflectance au sol sur le site (augmenter le nombre de mesures de réflectance en utilisant plusieurs radiomètres visant le sol avec la même inclinaison et la même orientation que le satellite, par rapport au soleil), et en améliorant le modèle de transfert radiatif utilisé en introduisant, en particulier, l'effet directionnel du site dans le calcul. Par ailleurs, la comparaison de la méthodologie utilisée avec celle mise en oeuvre par l'équipe de Slater à White Sands, permettrait la mise en évidence d'éventuels écarts entre les coefficients d'étalonnage qui ne peuvent pas être imputés au capteur satellitaire (erreurs systématiques).

L'inter-comparaison des données provenant de différents capteurs satellitaires est affectée par de nombreux facteurs perturbateurs. Le premier est l'inter-étalonnage des capteurs, qui peut être réalisé en utilisant les images acquises le même jour lorsque les conditions atmosphériques sont favorables et stables. La bonne répétitivité temporelle des coefficients d'étalonnage et d'inter-étalonnage obtenus à l'issue de notre travail et leur bonne correspondance avec ceux obtenus par les autres équipes permettent de valider les méthodes utilisées. Les coefficients d'inter-étalonnage entre les capteurs SPOT-HRV et LANDSAT-TM sont très précis et applicables aux images acquises durant la période considérée. Par contre, l'inter-étalonnage des capteurs avec AVHRR nécessite des travaux supplémentaires car l'image AVHRR que nous avons utilisée correspondait à une visée très oblique (52° par rapport à la verticale).

Les autres facteurs qui affectent l'inter-comparaison des données satellitaires peuvent être rassemblés en deux groupes. Les premiers ont des influences linéaires, c'est-à-dire que la relation entre les valeurs numériques des images fournies par deux capteurs sera linéaire quand il n'y aura que ces seuls effets perturbateurs qui interviendront. Il s'agit de l'éclairement équivalent solaire au niveau du capteur, de la hauteur du soleil et de la distance terre-soleil. Les facteurs du deuxième groupe vont introduire des phénomènes de dispersion au niveau des données radiométriques. Ce sont l'effet de la FTM du capteur et les effets spectraux, directionnels, temporels, et topographiques. Les effets atmosphériques introduisent à la fois des perturbations de type linéaire (transmission atmosphérique, réflectance atmosphérique) et non linéaire (diffusion de l'environnement). Parmi ces effets, certains peuvent être corrigés comme tout les effets linéaires et les effets atmosphériques et topographiques. Mais, les autres comme les effets spectraux, directionnels et temporels sont difficiles à corriger, et nécessitent une analyse plus approfondie pour évaluer les erreurs introduites et chercher des méthodes permettant de les réduire.

L'effet de la FTM, qui est souvent ignoré par des utilisateurs, montre son importance quand on travaille sur une zone hétérogène. La correction peut conduire pratiquement

au doublement de la valeur numérique obtenue dans la bande XS3 du capteur SPOT1-HRV en mode multibande. Elle est cependant moins importante pour les bandes XS1 et XS2. Mais, si l'on considère les images panchromatiques de SPOT1-HRV, elle devient de nouveau très importante. Ainsi, pour les applications dans lesquelles on travaille au niveau des pixels d'une zone hétérogène que ce soit sur les valeurs absolues ou relatives, la correction de l'effet de la FTM est nécessaire.

La méthode de correction concernant la modification du spectre de l'image originale à deux dimensions en utilisant les valeurs de FTM du capteur considéré est très efficace. Mais deux problèmes se posent. Premièrement, nous ne disposons pas actuellement des valeurs exactes de la FTM correspondant à différentes fréquences spatiales pour les capteurs les plus utilisés: HRV de SPOT, TM de LANDSAT et AVHRR de NOAA, et il est nécessaire de les évaluer expérimentalement, dans le futur, à partir des données ces capteurs en orbite. Deuxièmement, l'utilisation des transformées Fourier est relativement complexe, et nécessite beaucoup de place de stockage pour le spectre (8 fois de la taille d'une image, soit 72 Mo pour le spectre d'une image de 3000 lignes sur 3000 colonnes). Il serait donc intéressant de comparer cette correction à celle qui serait fournie par un filtrage spatial à différentes dimensions et de tester la précision associée.

Nous avons analysé les différents facteurs qui peuvent affecter les données radiométriques acquises par un satellite et nous avons testé les méthodes qui permettent de les corriger (sauf les effets topographiques). Nous envisageons donc, à la suite de ce travail, de mettre au point une série de logiciels modulaires destinés à la correction de ces différents effets, et qui seraient introduits dans un système de traitement d'image. Cela devrait ainsi conduire à la fourniture de données satellitaires parfaitement corrigées et donc comparables. L'étape suivante pourrait consister alors à introduire de telles données dans un système expert d'interprétation de données de télédétection.

**LISTE DES PUBLICATIONS ET
DES PRIX OBTENUS**

LISTE DES PUBLICATIONS

A. Revues à comité de lecture

- 1 Gu X.F., Guyot G., Verbrugghe M., 1990; Analyse de la variabilité spatiale d'un site test - Exemple de la Crau (France). *Photo-interprétation* 90-1, Fasc. 5: 39-52
- 2 Guérif M., Gu X.F., Guinot J.P., 1991. Crop system characterization by multitemporal SPOT data in South East of France. *International Journal of Remote Sensing* (sous presse)
- 3 Gu X.F., Guyot G., Verbrugghe M., 1991; Evaluation of measurement errors on ground surface reflectance for satellite calibration. (accepté par *International Journal of Remote Sensing*)
- 4 Santer R., Gu X.F., Guyot G., Deuzé J., Devaux C., Vermote E., Verbrugghe M., 1991; Calibration on the test site "La Crau" (France). (soumis à *Remote Sensing of Environment*)
- 5 Guyot G., Gu X.F., Clastre P., 1991; Correction de la FTM sur les images de SPOT. (accepté par *Photo-Interprétation*)

B. Communications à des congrès

- 6 YANG K., GU X.F., 1985. (Contrôle de la qualité radiométrique des traitements photographiques des images LMSP), in *Proceedings of National Symposium of Sensitometry*, 1985. (en chinois).
- 7 GUERIF M., DELECOLLE R., GU X., GUINOT J.-P., JAPPIOT M., STEINMETZ S., 1988. Estimation de la biomasse et du rendement de cultures de blé dur à partir des indices de végétation SPOT. in *Proc. of the 4th Symposium of Signatures Spectral in Remote Sensing*, Aussois, Ed. ESA Publ. Div., 137-141.
- 8 GU X.F., GUINOT J.-P., GUERIF M., 1988. Crop system characterization by multitemporal SPOT data in South East of France, in *Proc. of the 8th EARSEL symposium*, CAPRI, pp 232-244.

- 9 Gu X.F., Guyot G., Verbrugghe M., 1990; Evaluation of measurement errors on the reflectance of "La Crau", the French SPOT calibration area. *In Proc. 10th EARSeL Symp.*, Toulouse, 5-8 June 1990, 121-134
- 10 Dinguirard M., Leroy M., Henry P., Guyot G., Gu X.F.; Radiometric intercalibration between SPOT and some other satellites. *International symposium on primary data acquisition*. ISPRS, June 24-29 1990. MANAUS BRAZIL.
- 11 Atzberger C., Guérif M., Gu X. F., 1991; Integration of routinely performed broadband pyr heliometric measurements into atmospheric correction models. *In Cinquième Coll. Int. Mesures Physiques et Signatures en Télédétection*, 14-18 Jan. 1991, Courchevel (France), ESA SP-319: 37-40.
- 12 Gu X.F., Guyot G., Verbrugghe M., 1991; Utilisation de l'opération ART*SPOT pour tester le modèle 5S et la FTM du satellite SPOT; *In Cinquième Coll. Int. Mesures Physiques et Signatures en Télédétection*, 14-18 Jan. 1991, Courchevel (France), ESA SP-319: 53-56.
- 13 Gu X.F., Verbrugghe M., Guyot G., 1991; Inter-étalonnage de SPOT1-HRV, LANDSAT-TM et NOAA11-AVHRR dans les domaines du visible et du proche infrarouge. *In Cinquième Coll. Int. Mesures Physiques et Signatures en Télédétection*, 14-18 Jan. 1991, Courchevel (France), ESA SP-319: 45-48.
- 14 Santer R., Deuzé J., Devaux C., Vermote E., Guyot G., Gu X.F., Verbrugghe M., Leroy M., 1991; Calibration on the test site "La Crau" (France). *In Cinquième Coll. Int. Mesures Physiques et Signatures en Télédétection*, 14-18 Jan. 1991, Courchevel (France), ESA SP-319: 77-80.

C. Mémoires de DESS et de DEA

- 15 GU X.F., 1987. Analyse et corrections des déformations sur des photographies aériennes infra-rouge couleur numérisées, Mémoire de D.E.S.S. de Télédétection (Méthodes et Applications), Université Paris VI, 45 p.
- 16 Gu X.F., 1988; Mise en relation des luminances mesurées par SPOT avec les réflectances de surfaces agricoles mesurées au sol. Mémoire de DEA de Méthodes Physiques en Télédétection, Université Paris VII : 88 pp

D. Rapports

- 17 KUEI Z. Y., GU X.F., 1984. (Conception et essais du système de "Large Scale Multispectral Photography"), Rapport final du contrat, 160 p., (en chinois).
- 18 Guérif M., Delecolle R., Gu X., Guinot J.-P., Jappiot M., Leblon B., Steinmetz S., 1987. Utilisation de la télédétection par satellite pour le suivi des cultures dans la basse vallée du Rhône. Rapport final Edtude N° 85 12637000 PLA, INRA Bioclimatologie Montfavet (France) : 53p.
- 19 Guyot G., GU X., Verbrugge M., 1990; Caractérisation des propriétés optiques du site de la Crau. Rapport final Marché N° 833/CNES/87/4891/00, INRA Bioclimatologie Montfavet (France) : 79p.
- 20 Santer R., Devaux C., Deuzé J. L., Guyot G., Gu X.F., Verbrugge M., 1990; Etalonnage de HRV (SPOT1) sur le site de La Crau. Rapport final du contrat CNES N° 833/89/5935/00, L.O.A de l'Université des Sciences et Techniques de Lille, et INRA Bioclimatologie Montfavet (France) : 58p.

PRIX OBTENUS

- 1985: Prix National du Commission Scientifique d'Etat de Chine, (attribué pour la mise au point un système de télédétection aéroporté "Large Scale Multispectral Photography System")
- 1990: Prix du meilleur papier d'étudiants dans la Dixième Symposium de l'EARSEL (Prix attribué pour l'article N° 9)

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- Algazi V.R., Ford G.E., 1981; Radiometric equalization of non periodic striping in satellite data. *Computer Graphics and Image Processing*, 16 (3): 287-295.
- Bartell R.J., 1987; Atmospheric correction for in-flight satellite radiometric calibration. Thesis of Master of Science, The University of Arizona.
- Bégni G., 1985; The radiometric calibration of the SPOT HRV sensors. *Acta Polytechnica Scandinavia* Ed. T. Friberg and Pirkko Oittinen. *Proc. Image Science*, 2:10-11.
- Bégni G., 1985; Definition détaillée des profils des bandes spectrales SPOT. Note interne CNES Toulouse
- Bégni G., 1988; SPOT image quality, Twenty months of experience. *Int. J. Remote Sens.*, 9(9): 1409-1414.
- Bégni G., Leroy M., Dinguirad M., 1986; SPOT radiometric resolution performance evaluation. Preliminary results. *Proceeding of SPIE*, 600: 77-82
- Begni G., 1985; The radiometric calibration of the SPOT HRV sensors. *Acta Polytechnica Scandinavia* Ed. T. Friberg and Pirkko Oittinen. *Proc. Image Science*, 2:10-11.
- Biggar S.F., Labed J., Santer R.P., Slater R.P., Jackson R.D., Moran M.S., 1988; Laboratory calibration of field reflectance panels. *Proceedings SPIE 924, Recent Advances in Sensors, Radiometry, and Data Processing for Remote Sensing*, 232-240
- Biggar S.F., Santer R.P., Slater P.N., 1990; Irradiance-based calibration of imaging sensors. *Proc. IGARSS 90, Washigton DC, May 1990* (in press)
- Bildgen P., Boulegue J., Geroyannis H., Gilg J. P., 1989; Essai d'utilisation simultanée des données Landsat MSS, TM et SPOT pour la comparaison des valeurs radiométriques des pixels. *Bul. S.F.P.T. n° 115* : 11-13
- Carnahan W. H., Zhou G., 1986; Fourier transform techniques for the evaluation of the Thematic Mapper line spread function. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 55(5) : 639-648.
- Caverel M., Courtois M., Weill G., 1981; The SPOT satellite Remote Sensing Mission. *Photogramm. Eng. and Remote Sensing*, 48 (8): 1163-1171.

- Chavez P. S. Jr., 1989; Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper Multispectral images. *Photogramm. Eng. Remote Sens*, 55(9) : 1258-1294.
- Che N., Jackson R.D., Phillips A.L., Slater P.N., 1985; Field measurement of reflectance factors. *Photogram. Eng. Remote Sensing*, 46: 643-647.
- Cicone R.C., Metzler M.D., 1984; comparison of landsat MSS, Nimbus-7 CZCS, and NOAA-7 AVHRR features for land-use analysis. *Remote Sens. Environ.* 14 : 257-265.
- Civco D. L., 1989; Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens*, 55(9) : 1303-1309.
- Colwell R. N., Poulton C. E., 1985; SPOT simulation imagery for urban monitoring : A comparison with Landsat TM and MSS imagery and with high altitude colour infrared photography. *Photogramm. Eng. Remote Sens*, 51(8) : 1093-1101.
- Crippen R. E., 1989; A simple spatial filtering outline for the cosmetic removal of scan-line noise from Landsat TM P-tape imagery. *Photogramm. Eng. Remote Sens*, 55(3) : 327-331.
- Crist E.P., Cicone R.C., 1984; Comparisons of the dimensionality and features of simulated landsat-4 MSS and TM data. *Remote Sens. Environ.* 14 : 235-246.
- Curran P.J., Hay A.M., 1986; The importance of measurement error for certain procedures in remote sensing at optical wavelengths. *Photogramm. Eng. Remote Sens*, 52(2) : 229-241.
- Curran P.J., Munday T.J., Milton E.J., 1981; A comparison between two photographic methods for the determination of relative bidirectional reflectance. *Int. J. Remote Sens.*, 2(2): 185-188.
- Curran P.J., Wilkinson W.B., 1985; Mapping the concentration and dispersion of dye from a long sea outfall using digitized aerial photography. *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 6(11) : 1735-1748.
- Curran P.J., Williamson H.D., 1985; The accuracy of ground data used in remote-sensing investigations. *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 6(10) : 1637-1651.
- Curran P.J., Williamson H.D., 1986; Sample size for ground and remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 20 : 31-41.
- Dagnelie P., 1970; *Théorie et méthodes statistiques vol 2*. Les presses Agronomiques de Gembloux, A.S.B.S.L., Ed. J. Duclot, S.A., Gembloux : 451p.
- Dave J.V., Bernstein R., 1982; Effect of terrain orientation and solar position on satellite-level luminance observations. *Remote Sens. Environ.* 12 : 331-348.

Deirmendjian D., 1964; Scattering and polarization properties of water clouds and hazes in the visibles and infrared. *Appl. Opt.*, 3: 187-196.

Desachy J., Begni G., Boissin B., Perbos J., 1985; Investigation of Landsat-4 Thematic Mapper line-to-line and band-to-band registration and relative detector calibration. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 51(9) : 1291-1298.

Deschamps P. Y., Herman M., Tanré D., 1983; Modélisation du rayonnement solaire réfléchi par l'atmosphère et la terre, entre 0,35 et 4 μm . Rapport du contrat ESA 4369/80/F/DD(SC), 188pp.

Deuzé J. L., Herman M., Santer R., 1987; Modélisation de l'état de polarisation du rayonnement atmosphérique ascendant. Partie 1 Atmosphère limitée par un sol lambertien. Rapport contrat CNES.

Deuzé J. L., Herman M., Santer R., 1989; Fourier series expansion of the transfer equation in the atmosphere-ocean system. *J. Quant. Spectrosc. Transfer*, 41: 483-494.

Dinguirard M., Briottet X., 1989; Bilan d'étalonnage absolu SPOT1. Troisième bilan semestriel. *Rapport CNES S-NT-OB1-561-CN*

Dinguirard M., Leroy M., Henry P., Guyot G., Gu X. F.; Radiometric intercalibration between SPOT and some other satellites. International symposium on primary data acquisition. ISPRS June 24-29 1990. MANAUS BRAZIL.

Dinguirard M., Maisonneuve J.M., 1980; Description du dispositif d'étalonnage absolu de la caméra HRV. *Rapport CNES Toulouse (France) S-NT-OB1-0090-CN*.

Dozier J. Frew J., 1981; Atmospheric corrections to satellite radiometric data over rugged terrain. *Remote Sens. Environ.* 11 : 191-205.

Duggin M.J., 1980; The field measurement of reflectance factors. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 46 : 643-647

Duggin M.J., 1983; The effect of irradiance and reflectance variability on vegetation condition assessment. *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 4(3) : 601-608.

Duggin M.J., Cunia T., 1983; Ground reflectance measurement techniques : A comparison. *Appl. Optics* 23 : 3771-3777.

Eliason P.T., Soderblom L.A., Chavez Jr. P. S., 1981; Extraction of topographic and spectral albedo information from multispectral images. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 48(11) : 1571-1579.

Emori Y., Yasuda Y., Saito G., 1983; Yield estimation of sugar beets by infrared aerial color photography. 2^{ème} Coll. Int. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection,

Bordeaux 12-16 sept 1983, les Colloques de l'INRA N° 23, Ed INRA Publ. Paris : 175-184.

Exotech Inc., 1980; Model 100-AX Hand-held radiometer. 1200 Quince Orchard Blvd., Gaithersburg; MD 20760, USA.

Fraser R. S., Kaufman Y., 1986; Calibration of satellite sensors after launch. *Appl. Optics* 25(7) : 1171-1185.

Frölich C., Brusa R.W., 1981; Solar radiation and its variation in time. *Solar Physics*, 74: 209-215.

Frouin R., Gautier C., 1987; Calibration and NOAA-7 AVHRR, GEOS-5, and GEOS-6 VISSR/VAS solar channels. *Remote Sens. Environ.* 22 : 73-101.

Gordon H. R., 1987; Calibration requirements and methodology for remote sensors viewing the ocean in the visible. *Remote Sens. Environ.* 22(1) : 103-126

Grunblatt J., 1987; An MTF analysis of Landsat Classification error at field boundaries. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 53: 639-643

Guenther B., 1990; Results from the NASA ER-2 aircraft experiment at White Sands, N.M.; Meeting on radiometric calibration of satellite sensors of reflected solar radiation, NOAA/NESDIS, March 27-28, 1990.

Guyot G., 1980; Analysis of factors acting on 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., 1983; Variabilité angulaire et spatiale des données spectrales dans le visible et le proche infrarouge. 2^{ème} Coll. Int. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Bordeaux 12-16 sept 1983, les Colloques de l'INRA N° 23, Ed INRA Publ. Paris : 27-44.

Guyot G., 1988; Dispositif utilisé à l'INRA pour les mesures radiométriques aéroportées. In *Actes du Séminaire de Monétier-les-Bains, 12-16 Janvier 1987. INRA Projet Télédétection : 92-97*

Guyot G., 1988; Les mesures radiométriques de terrain. In *Actes du Séminaire de Monétier-les-Bains, 12-16 Janvier 1987. INRA Projet Télédétection : 65-91.*

Guyot G., 1989; Les signatures spectrales des surfaces naturelles. *Télédétection Spatial n°5, Paradigme, Caen (France), 178 pp*

Guyot G., GU X., Verbrughe M., 1989; Caractérisation des propriétés optiques du site de la Crau. Rapport intermédiaire Marché N° 833/CNES/87/4891/00, INRA Bioclimatologie Montfavet (France) : 116p.

Guyot G., GU X., Verbrugge M., 1990; Caractérisation des propriétés optiques du site de la Crau. Rapport final Marché N° 833/CNES/87/4891/00, INRA Bioclimatologie Montfavet (France) : 79p.

Guyot G., Guyon D., Riom J., 1989; Factors affecting the spectral response of forest canopies, a review. *Geocarto International* 3 : 3-18.

Guyot G., Hanocq J.F., Buis J.P., Saint G., 1984; Mise au point d'un radiomètre de simulation de SPOT. In C.R. 2e Coll. Intl. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Bordeaux, 12-16 septembre 1983 (Ed. INRA Publ.), Les Colloques de l'INRA N° 23 : 233-242

Guyot G., Hanocq J.F., Lepine T., Verbrugge M., 1984; Etude expérimentale de la variabilité spatiale et temporelle de couverts de céréales. 2^{eme} Coll. Int. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Bordeaux 12-16 sept 1983, les Colloques de l'INRA N° 23, Ed INRA Publ. Paris :219-231.

Guyot G., Malet P., Baret F., 1980; Analyse des indicatrices de réflexion de l'orge et du blé; Possibilités de la stéoradiométrie. 14th Congress of International Society of Photogrammetry. Hamburg (RFA). 1980/07/13-26. *Int. Arch. Photogram.* V 23, n° 10, p. 614-619

Hatfield J.C., Kanemasu E.T., Asrar G., Jackson R.D., Pinter P.J., Reginato R.J., Idso S.B., 1985; Leaf area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat. *Int. J. Remote Sens.*, 6(2) : 167-175.

Herman M. et al. 1986; Stratospheric aerosols observation from a balloon-borne polarimetric experiment. *Appl. Optics* 25: 3573-3584.

Holben B.N. et al., 1990; NOAA-11 AVHRR visible and near-IR in-flight calibration. *Int. J. Remote Sens.* 11: 1511-1519

Horn B.K.P., Woodham R.J., 1979; Destriping LANDSAT MSS images by histogram modification. *Computer Graphics and Image Processing*, 10: 69-83.

Hugli H., Frei W., 1983; Understanding anisotropic reflectance in mountainous terrain. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 49(5) : 671-683.

Iqbal M., 1983; An introduction to solar radiation. Academic Press 1983.

Jackson R.D., Moran M.S., Slater P.N., Biggar S.F., 1987; Field calibration of reference réflectance panels. *Remote Sens.- Environ.* 22 : 145-158

Jackson R.D., Robinson B.F., 1985; Field evaluation of the temperature stability of a multispectral radiometer. *Remote Sens. of Environ.*, 17 : 103-108

- Junge C.E., 1955; The size distribution and aging of natural aerosols as determined from electrical and optical data on the atmosphere. *J. Meteor.*, 12: 13-25.
- Junge C.E., 1963; *Air Chemistry and Radioactivity*. Academic Press, Inc. New York, 382pp.
- Justice C. O., Markham B. L., 1989; Spatial degradation of satellite data. *Int. J. Remote Sens.*, 10(9) : 1539-1561.
- Justus C.G., 1989; An operational procedure for calibrating and assessing the stability and accuracy of shortwave satellite sensors. *NOAA cooperative agreement NA84AA-H-00010*, November 1989
- Kastner C.J., 1985; In-flight absolute radiometric calibration of the LANDSAT Thematic Mapper. Ph.D. Dissertation. The University of Arizona.
- Kautsky J., Nichols N.I., Jupp D.L.B., 1984; Smoothed Histogram Modification for Image Processing/ Compute Vision, Graphics, and Image Processing, 26: 271-291.
- Kawata Y., Ueno S., Kusaka T., 1988; Radiometric correction for atmospheric and topographic effects on the Landsat MSS images. *Int. J. Remote Sens.*, 9(4): 729-748.
- Kieffer H. H., Cook D. A., Eliason E. M., Eliason P. T., 1985; Interband radiometric performance of the Landsat Thematic Mappers. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 51(9) : 1331-1350.
- Kieffer H. H., Wildey R. L., 1985; Absolute calibration of Landsat instruments using the Moon. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 51(9) : 1391-1393.
- Kimes D.S., Kirchner J.A., 1982; Irradiance measurement errors due to the assumption of a lambertian reference panel. *Remote Sens.- Environ.* 12 : 141-149
- Kimes D.S., Kirchner J.A., Newcomb W. W., 1983; Spectral radiance errors in remote sensing ground studies due to nearby objects. *Appl. Optics* 22. 8.
- King M.D., Byrne D.M., 1976; A method for inferring total ozone content from the spectral variation of total optical depth obtained with a solar radiometer. *J. Atmos. Sci.*, 33: 2242-2251.
- King M.D., Byrne D.M., Herman B.M., Reagan J.A., 1978; Aerosol size distribution obtained by inversion of spectral optical depth measurements. *J. Atmo. Sci.*, 35: 2153-2167.
- Le Men H., 1988; Correction d'éclaircissement et calibration absolue des images SPOT; Effets de stéréoradiométrie. *Journées télédétection, Images satellite et milieux terrestres en régions arides et tropicales*. 14-17 novembre 1988 Bondy (France) : 51-55.

Lenoble J., 1986; Le rayonnement solaire. *Cours de maitrise de physique, Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois* (France).

Leroy M., 1990; Modèles des systèmes de mesures imageurs optiques. *In Ecole d'été en Télédétection Spatiale: spectrs physiques et modélisation*, Août 1988, Toulouse, CEPADUES Ed. (France): 311-363

Leroy M., Henry p., Genther B., McLean J., 1990; Comparaison of CNES Spherical and NASA Hemispherical Large Aperture Integrating Sources: II. Using the SPOT-2 satellite instruments. *Remote Sens. Environ.* 31 (2) : 97-104

Leshkevich G. A., 1988; Goniometric measurements of a spray-painted barium sulfate reference panel. *Remote Sens. Environ.* 24 : 287-296

Leshkevich G. A., 1988; Non-lambertian reference panel effect on spectral reflectance measurements of freshwater ice. *Int. J. Remote Sens.*, 9(4): 825-832.

London J., Bojkov R. J., Oltmans S., Kelley J. L., 1976; Atlas of the global distribution of total ozone July 1957-June 1967. NCAR Technical Note No 113+STR

Lord D., Desjardins R.L., Dubé P.A., Brach E.J., 1985; Variation of crop canopy spectral reflectance measurements under change sky conditions. *Photogramm. Eng. and Remote Sens.*, 51 : 689-695

Maracci G., Andreoli G., Grassi P., Hosgood B., Verbrugge M., 1986; Analysis of multi-level measurements of spectral signatures for less favoured areas. In *Proc. 3rd. Int Coll. Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Les Arcs (France) 16-20 Dec. 1985*. Ed. ESA Paris, ESA SP-247 : 361-364.

Maracci G., Tassone G., Toselli F., 1981; The use of a reference panel in the visible and thermal multispectral scanners. *Coll. Int. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection*, Avignon 8-11 sept 1981, les Colloques de l'INRA N° 5, Ed. INRA Publ. Paris : 165-172

Metzler M. D., Malila W. A., 1985; Characterization and comparison of Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper data. *Photogramm. Eng. Remote Sens*, 51(9) : 1315-1330.

Milton E.J., 1981; Does the use of two radiometers correct for irradiance changes during measurements ? *Photogramm. Eng. and Remote Sens.*, 8 : 1223-1225

Murphy J. M., Ahern F. J., Duff P. F., Fitzgerald A. J., 1985; Assessment of radiometric accuracy of Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper data products from Canadian Production Systemms. *Photogramm. Eng. Remote Sens*, 51(9) : 1359-1369.

Palmer J.M., 1982; Field standards of reflectance. *Photogramm. Eng. Remote Sens*,

48(10) : 1623-1625.

Paltridge G.W., Platt C.M.R., 1977; Radiative Processes in Meteorology and Climatology, Development in Atmospheric Science, 5, Elsevier Scientific Publishing Company, New-York, N.Y. 10017.

Peli T., Verly J.G., 1983; Digital Line-artifact Removal. *Optical Engineering*, 22(4): 479-484.

Price J.C., 1987a; Calibration of satellite radiometers and the comparison of vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 21 : 15-27

Price J.C., 1987b; Radiometric calibration of satellite sensors in the visible and near infrared: history and outlook. *Remote Sens. Environ.* 22 : 3-9

Proy C., 1986; Intégration du relief au traitement d'image de télédétection. *Thèse de Docteur-Ingénieur* de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 173pp.

Ranson K. J., Daughtry C. S. T., Biehl L. L., 1986; Sun angle, view angle, and background effects on spectral response of simulated balsam fir canopies. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 52(5) : 649-658.

Robinove C.J., 1982; Computation with physical values from Landsat digital data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 48(5) : 781-784.

Robinson B.F., Bauer M.E., De Witt D.P., Silva L.F., Vanderbilt V.C. 1979; Multiband radiometer for field research. *Proc. SPIE*, 196: 8-15.

Robinson B.F., Biehl L.L., 1979; Calibration procedure for measurement of reflectance factor in remote sensing field research. *Proc. 23rd Annual Intl. Tech. Symp., SPIE, Bellington, Washington, 196: 16-26.*

Rohde W.G.Lo.J.K., Pohl R.L., 1978; EROS Data Center Landsat digital enhancement techniques and imagery availability. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8: 63-76.

Rouquet M.C., 1987; Faisabilité de la calibration HRV-SPOT sur des cibles tests. *Rapport Contrat CNES Toulouse (France)*, 833/CNES/87/4891/00.

Royer A., Charbonneau L., Brochu R., Murphy J. M., Teillet P. M., 1987; Radiometric comparaison of the LANDSAT-5 TM and MSS sensors. *Int. J. Remote Sens.*, 8(4): 579-591.

Santer R., 1984; Caractérisation des aérosols à partir de la polarisation du rayonnement solaire diffusé. Application aux atmosphères de la Terre, de Vénus et de Saturne. *Thèse d'Etat, Lille.*

Santer R., Deuzé J., Devaux C., Vermote E., Guyot G., Gu X.F., Verbrugge M., Leroy M., 1991; Calibration on the test site "La Crau" (France). In Cinquième Coll. Int. Mesures Physiques et Signatures en Télédétection, 14-18 Jan. 1991, Courchevel (France) Ed. ESA Publ. Div. (sous presse).

Santer R., Devaux C., Deuzé J. L., Guyot G., Gu X., Verbrugge M., 1990; Etalonnage de HRV (SPOT1) sur le site de La Crau. Rapport final du contrat CNES N° 833/89/5935/00, L.O.A de l'Université des Sciences et Techniques de Lille, et INRA Bioclimatologie Montfavet (France) : 58p.

Schowengerdt R. A., Archwamety C., Wrigley R. C., 1985; Landsat Thematic Mapper image-derived MTF. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 51(9) : 1395-1406.

Singh A., 1985; Thematic Mapper radiometric correction research and development results and performance. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 51(9) : 1379-1383.

Slater P., 1990; Spectral responses and new results of the absolute calibration of NOAA-11, LANDSAT-5, SPOT-1. *Private communication.*

Slater P.N., 1985; Radiometric considerations in remote sensing. *Proc. IEEE* 73(6) : 997-1011

Slater P.N., 1989; The calibration of SPOT-1, HRV-1 at Maricopa Agricultural Center, Arizona on 12 August, 1989. *Report Optical Sciences Center*: 8p

Slater P.N., Biggar S.F., Holm R.G., Jackson R.D., Mao Y., Moran M.S., Palmer J.M., Yuan B., 1986; Absolute calibration of the Thematic Mapper. *SPIE* 660 : 2-8.

Slater P.N., Biggar S.F., Holm R.G., Jackson R.D., Mao Y., Moran M.S., Palmer J.M., Yuan B., 1987; Reflectance and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors. *Remote Sens. of Environ.*, 22 : 11-37

Slater P.N., Doyle F.J., Fritz N.L., Welch R., 1983; Photographic systems for remote sensing. *Manual of remote sensing*, second edition, American Society of Photogrammetry : 231-291

Slater P.N., Gellman D.I., 1990; *Communication personnelle.*

SPOT IMAGE., 1986; *Guide des utilisateurs des données SPOT*

Srinivasan A., Richards J. A., 1990; Knowledge-based techniques for multi-source classification. *Int. J. Remote Sens.*, 11(3): 505-525.

Tanré D., Deroo C., Duhaut P., Herman M., Morcrette J. J., Perbos J., Deschamps P. Y., 1990; Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: The 5S code. *Int. J. Remote Sens.*, 11(4): 659-668.

- Tanré D., Deroo C., Herman M., Morcrette J. J., Perbos J., Deschamps P. Y., 1986; Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum. User's guide, L.O.A. Lille: 264p.
- Tanré D., Herman M., Deschamps P.Y., 1981; Influence of the background contribution upon space measurements of ground reflectance. *Applied Optics*. 20 : 3676-3684.
- Tanré D., Herman M., Deschamps P.Y., de Lefte A., 1979; Atmospheric modelling for space measurements of ground reflectances, including bidirectional properties. *Appl. Optics* 18(21) : 3587-3594
- Teillet P. M., Slater P. N., Ding Y., Santer R. P., Jackson R. D., Moran M. S., 1990; Three methods for the absolute calibration of the NOAA AVHRR sensors in-flight. *Remote Sens. Environ.* 31 (2) : 105-120.
- Valério C., Llebaria A., 1982; A quantitative multispectral analysis system for aerial photographs applied to coastal planning. *Int. J. Remote Sens.*, 3(2) : 181-197.
- Verbrugge M., Lecomte P., 1990; Mesure de la réponse directionnelle d'un panneau de "Spectralon", INRA Bioclimatologie 84140 Montfavet (France) Note interne
- Vermote E., 1990; Effets d'atmosphère en télédétection. Thèse Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois (France).
- Webster R., Curran P.J., Munden J.W., 1989; Spatial correlation in reflected radiation from the ground and its implications for sampling and mapping by ground-based radiometry. *Remote Sens. Environ.* 29 : 67-78.
- Weinman J.A., Twilley J.T., Browning S.R., Herman B.M., 1975; Derivation of phase function from multiple scattered sunlight transmitted through a hazy atmosphere. *J. Atm. Sci.* 32: 577.
- Westin T., 1990; Filters for removing coherent noise of period 2 in SPOT imagery. *Int. J. Remote Sens.*, 11(2): 351-357.
- William A.M., David M.A., 1986; Satellite data availability and calibration documentation for land surface climatology studies. Rapport final: ISLSCP Report No. 5
- Yamamoto G., Tanaka M., 1969; Determination of aerosol size distribution from spectral attenuation measurements. *Appl. Opt.*, 8: 447-453.

ABSTRACT

The absolute calibration of satellite sensors and the development of intercomparison methods, are necessary for quantitative image analysis. A review of the literature shows that these two problems are little addressed. Moreover the corrections of instrumental effects that are usually done, do not take into account the influence of the modulation transfer function (M.T.F.) which introduces large modifications of image digital counts. These three problems are discussed in this thesis.

In order to have good accuracy for satellite calibration and intercalibration, we have selected and validated a test site (La Crau sèche, south-east of France) using ground level and airborne radiometric measurements and SPOT images. For the ground level measurements we have developed a methodology minimizing the errors on bidirectional reflectance. We have also validated experimentally the 5S atmospheric code, used for the simulation of the signal at the satellite level. The calibration coefficients of the satellite were determined with less than 3% error with data simulated from ground level measurements (for reflectance and atmospheric characteristics) and digital counts of the test site images.

The intercalibration of the sensors SPOT-HRV, LANDSAT-TM and NOAA-AVHRR is based on data obtained on the same day from the test site. The methodologies developed and validated give stable results comparable to those obtained by other research teams in the world. Moreover the different factors affecting the intercomparison of images corresponding to different sensors are discussed and their relative weight is analysed. Finally, the M.T.F. effects on SPOT-HRV images are experimentally established and a correction method is proposed and validated.

Key words: Satellite, SPOT-HRV, LANDSAT-TM, NOAA-AVHRR, Calibration, intercalibration, radiometry, modulation transfer function.

Thèse de Doctorat de l'Université PARIS VII

spécialité : Méthodes Physiques en Télédétection

par : Xingfa GU

Titre: **Etalonnage et intercomparaison des données satellitaires
en utilisant le site test de la Crau**
(Appliqué aux images SPOT1-HRV, LANDSAT5-TM, NOAA11-AVHRR)

Résumé

L'étalonnage absolu des capteurs satellitaires et la mise au point de méthodes d'intercomparaison de leurs données, sont indispensables pour les analyses qualitatives des images. La bibliographie montre que ces deux problèmes ont été peu abordés. Par ailleurs, les corrections actuelles des effets instrumentaux ne tiennent pas compte de la fonction de transfert de modulation (F.T.M.) qui modifie les données numériques des images. Ces trois problèmes sont abordés dans cette thèse.

Afin d'avoir une bonne précision sur l'étalonnage et l'inter-comparaison des données satellitaires, nous avons défini un site test (la Crau sèche, Sud-Est de la France). Notre choix a été validé à partir de mesures radiométriques au sol et aéroportées et d'images SPOT. Les mesures au sol nous ont amenées à mettre au point une méthodologie de mesure de la réflectance bidirectionnelle qui minimise les erreurs. Nous avons également validé expérimentalement le modèle de transfert atmosphérique 5S, permettant de simuler le signal au niveau du satellite. Le signal simulé à partir de mesures au sol (réflectance et caractéristiques de l'atmosphère) et les données numériques des images du site nous ont permis de déterminer les coefficients d'étalonnage avec une incertitude de 3%.

L'inter-étalonnage des capteurs SPOT-HRV, LANDSAT-TM, NOAA-AVHRR, s'appuie sur des images acquises le même jour sur le site test. Les méthodologies développées et validées fournissent des résultats stables et comparables à ceux obtenus par d'autres équipes dans le monde. Par ailleurs, les différents facteurs affectant l'intercomparaison des images acquises par des capteurs différents, sont discutés et leur poids relatif est analysé. Enfin, les effets de la F.T.M. sur les images de SPOT-HRV ont été mis en évidence expérimentalement et une méthode de correction est proposée et validée.

Mots clés : satellite, SPOT-HRV, LANDSAT-TM, NOAA-AVHRR, étalonnage, inter-étalonnage, radiométrie, fonction de transfert de modulation.

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
I. N. R. A.
Station de Recherches
B.P. 91 - Domaine de St. Maurice
64143 MONTAUDAN Cedex
FRANCE