

INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON

TH

EB 174

Revue  
SOLS-17

**Dominique COURAULT**

**ETUDE DE LA DEGRADATION  
DES ETATS DE SURFACE DU SOL  
PAR  
TELEDETECTION**

**Analyses spectrales, spatiales et diachroniques**



DECEMBRE 1989

Cet ouvrage, a fait l'objet d'une  
thèse de Doctorat  
soutenue le  
3 octobre 1989  
à l'université de PARIS VI

Le jury était composé de MM :

G.PEDRO (INRA)  
J.CHOROWICZ (PARIS VI)  
B.SEGUIN (INRA)  
J.BOIFFIN (INRA)  
M.POUGET (ORSTOM)  
M.C.GIRARD (INA-PG)

## REMERCIEMENTS

*Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de Sciences du Sol de l'Institut National Agronomique de Grignon dirigé par Monsieur CALVET. Je le remercie pour son accueil, et les moyens qu'il a mis à ma disposition pour conduire à terme cette étude.*

*Je tiens à remercier en premier lieu les personnalités scientifiques qui m'ont fait l'honneur de siéger dans le jury de cette thèse.*

*Monsieur Georges PEDRO, Directeur de recherches à l'INRA de Versailles, il a bien voulu m'accueillir en DEA et me permettre de poursuivre cette étude en thèse. Il a toujours veillé au bon déroulement de ce travail. Qu'il me soit permis ici de lui exprimer toute ma reconnaissance.*

*Monsieur CHOROWICZ, Professeur à l'Université de Paris VI, spécialiste en télédétection sur les roches et minéraux, a montré de l'intérêt à ce travail, je le remercie de sa participation à ce jury en tant que rapporteur.*

*Monsieur Bernard SEGUIN, Directeur de recherches à l'INRA d'Avignon, je le remercie vivement d'avoir accepté d'être rapporteur de ce jury. Ses remarques et critiques constructives m'ont aidé à clarifier ce manuscrit.*

*Monsieur Marcel POUGET, Directeur de recherches à l'ORSTOM, m'a toujours encouragé et soutenu pour ce travail. Je le remercie de m'avoir fait participer à diverses réunions et groupes de travail à l'ORSTOM qui m'ont permis de rencontrer d'autres équipes avec lesquelles j'ai pu beaucoup apprendre en matière de traitements de données en télédétection.*

*Monsieur Jean BOIFFIN, Directeur de recherches à l'INRA, a montré dès le début de ce travail son intérêt pour ces nouvelles approches de la surface du sol par télédétection. Il a suivi mon travail avec attention. Sur le terrain, j'ai pu profiter de son expérience et de ses observations. Ses critiques ou remarques quant aux expérimentations effectuées ont toujours été très intéressantes. Qu'il en soit vivement remercié.*

*Monsieur Michel-Claude GIRARD, Maître de conférence à l'INA P-G, a joué un rôle primordial dans ce travail. Il a été le directeur scientifique du projet. Je lui suis profondément reconnaissante de la disponibilité et de la confiance qu'il a eu à mon égard. Grâce à lui, j'ai pu participer à des colloques et réunions de travail au cours desquelles j'ai pu avoir des échanges scientifiques tout à fait fructueux. Il a toujours été prêt à discuter, m'aider et m'encourager en proposant des idées nouvelles. Je lui exprime toute ma gratitude.*

*Cette thèse se situe dans le prolongement d'une étude sur le comportement spectral des états de surface, commencée lors du DEA de Pédologie en 1986. Ces travaux s'insèrent dans le cadre de deux ATP financées par divers organismes dont le CNES et l'INRA.*

*Ce travail a pu être mené à son terme grâce au soutien et à l'aide de nombreuses personnes qu'il m'est agréable de remercier ici :*

*C'est pour moi, un réel plaisir de rappeler l'aide et le soutien de l'équipe sympathique de Marcel Jamagne (SESCPF, Orléans) avec laquelle j'ai commencé mon travail sur les états de surface, lors de mon DEA. Par la suite j'ai eu souvent besoin de leur conseil et compétence. Leur enthousiasme m'a beaucoup encouragé et je les remercie vivement. Je pense en particulier à D.ARROUYAIS, D. KING, J.DAROUSSIN, J.GAILLARD...pour leurs précieux conseils.*

*La collaboration avec Richard ESCADAFAL (ORSTOM) a été très fructueuse. Toujours prêt à proposer des idées originales, il m'a beaucoup motivé pour ce travail. Je suis heureuse de lui témoigner ma sincère amitié.*

*Je remercie Monsieur STENGEL de m'avoir intégrée dans leur équipe sympathique pour l'expérience d'Avignon. La collaboration amicale avec Patrick BERTUZZI a été particulièrement efficace. Je lui suis profondément reconnaissante pour son aide et ses conseils pertinents qui m'ont fait beaucoup progresser dans ce travail.*

*En ce qui concerne les mesures effectuées au laboratoire, je remercie Messieurs PROST, DUCAROIR et TESSIER (INRA, Versailles) de leurs conseils et du matériel qu'ils ont mis à ma disposition pour mener à bien ces expériences. Je remercie Madame ABEAUMONT pour sa disponibilité et son aide lors des mesures d'humidité des sols.*

*C'est grâce aux discussions animées que j'ai eue avec Madame BONIFACE que j'ai mieux appris à connaître les 42 parcelles de Versailles. Je lui exprime toute ma gratitude.*

*Sur le terrain, j'ai pu bénéficié de l'aide précieuse de Micheline EIMBECK qui m'a initié aux mesures selon les méthodes de BOIFFIN et fait part de ses connaissances sur les différents sites du Pays de Caux. Je la remercie chaleureusement. Christine LE SOUDER et Joel MICHELIN ont pris également une part active à ces mesures dans l'Aisne et dans l'Oise, parfois sous des conditions difficiles, je leur témoigne ici ma sincère amitié.*

*Pour le traitement d'images, je remercie l'équipe de télédétection de Bioclimatologie de Grignon, Messieurs BOISSARD, VALERY et BELLUOMO pour leur disponibilité et compétence pour répondre à toutes mes questions.*

*Les problèmes d'informatiques, traitements statistiques..ont été résolus pour la plupart grâce à l'aide efficace de J.GAILLARD (SESCPF, Orléans), P.ROBIN (Bioclimatologie, Grignon) C.DUBY (Mathématique, INAPG), J-M GILLIOT. Les dérangeant sans cesse, ils ont toujours répondu avec gentillesse, je les remercie chaleureusement.*

*Je remercie Madame GIRARD de l'intérêt qu'elle a porté à mon travail, elle a bien voulu relire ce texte, ses remarques et conseils m'ont beaucoup aidé. L.M BRESSON, B.FOURNIER et Y. PEYRE ont toujours été prêt à répondre à mes questions, discuter ou m'expliquer certains points en me fournissant les documents nécessaires. Je leur exprime toute ma gratitude.*

*Enfin ce document doit beaucoup à la qualité des dessins réalisés par Jean-Christophe CARLE qui patiemment a fait et refait la plupart des illustrations. Je lui suis particulièrement reconnaissante. Je n'oublie pas Madame OHEIX qui par son dévouement et sa gentillesse m'a beaucoup aidé et encouragé.*

*Je termine par tous ceux qui m'ont témoigné de leur profonde amitié. Certains ont participé aux collages, découpages et corrections..leurs soutiens et encouragements ont été un grand réconfort . Merci à Paul, Suliman...les autres se reconnaîtront...*



## SOMMAIRE

### **Chapitre 1 : Dégradation structurale de la surface du sol et télédétection**

- I. Dégradation structurale de la surface du sol
  - A. Définition et conséquences agronomiques
  - B. Etude des mécanismes et description
  
- II. Comportement spectral des sols: quelques rappels des principes en télédétection
  - A. Les principales mesures utilisées
  - B. Les facteurs de variations des mesures spectrales
  - C. Relation rugosité- réflectance

### **Chapitre 2: Effet des facteurs intrinsèques du sol sur la réflectance ( étude faite sur des échantillons au laboratoire)**

- A. Expérimentation
- B. Résultats: Etude des relations réflectance- constituants- couleur- humidité

### **Chapitre 3: Suivi de la dégradation structurale de la surface du sol par la réflectance (Etudes faites sur des sites expérimentaux)**

- I. Suivi de la dégradation structurale de la surface du sol sous pluies simulées.  
Variation des facteurs extrinsèques, (Expérience d'Avignon)
  - A. Description du dispositif expérimental
  - B. Résultats: Quantification des phases de BOIFFIN: Elaboration d'un modèle de référence
  
- II. Suivi de la dégradation structurale de la surface sous pluies naturelles.  
Variations des facteurs intrinsèques.(Expériences de Grignon et de Versailles)
  - A. Variation de la rugosité initiale, expérience des placettes artificielles de Grignon
  - B. Variation de la couleur et de la composition , Expérience des 42 parcelles

### **CHAPITRE 4: Extension des observations et mesures de surface à des parcelles agricoles, analyse spatiale des états de surface**

- A. Présentation des sites étudiés et expérimentation
- B. Résultats: Observations et mesures de surface sur des parcelles agricoles
- C. Analyse spatiale, évolution dans le temps et dans l'espace des états de surface

**Bilan de l'étude**  
**Conclusion générale**

## RESUME

Cette étude présente une nouvelle approche pour la caractérisation des états de surface du sol par télédétection. Les états de surface se situent à l'interface sol-atmosphère et sont le siège d'interactions importantes.

Les modifications qu'ils subissent telle que la dégradation structurale sous l'action des pluies conditionnent le comportement du sol vis à vis de l'eau (infiltration, ruissellement..). La battance est un exemple extrême d'un état de la surface qui peut conduire à des phénomènes d'érosion importants dans certaines régions.

La télédétection est un moyen de suivre ces modifications de surface sans perturber l'état structural et d'obtenir des mesures précises à différentes échelles.

Le rôle des principaux facteurs intervenant sur la réponse spectrale des sols a été observé au laboratoire sur des échantillons variés.

- les facteurs stables dans le temps sont essentiellement ceux liés à la composition minéralogique du sol. La matière organique et le fer diminuent la réflectance, le calcaire augmente la réflectance.

- les facteurs évolutifs ou cours de l'année, sont l'humidité et la rugosité.

La couleur dépendant de ces deux types de facteurs, a un rôle important.

Sur le terrain, on s'est intéressé essentiellement au facteur rugosité, par des mesures radiométriques. On a suivi l'évolution de surfaces rugueuses jusqu'à des surfaces lisses battantes pour diverses situations. Un modèle entre la réflectance et le stade de dégradation de la surface a été défini sous des conditions d'humidité et d'éclairement bien déterminées.

Les diverses relations mises en évidence au laboratoire et sur le terrain permettent de mieux interpréter les images satellitaires. On a complété l'analyse du contenu des plages homogènes par l'analyse du contenant (formes et limites des plages).

La faible résolution des images Spot et la répétitivité dans le temps permettent un suivi des phénomènes d'érosion.

## ABSTRACT

This study presents a new approach in characterizing landsurface by Remote Sensing.

Changes undergone by different forms of landsurface like degradation of the soil structure by the action of rainfall, affect the behavior of the soil with respect to water (infiltration, run-off..)

The use of Remote Sensing is one of the ways used in monitoring changes in the land surface without disturbing the structural state but at the same time obtaining correct measurements at different scales.

The role played by the principal intervening factors on the spectral behavior by different soil samples was studied in laboratory.

- the stable factors in time, soil organic matter and iron decrease the reflectance while limestone has an opposite effect on reflectance.

The soil colour is an important parameter for the shape of the spectral curves.

In the field, one is essentially interested of the surface through radiometric measurements. We monitored the evolution of the rough surfaces to the slacking surfaces for different situations. A model between the reflectance and the state of soil degradation was defined under specific conditions of soil moisture and illumination.

The various relationships which have been shown both in the laboratory and in the field permit the interpretation of satellite images and the monitoring of the phenomenon of erosion.

## INTRODUCTION

Les phénomènes de battance et d'érosion sont des problèmes préoccupants dans certaines régions limoneuses du nord de la France. Pour comprendre et observer ces phénomènes, la notion d'*état de surface* est primordiale. En effet, l'aptitude au ruissellement est fortement dépendante de la surface du sol (COLLINET et al, 1979).

ESCADAFAL (1989) donne la définition suivante d'un état de surface : c'est la composition et l'organisation de la surface à un instant donné (la surface du sol étant définie comme le volume de transition sol-atmosphère). Il définit un sous ensemble : les états de surface élémentaires : plages d'un état de surface qui peuvent être caractérisés au niveau macroscopique. Cette subdivision n'est pas suffisamment explicite, (les plages ne sont pas forcément homogènes) on préfère une définition plus générale en conservant une seule notion : On propose de définir l'état de surface d'un sol comme le résultat d'interactions complexes entre d'une part les caractéristiques physiques et chimiques des horizons superficiels et profonds, et d'autre part, les travaux agricoles et les évènements climatiques.

Au cours de la dégradation structurale sous l'action des pluies, les états de surfaces sont modifiés. Ces modifications à la surface entraînent non seulement des transformations morphologiques mais aussi des transformations dans le comportement physique et mécanique du sol, ainsi que dans le fonctionnement hydrodynamique... (diminution de l'infiltration, de la porosité..). Il se forme des croûtes de battance qui sont un obstacle pour la levée des plantules et peuvent conduire s'il y a une pente au ruissellement et à des phénomènes d'érosion.

Sur le terrain, le suivi de ces phénomènes peut être appréhendé par différentes méthodes (BOIFFIN, 1984). Il demande en général des observations répétées sur un grand nombre de sites.

La télédétection spatiale, en particulier les données Spot par leur faible résolution, permettent un suivi de ces modifications de surface.

Cette méthode de mesure offre en effet l'avantage de pouvoir travailler à différentes échelles (échantillon de sol, placette, parcelle, bassin versant..) en gardant le même système de mesure (puisqu'elle exploite les propriétés de réflectivité des sols) sans perturber la surface.

On peut suivre de plus ces phénomènes dans le temps grâce à la répétitivité des images.

### Les objectifs de cette étude

Ils sont au nombre de trois:

- déterminer les facteurs du sol les plus importants qui interviennent sur sa réponse spectrale et sont significatifs des changements morphologiques des états de surface.

- suivre et caractériser la dégradation du sol au moyen de la réflectance, en particulier, quantifier les phases de dégradation de la surface du sol définies par BOIFFIN.

- extrapoler les observations faites sur des sites expérimentaux à des parcelles agricoles afin d'identifier les marques d'érosion sur les images satellitaires.

### La démarche suivie

Elle comporte trois parties qui correspondent à trois niveaux d'investigation des états de surface du sol : spectrophotométrie, radiométrie, imagerie satellitaire.

- 1) On analyse des échantillons variés, au spectrophotomètre afin de fixer les domaines d'influence des principaux facteurs du sol sur la réflectance.

-2) On s'intéresse à la relation rugosité-réflectance et on l'étudie par des mesures radiométriques sur différents sites (Avignon, Versailles, Grignon..). On a fait varier les facteurs intrinsèques et extrinsèques du sol, (couleur, humidité, rugosité, angles solaires..) en utilisant des pluies contrôlées (par aspersion) et des pluies naturelles...

-3) On analyse spatialement des états de surface à partir de photographies prises verticalement à 1m du sol puis numérisées sur Péricolor et à partir des images Spot.

### Le plan de l'exposé

Le premier chapitre rappelle le modèle utilisé pour suivre la dégradation structurale du sol sur le terrain (BOIFFIN, 1984) et quelques bases de la télédétection, puis il présente les méthodes et techniques employées pour cette étude.

Le chapitre 2 traite des études faites sur des échantillons au laboratoire et des propriétés mises en évidence entre les principaux facteurs du sol et la réflectance. On a observé notamment l'influence de la matière organique, du fer et du calcaire sur la réflectance. Un modèle de tri a été utilisé pour classer les échantillons suivant leur composition en fonction de leurs réponses spectrales. La couleur est une variable importante qui varie en fonction des constituants du sols et de l'humidité, elle a fait l'objet d'une étude plus particulière.

Le chapitre 3 présente les expérimentations effectuées sur différents sites. On a observé la dégradation structurale de la surface, par la radiométrie. Les conditions géométriques d'observation ont varié (Avignon) ainsi que la rugosité initiale (Grignon), la composition et la couleur (42 parcelles de Versailles). On a défini les conditions optimales pour suivre la dégradation structurale de la surface par la réflectance et défini un modèle de référence entre la rugosité et la réflectance.

Enfin le chapitre 4 montre l'utilisation de l'analyse spatiale pour étudier les états de surface. Il concerne les mesures faites sur les parcelles agricoles. IL s'agit d'identifier les plages battantes et des marques d'érosion à partir des images Spot. De nouvelles approches de caractérisations des unités définies sur les images Spot et les photographies des états de surface numérisés sont proposées. Elles sont basées sur l'analyse de la forme et de l'hétérogénéité des plages.

---

**CHAPITRE 1**

DEGRADATION STRUCTURALE DE LA SURFACE DU  
SOL ET TELEDETECTION

---

## DEGRADATION STRUCTURALE DE LA SURFACE DU SOL ET TELEDETECTION

Dans les régions tempérées, les sols cultivés restent nus pendant des durées variables au cours desquelles leur état de surface change selon les conditions climatiques, les systèmes de cultures... auxquels ils sont soumis.

Certains facteurs relativement stables dans le temps, comme la teneur en matières organiques ou en calcaire, jouent un rôle important non seulement sur le comportement physique du sol (stabilité structurale, rétention en eau..) mais également sur la couleur et les propriétés de réflexion.

D'autres facteurs comme l'humidité ou la rugosité évoluent au cours de l'année. Leurs modifications sont importantes d'un point de vue agronomique puisqu'elles peuvent conduire à des phénomènes de battance. Ces modifications entraînent à la surface du sol des propriétés physiques et optiques différentes, elles peuvent donc être décelées par des mesures de réflectances.

- L'objectif de cette étude est de suivre l'évolution de la dégradation structurale de la couverture pédologique par la réflectance, et d'analyser les formes de ces différents états de surface sur le terrain et à partir d'images satellitaires (Spot).

Dans cette étude, nous abordons la couverture pédologique en l'analysant avec un "outil nouveau" qu'est la télédétection.

- On définira la notion de dégradation structurale de la surface du sol dans une première partie.

- On rappellera quelques bases de la télédétection, en précisant les techniques et les mesures utilisées pour suivre la dégradation structurale, dans la seconde partie.

### I. La dégradation structurale de la surface du sol

On rappelle dans cette partie, les principaux points concernant le phénomène de dégradation structurale et son appréhension par différents auteurs. Il ne s'agit pas d'une étude exhaustive, mais de brefs rappels pour préciser le contexte et le langage de notre étude.

#### A. Définition et conséquences agronomiques



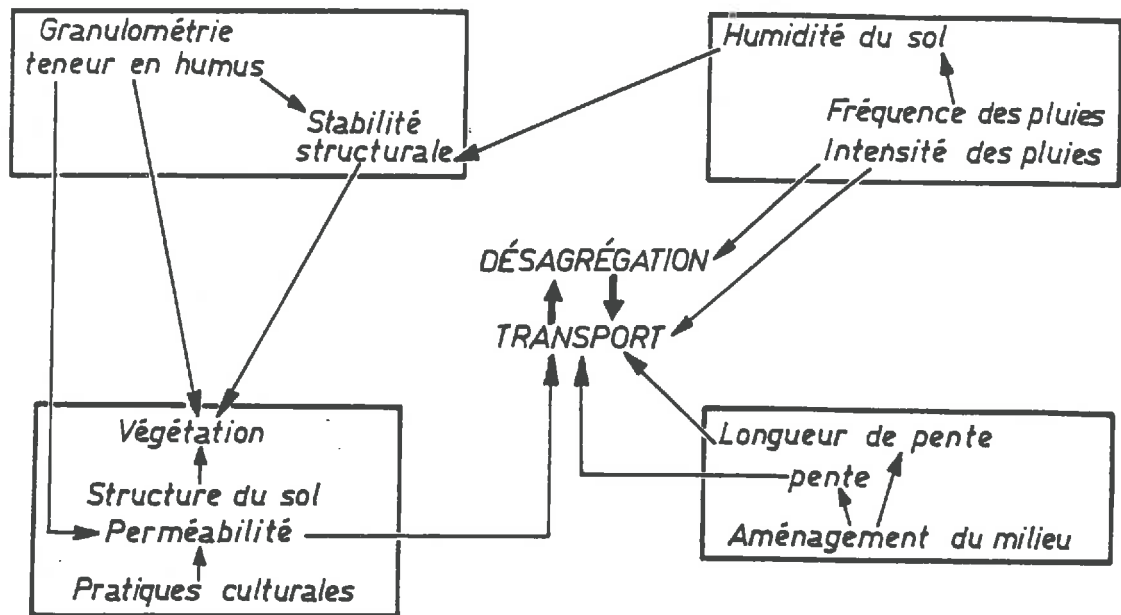


Fig.1. Principaux facteurs influençant la dégradation structurale de la surface. (d'après Y.Peyre, 1980).

## 1. Notion de structure et de stabilité structurale

La dégradation structurale fait intervenir le concept de structure et de stabilité structurale. La structure est définie comme " la manière dont sont assemblés les différents constituants du sol".(HENIN,1976) . Sa dégradation est donc une transformation de cet assemblage qui s'effectue sous l'effet d'agents externes. Elle s'accompagne de changements morphologiques au niveau de la surface et de modifications physico-chimiques telle que sa rétention en eau, sa stabilité structurale..On peut évaluer la capacité d'un matériau à résister à cette dégradation par des tests à l'eau, à l'alcool ou au benzène (HENIN et al, 1969) .

## 2. Principaux facteurs et phénomène de battance

Ces modifications de surface conduisent à des propriétés moins favorables pour l'agriculture. Un exemple en est le phénomène de battance (soil surface crusting) qui représente une destruction complète de la structure des agrégats sous l'action des pluies. Il y a formation d'une croûte superficielle continue et consistante à structure feuilletée, ce que VALENTIN (1981) appelle des organisations superficielles de surface.

Suivant la texture et la composition des sols, un indice de battance (R) a été défini . (REMY et al, 1974).

$$R = \frac{1.5 * Lf + 0.75 * Lg}{A + 10 * MO} \quad \begin{array}{l} Lf : \% \text{ limon fin, } Lg : \% \text{ limon grossier,} \\ MO : \% \text{ matières organiques, } A : \% \text{ argile,} \end{array}$$

\*Les principaux facteurs qui interviennent sur cette transformation sont de trois ordres: (Peyre,1980) Fig.1.

- climatiques: agressivité des pluies, du vent...

Des critères d'agressivité des pluies ont été calculés. Ils font intervenir l'énergie cinétique des gouttes d'eau, leur taille...(WISCHMEIER, SMITH, 1958)..

Un des indices proposés est KEx qui représente la somme des énergies cinétiques des pluies qui dépassent un certain seuil . Pour les pays tempérés, par exemple ce seuil est évalué à 10mm/h (MORGAN,1982)

- pédologiques : nature du matériau (les textures limoneuses sont particulièrement sensibles au phénomène de battance), la composition ionique, la présence de ciments (matières organiques, sesquioxydes de fer) interviennent également sur la cohésion des particules et par suite sur la stabilité du sol.

- anthropiques : l'intensification des travaux culturaux, l'utilisation d'engins agricoles lourds participent à l'augmentation de la vitesse de dégradation de la structure de la surface du sol.

### 3. Conséquences agronomiques, phénomène d'érosion

Les conséquences de ce phénomène sont importantes sur le plan agronomique. En effet, au fur et à mesure que la dégradation structurale du sol progresse, les caractéristiques de fonctionnement du sol (porosité, infiltration, température, albedo..) évoluent.

D'un état fragmentaire meuble et poreux, on passe à un état continu, compact où l'infiltrabilité et la porosité diminuent. Par suite il y a ruissellement à la surface et entraînement des particules les plus fines vers des zones plus basses d'atterrissement. C'est l'apparition des phénomènes d'érosion. Ceux-ci peuvent se développer à partir de ruissellement diffus (en nappes) ou concentré en rigoles. Les dégâts peuvent être importants pour la parcelle agricole. En effet, la formation de croûtes compactes de battance est un obstacle à la levée des plantules (FRELICH et al, 1973, ESCADAFAL, 1981<sup>2</sup>, LE SOUDER, 1987) et donne lieu à l'échelle du bassin versant à des pertes en terres et par suite à des pertes de rendement importantes.

On observe de tels phénomènes d'érosion dans les régions du nord du Nord de la France Oise, Pays de Caux, Aisne...(BOIFFIN et al, 1986).

Par une approche statistique, le pourcentage de pertes en terre est calculé à partir de résultats obtenus sur des parcelles expérimentales. L'équation universelle de perte en terre (USLE) a été établie sur différents sites aux USA. (WISCHMEIER, SMITH, 1965). Elle fait intervenir divers facteurs responsables des phénomènes d'érosion.

$$A = R * K * L * S * C * P$$

A: perte en terre d'une parcelle isolée hydrologiquement, homogène, sans zone d'atterrissement

R: érosivité des pluies

K: érodibilité du sol

L: facteur longueur de pente

S: facteur inclinaison

c: facteur système de culture

P: facteur aménagement antiérosif

Cette équation est basée essentiellement sur des caractères empiriques. Elle concerne un système spatial bien défini, qui s'applique à des bassins versants homogènes, indépendants des systèmes environnants.

## **B. Etude des mécanismes et description**

Pour prévenir ces dégâts, il faut avant tout comprendre les processus qui en sont à l'origine.

De nombreuses études à différents niveaux d'appréhension, ont porté sur ce sujet:

- études macroscopiques, analyse des mécanismes à partir de pluies simulées (VALENTIN, 1981), au niveau de l'agrégat (LE BISSONNAIS, 1988),
- études microscopiques (CHEN et al, 1980, BOIFFIN, BRESSON, 1987).

Nous présentons plus en détail l'analyse développée par BOIFFIN (1984), car il a travaillé en conditions naturelles et il propose un modèle relativement simple d'évolution de la structure du sol à la fois descriptif et conceptuel.

### **1. Le modèle de BOIFFIN**

A partir d'un état initial fragmentaire poreux FO (semis), la dégradation s'opère suivant deux phases principales F1 et F2 correspondant aux faciès suivant. Tab.1.Fig.2

**F1:** il y a détachement des particules (microfissuration) sous l'impact des gouttes de pluies, et colmatage des interstices. Il en résulte un tassement à la surface du sol. La surface se ferme avec l'apparition de *plaques structurales* continues.

**F2:** l'intensité des pluies devient supérieure à l'infiltrabilité de l'eau dans le sol, il y a flaquage, séparation et tri des particules. Des zones de départ et d'arrivée s'individualisent. Des *croûtes sédimentaires* à structure feuilletée se forment.

### **2. Les mécanismes**

Les mécanismes qui entrent en jeu sont principalement la désagrégation, le colmatage, la fragmentation (MONNIER et al, 1981).

Pour la phase F1, on peut distinguer quatre points importants intervenant au niveau des processus:(LE SOUDER, 1987)

Tab.1. Caractéristiques des principales phases de dégradation définie par J. BOIFFIN (1984).

FO	F1	F2
Etat initial fragmentaire poreux	Fermeture de la surface Formation de croûtes structurales	Flaquage Ruissellement Formation de croûtes sédimentaires

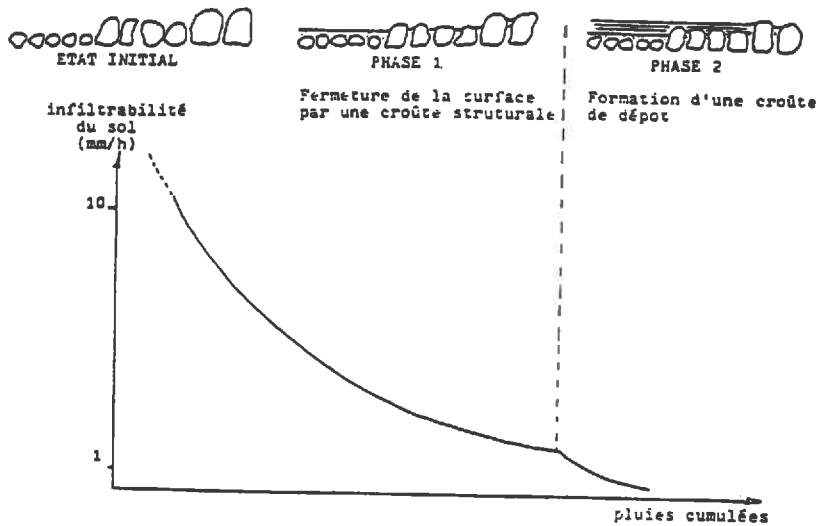
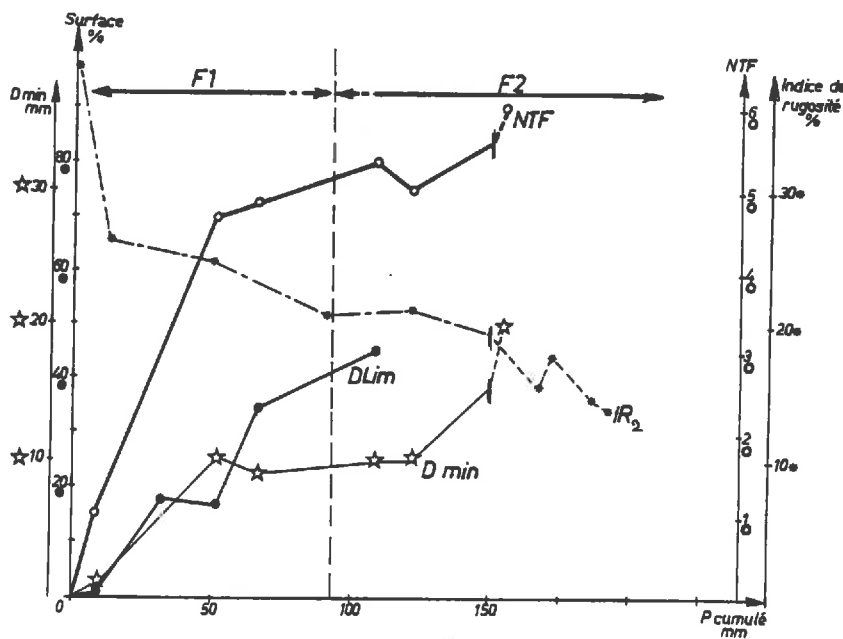


Fig.2 Variation de l'infiltrabilité de la couche superficielle en fonction des pluies cumulées. (Boiffin, 1984).



- ☆ Dmin, calibre des éléments les plus fins, (mm)
- Sp, surface des plaques structurales %
- Ntf, note de désagrégation de la terre fine (codé de 0 à 6)
- \* Indice de rugosité, IR<sub>2</sub>

Fig.3. Variation des principaux paramètres définis par Boiffin observés sur une placette de 35 cm/ 50 cm. (cf fiche descriptive, annexe.1.)

- le détachement des particules suivant trois modalités (microfissuration, désagrégation par éclatement, désagrégation sans éclatement)
- le déplacement des particules.
- le colmatage des interstices de surface
- le tassement de la surface sous l'impact des gouttes

En ce qui concerne la phase F2, deux processus interviennent :

- le détachement des particules solides
- le déplacement en phase liquide (par flaquage ou ruissellement)

La vitesse de désagrégation varie suivant l'état hydrique, la taille de l'agrégat et les caractéristiques des pluies. (LE BISSONNAIS,1988).

### 3. Les méthodes de description

Une des difficultés pour étudier le suivi de la dégradation du sol est de choisir de bons paramètres pour décrire et comparer les différents états rencontrés.

On peut aborder ce problème de deux façons:

- d'un point de vue "agronomique" (BOIFFIN), c'est à dire faire une description plus qualitative que quantitative résultant d'observations visuelles qui expriment des variations de fonctionnement physique du sol.

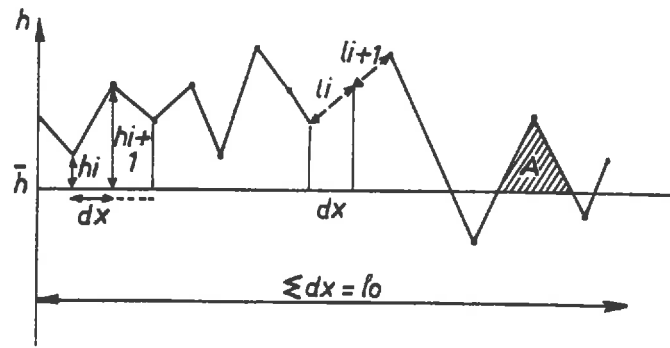
- d'un point de vue statistique, c'est à dire utiliser des données quantitatives résultant de mesures obtenues avec des appareils plus ou moins sophistiqués caractérisant surtout les *variations morphologiques du microrelief* du sol.

Pour notre étude, nous avons choisi d'utiliser des paramètres issus de ces deux approches.

#### 3.1. L'approche qualitative

Nous présentons brièvement les principaux critères retenus par BOIFFIN(1984). Ceux-ci sont relevés sur une fiche descriptive (cf annexe.1) après chaque épisode pluvieux important, sur une placette de 35 sur 50 cm .Un certain nombre de variables font état de la taille des mottes, des signes de dispersion, de la surface des croûtes structurales... On sélectionne pour notre étude quatre indices principaux: Fig.3.

*Dmin: calibre des fragments distincts les plus fins, observé 4 ou 5 fois sur la placette*



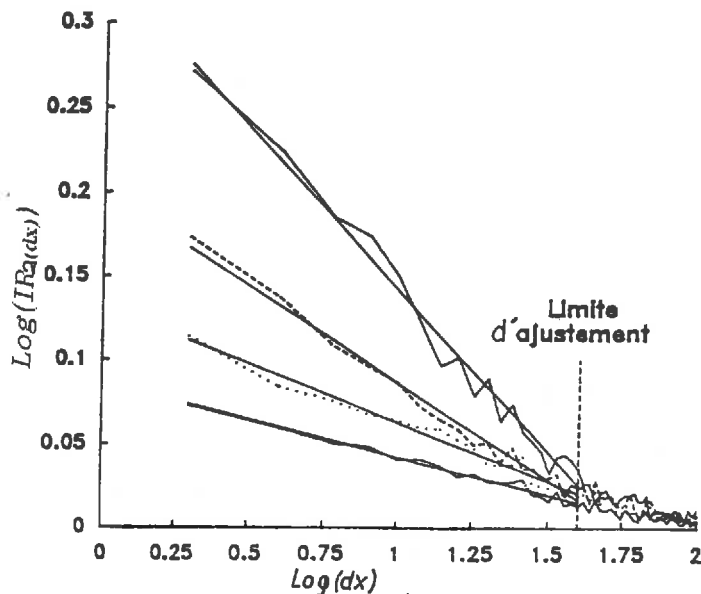
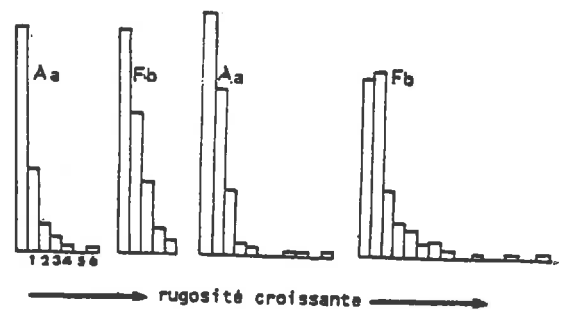
- $h$  : écart des hauteurs par rapport à la moyenne, relevé en un point  $i$  quelconque du profil
- $\bar{h}$  : hauteur moyenne du profil
- $l_0$  : longueur totale du transect (ligne droite, généralement 1m ou 2m)
- $l_i$  : longueur de la pente calculée entre deux hauteurs successives,  
 $l_i = \sqrt{(h_i - h_{i+1})^2 + dx^2}$
- $dx$  : résolution horizontale ou pas d'échantillonnage
- $A$  : surface du pic

Fig.4. Exemple de transect obtenu avec un rugosimètre, et paramètres utiles pour le calcul d'indices.

\* Fig.5. Histogramme des longueurs de pentes (d'après C.King, 1979)

- 1, 2, 3, 4, 5 : classe de pente ( $l_i$ )
- 1: pente de 1cm
- 2: pente de 2cm

- Aa, Aa : labour ancien
- Fb, Fb : labour frais



Stade de BOIFFIN	pluies cumulées
— F0	0 mm
--- F1	30 mm
.... F1+	64 mm
— F2	100 mm

Fig.6. Variation de l'indice  $D$  (dimension fractale), en fonction des stades de dégradation définis suivant la terminologie de Boiffin. (d'après Bertuzzi, 1989).

- $IR_2$  : indice de BOIFFIN,  $IR_2 = l_i/l_0$
- $dx$  : résolution horizontale
- $Log(IR_2) = a * Log(dx) + b$
- $D = 1 - a$

*Ntf: état de désagrégation de la terre fine, critère ordonné suivant la disparition progressive de l'état fragmentaire et l'apparition de signes de dispersion (paramètre codé de 0 à 6)*

*Sp: surface des plaques structurales*

*Nrm: estimateur de l'état de raccord des mottes (codé de 0 à 6)*

Une des critiques que l'on peut formuler est qu'il s'agit de paramètres issus directement d'observations visuelles. Celles-ci peuvent donc varier d'une personne à l'autre; les observateurs doivent être bien formés. Des paramètres tels que Sp sont difficiles à estimer exactement. La délimitation des croûtes structurales n'est pas automatique, elle demande donc de définir des lois préalables (faisant intervenir le contraste ..) pour placer des limites entre les différentes zones.

A une même phase, peuvent correspondre plusieurs états de rugosité. En effet, une surface qui vient d'être travaillée sera notée F0. Celle-ci peut être un labour, une surface hersée ou passée au rouleau., la rugosité est alors très différente pour ces trois cas.

On peut aussi se demander si l'observation d'une ou deux placettes est suffisamment représentative de l'ensemble des phénomènes qui se déroulent sur une parcelle.

L'avantage de cette méthode est qu'elle ne requiert pas de matériel particulier, et qu'elle met en relation des observations de surface avec des caractéristiques concernant les propriétés physiques du sol tel que son infiltrabilité ou sa conductivité. Chaque phase est associée à un phénomène qui se produit à la surface

### 3.2. Approche quantitative: Différentes mesures de la rugosité

La seconde approche essaie d'être plus quantitative. On considère à présent un état de surface non plus comme un état structural donné associé à un comportement physique particulier mais plutôt comme une distribution aléatoire de mottes et d'agrégats représentant une rugosité donnée. Il s'agira donc de mesurer les variations de ce microrelief au cours du temps.

On peut utiliser les techniques topographiques qui consistent à relever les différentes hauteurs ou cotes à la surface du sol en se situant par rapport à un référentiel fixe.

Cette approche peut se faire :

- localement suivant une dimension le long d'un transect avec un rugosimètre: (aspérimètre..) (BOIFFIN et SEBILLOTE, 1976, KING, 1979, ESCADAFAL, 1981, BROUSSARD, 1986, HUANG et al, 1988, BERTUZZI et CAUSSIGNAC, 1987)



- ou bien spatialement (cette technique fait appel à la photogrammétrie: THOMAS et al,1986, BRUNEAU,1988..).

### 3.3.Les indices proposés ou traitements effectués:

Différents indices de rugosité sont calculés à partir des transects obtenus avec les rugosimètres.

Un des premiers indices proposé est celui de KUIPERS (1957)

$$R_1 = 100 * \log(R_0)$$

$R_0$  : écart-type des hauteurs (calculé à partir des hauteurs relevées avec un rugosimètre à aiguilles espacées tous les centimètres.)

BOIFFIN et SEBILLOTE (1976) améliorent la résolution avec un aspérimètre constitué d'aiguilles espacées tous les 2mm et proposent un indice caractérisant la tortuosité. Fig.4.

$$IR_1 = \frac{\text{ligne brisée} - \text{ligne totale}}{\text{ligne totale}} = \frac{l_i - l_o}{l_o} \quad IR_2 = \frac{l_i}{l_o}$$

ROMKENS et WANG (1986) définissent l'indice suivant:

$$R_3 = A * F$$

A: aire des pics (ou surface) du profil par unité de longueur après correction éventuelle d'une dérive. Fig.4.

F: nombre de pics par unité de longueurs.

Les anglo-saxons(ZOBECK et ONSTAD, 1987, ONSTAD,1984) utilisent généralement l'indice RR (Random Roughness) pour caractériser la rugosité du sol.

$$RR = \text{écart-type} (\log(\text{hauteurs résiduelles}))$$

Cet indice proposé par ALLMARAS et LARSON (1966) résulte d'une méthode assez complexe que nous ne développerons pas ici. Il est calculé à partir de 400 hauteurs relevées sur une surface de  $1m^2$  et il prend en compte l'effet directionnel que peuvent entraîner des rangs de cultures et l'effet de la pente.

La principale critique de tous ces différents indices cités ci dessus est leur forte dépendance vis à vis de la résolution horizontale des appareils de mesures .

BERTUZZI et al (1989) comparent ainsi les indices de BOIFFIN et de ROMKENS pour différentes résolutions. Les variations sont importantes. Tab2. Ceci explique la recherche d'autres critères de rugosité indépendants des caractéristiques métrologiques.

Tab.2. Comparaison des indices de rugosité à différentes résolutions. (d'après BERTUZZI et al, 1989)

Indices de rugosité	dx: résolution horizontale		
	2mm	4mm	1cm
IR <sub>2</sub> (BOIFFIN)	1,81	1,57	1,34
R3 (Romkens)	0,95	0,51	0,23

Les méthodes d'acquisitions ont été améliorées ainsi que le traitement des données résultantes. Un système d'acquisition par projection de peinture (méthode "spray") sur une feuille placée à la verticale de la surface du sol permet d'obtenir des transects continus, rapidement (DESMET et al, 1988).

On a supprimé notamment le caractère perturbateur des aiguilles ou de la feuille à la surface par un système optique, tel le rugosimètre laser, (ROMKENS et al, 1988, HUANG et al, 1988, BERTUZZI et CAUSSIGNAC, 1987).

Des traitements statistiques ont été appliqués sur ces données numériques. Ils sont décrits dans les paragraphes suivants.

Il y a deux approches suivant que l'on considère que la distribution des hauteurs mesurées suit une loi normale ou bien une loi log-normale.

Ces deux types d'approches sont discutées par LINDEN et VAN DOREN (1986) et BERTUZZI et al (1989), ils concluent que les deux méthodes sont possibles et dépendent des résultats expérimentaux.

Bien que les objectifs des auteurs soient différents, la recherche de critères décrivant le microrelief de la surface du sol reste la préoccupation principale.

Certaines études ont pour but de corrélérer les signaux mesurés par un radar avec la rugosité du sol (KING C, 1979, BROUSSARD, 1986), d'autres veulent évaluer la capacité de stockage de l'eau dans les microdépressions ou modéliser l'infiltration de l'eau dans le sol., ou le ruissellement à la surface du sol ...(BURWELL et LARSON, 1963, ZOBECK et ONSTAD, 1987..).

Ces traitements calculent: soit directement à partir des hauteurs

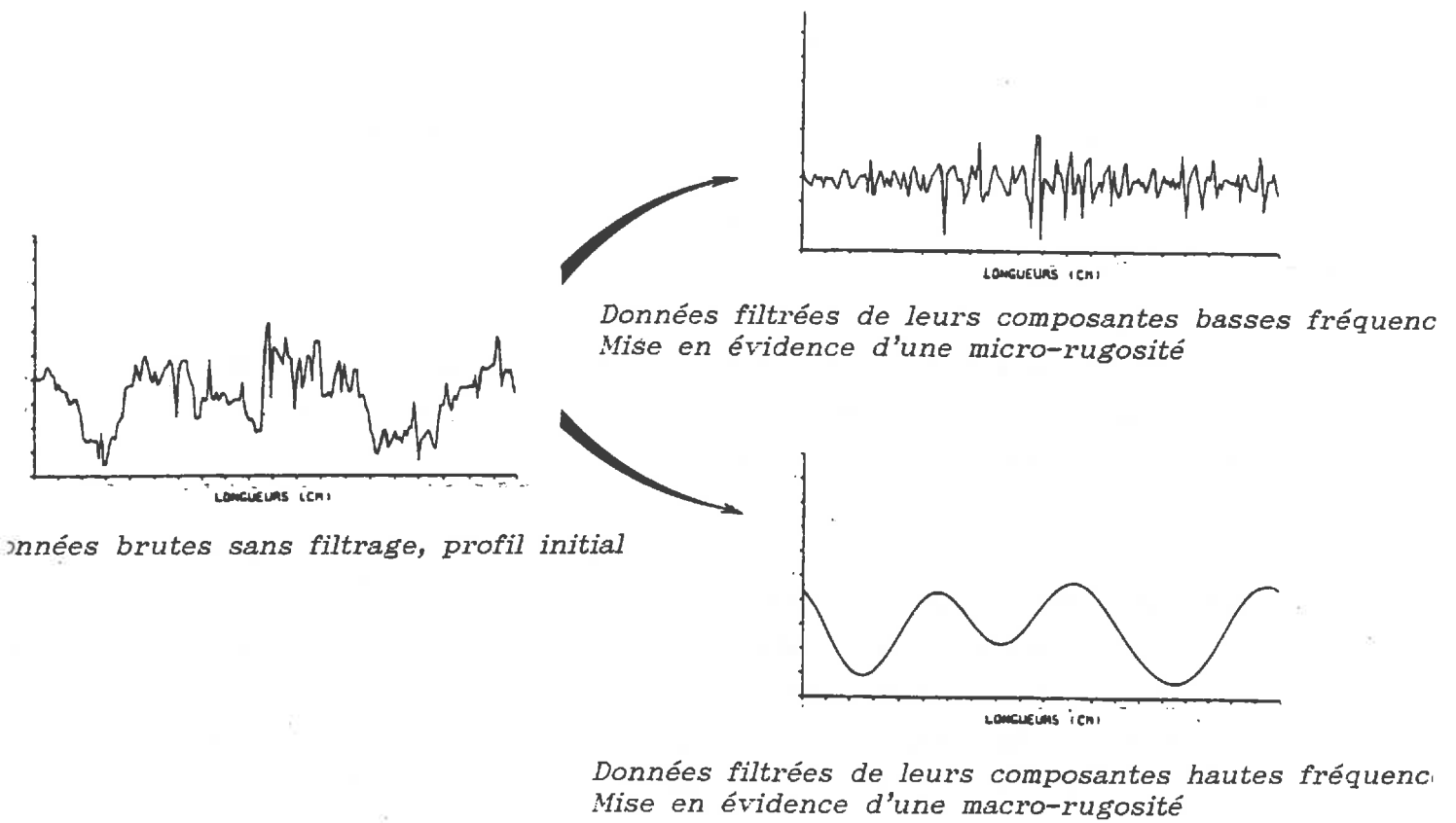


Fig.7. Exemple d'analyse de Fourier sur un transect de rugosité  
(d'après P.Broussard, 1985).

- la moyenne des hauteurs
- la somme des pentes
- l'écart-type des hauteurs calées par rapport à la moyenne (HRMS, BROUSSARD, 1986)
- l'écart-type des pentes calculées entre chaque point (ISP, C.KING, 1979) Fig.5.
- le rapport: hauteur maxi/hauteur mini

soit à partir des logarithmes des hauteurs

- l'écart - type du log des hauteurs  
(RR random roughness, ALLMARAS et LARSON, 1979)

Comme nous l'avions signalé précédemment, tous ces paramètres sont fortement dépendants de la résolution horizontale des appareils.

D' autres paramètres ont donc été calculés. LINDEN et VAN DOREN (1986) isolent deux indices LS et LD issus de l'analyse de différences absolues (variogramme d'ordre 1):

$$Dh(dx) = \frac{\sum_{i=1}^n |h(i) - h(i+dx)|}{n} \quad dx: \text{résolution horizontale du rugosimètre}$$

h hauteur mesurée  
n : nombre de points mesurés

à petite échelle, on approxime cette relation :  $Dh(dx) = 1 / (b*(1/dx)+a)$

$$\text{en posant} \quad LS=1/a \quad LD=1/b$$

LS et LD sont indépendants de la résolution horizontale de l'appareil de mesure. LD est fortement corrélé à RR et LS à IR<sub>2</sub>.

Un autre indice indépendant des caractéristiques métrologiques est la dimension fractale, indice proposé par BERTUZZI et al (1989). On a la relation suivante :

$$\text{Log}(\text{IR}_2(dx)) = a * \text{Log}(dx) + b$$

IR<sub>2</sub> ; indice de BOIFFIN

dx: résolution horizontale

a et b sont estimés à partir de la régression linéaire entre IR et dx

$$D=1-a \quad D : \text{dimension fractale}$$

Ce critère est pertinent pour des résolutions  $dx$  inférieures à 5cm et distingue bien les différentes phases de BOIFFIN, au delà de 5cm, la relation entre  $\log(IR(dx))$  et  $\log(dx)$  n'est plus linéaire; les différents états de rugosité peuvent se confondre. Fig.6

Des recherches de phénomènes périodiques ont également été effectuées afin de décomposer par exemple le signal mesuré en macro et microrugosité, ou de faire ressortir une période particulière significative par exemple pour le signal retrodiffusé du radar. (analyse de Fourier, (BROUSSARD,1986), fonctions d'autocorrélation, analyse spectrale, semi-variogramme). Fig.7

### 3.4. Le principe de l'ombrage:

Une analyse intéressante est le principe de l'ombrage (Fig.8). En effet la quantité d'ombre résulte de la rugosité du sol et de son illumination, elle peut donc constituer un indicateur de la morphologie de la surface. Les positions de l'illuminant et de l'observateur ou du capteur sont déterminantes pour calculer cette quantité d'ombre. (EPIPHANIO et VITORELLO,1984, RICHARDSON et al,1975) . Fig.8.

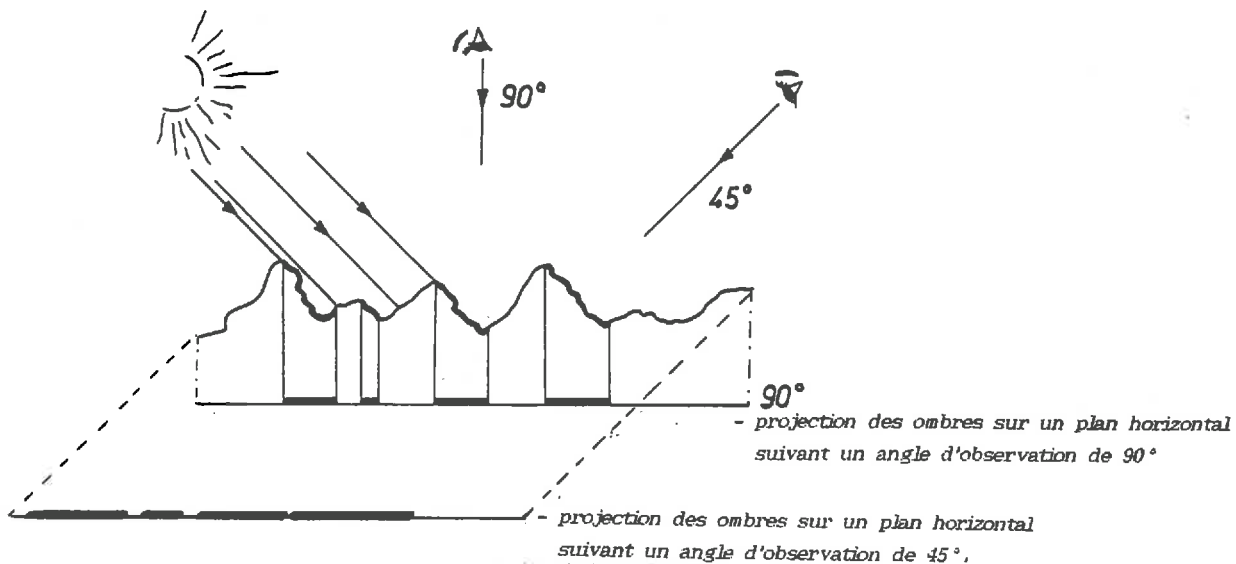


Fig.8. Variation des surfaces ombrées suivant l'angle d'observation.

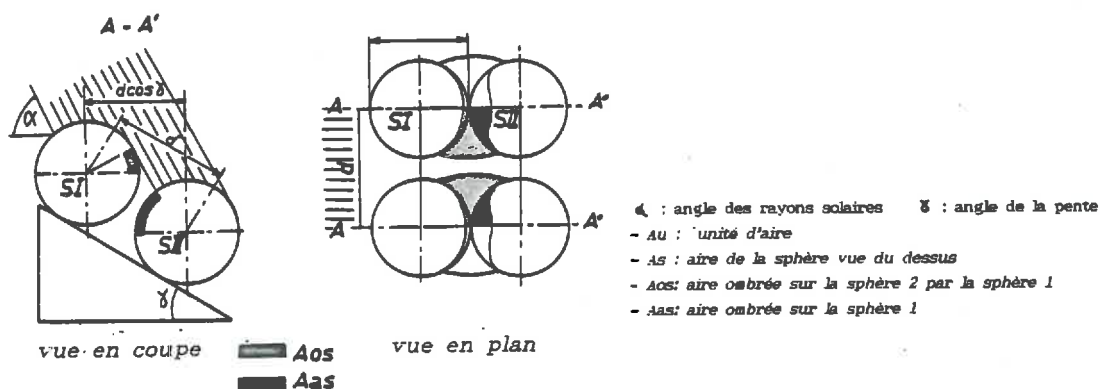
Le rapport surface ombrée/surface éclairée peut être calculé à partir d'un transect (KING,1979), ou bien à partir d'un plan sur photographie prise à la verticale (CIERNIEWSKI,1983); ou bien encore en connaissant les paramètres géométriques du système sol-soleil-capteur, (à partir d'équations mathématiques, CIERNIEWSKI,1988). Un coefficient d'ombrage SCm est défini. Les formules sont relativement complexes. Elles nécessitent de connaître un certain nombre de

paramètres .CIERNIEWSKI (1988) a retenu deux coefficients caractérisant la rugosité:

- **RF**, c'est le rapport des surfaces occupées par les agrégats et les mottes sur l'unité de surface choisie (65cm/65cm). Il est calculé par traitement d'images à partir de photographie prise à la verticale

- **SCm**, coefficient d'ombrage, il est calculé sur la base d'un modèle mathématique, connaissant la géométrie de la surface et les paramètres géométriques du système (angle solaire, angle de la pente..). La surface est considérée comme un assemblage de sphères

de taille identique posées sur un plan d'inclinaison variable et éclairées suivant différents angles d'incidence. Fig.9.



- RF: facteur de rugosité,  $RF = As/Au$
- SCm : coefficient d'ombrage,  $SCm = (A0s + Aas)/Au$

Fig.9. Géométrie d'une surface artificielle ombrée, pour le calcul des coefficient RF et SCm. (d'après CIERNIEWSKI, 1988).

L'intérêt de ces dernières méthodes est que la rugosité est abordée avec une dimension supplémentaire puisqu'elle prend en compte sa représentativité spatiale. La surface mesurée peut être la même que celle mesurée par le radiomètre.

Le problème essentiel qui ressort en effet des études précédentes vient du fait que l'estimation des paramètres caractérisant le microrelief s'obtient à partir de mesures faites sur un transect, donc suivant une direction bien précise dans une dimension. A moins de répéter ces mesures un grand nombre de fois, on ne peut avoir une bonne représentativité de l'ensemble de la surface étudiée.

C.KING, (1979) examine plusieurs transects juxtaposés (système Clementina) et reconstruit ainsi un bloc diagramme de la zone observée. Des cartes hypsométriques sont élaborées à partir de ce système. Fig.10.

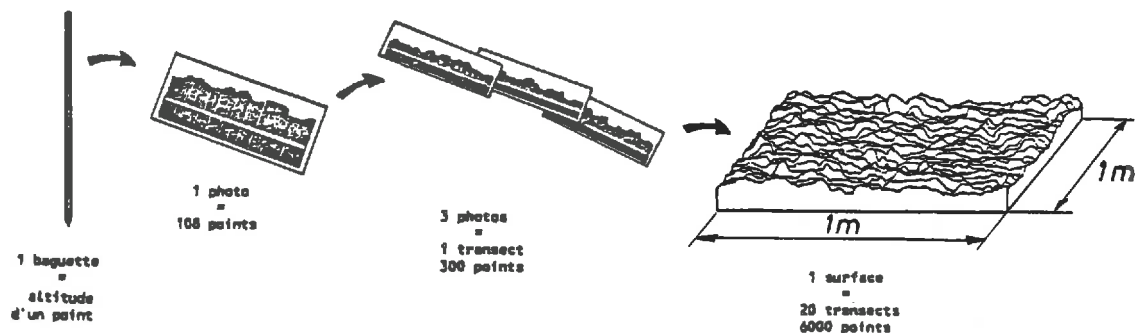


Fig.10. Principe d'acquisition des données de rugosité suivant le système Clémentina. (d'après C.King, 1979)

\* D'autres méthodes comme la **photogrammétrie** reconstituent le microrelief à la surface du sol à partir de couple de photographies stéréographiques en relevant la cote de chaque point. Ce sont des mesures non destructrices de la surface du sol, elles peuvent donc être répétées sur le même emplacement. Elles livrent un grand nombre d'informations sur un espace à 3 dimensions. Mais ces informations demandent au préalable d'être décrites par d'un opérateur extérieur qualifié, et ces méthodes sont souvent longues et coûteuses.

### Conclusion

Dans cette première partie, nous avons vu que l'analyse de la dégradation structurale du sol peut se faire suivant deux approches:

- l'approche qualitative (BOIFFIN), qui relie des observations visuelles faites à partir de placettes à des pluies cumulées ou à l'énergie cinétique des pluies et par suite à des effets sur *le fonctionnement physique du sol*, comme son infiltrabilité...

Cette méthode de description de la surface suivant trois phases est intéressante, puisqu'elle associe des processus à chacun des termes, elle ne perturbe pas la surface mais ne concerne que de petites surfaces, et à chaque stade de dégradation défini, peuvent correspondre plusieurs états de rugosité.

- l'approche quantitative résout ce dernier point en mesurant les variations du microrelief à partir des hauteurs des mottes. Elle distingue donc chacun des états de surface par des paramètres: les indices de rugosité. Cependant, ces méthodes sont souvent relativement lourdes (elles perturbent la surface, ou les traitements sont longs..). La surface mesurée est souvent limitée (transect dans une ou deux directions sur 1 à 2m maximum), l'extension spatiale est rarement prise en compte.

On note deux points importants qui ressortent de ces analyses:

-1) l'intérêt de comprendre les processus qui régissent la dégradation structurale sous l'action des pluies afin de prévoir l'évolution du sol et prévenir certains dégâts.(approche de BOIFFIN).

-2) Une certaine difficulté d'étudier et de décrire les variations de la rugosité dans le temps sur un même site car:

- soit on ne contrôle pas tous les paramètres, par manque d'observateurs..

- soit les techniques sont assez lourdes ou destructrices de la structure de surface donc peu reproductibles..

Les deux types d'approches qualitatives et quantitatives sont complémentaires, mais encore insatisfaisantes pour les raisons évoquées ci dessus.

Par ailleurs, le problème de l'extrapolation n'est pas résolu.

- Est-ce que l'on peut raisonnablement passer d'une observation locale à partir d'un transect ou d'une placette à une généralisation des résultats sur une parcelle agricole ou un bassin versant?

On en arrive donc, à chercher un nouvel outil, facile à manipuler, livrant des données quantitatives, pouvant être traitées rapidement et qui s'appliquerait à différentes échelles: placettes, parcelles, bassin versants.

Sans vouloir prétendre atteindre tous ces objectifs par la télédétection, cette technique offre l'avantage de pouvoir travailler à différents niveaux d'investigation (échantillon de sol au laboratoire, placette, parcelle, bassin versant) en gardant le même système de mesure et sans perturber la surface.

Nous nous sommes intéressés à mesurer la réflectance de la surface du sol afin de savoir si le signal mesuré était sensible aux variations morphologiques de la surface, et si à chaque état structural donné correspondait un comportement spectral bien spécifique.



Nous abordons ici la seconde partie de ce chapitre qui présente quelques aspects de la télédétection en rappelant notamment quelques principes de base des notions et mesures que nous allons utiliser.

## II. Comportement spectral des sols - quelques rappels et principes de télédétection

(Cette partie aborde très brièvement quelques notions et principes de la télédétection. Pour plus de détails, se référer à BECKER et al, 1980)

### A. Les principales mesures utilisées

Tout corps est à la fois source et récepteur d'énergie.

Deux cas peuvent se présenter :

1) l'émission de rayonnement est naturelle. On mesure alors la réflexion du sol, par exemple dans le visible et le proche infra-rouge où seul le rayonnement solaire intervient. Les méthodes de télédétection correspondantes sont passives .

2) Le capteur possède une source émettrice qui envoie un rayonnement incident de longueur d'onde bien déterminée sur une cible (sol, végétation) et on mesure le signal rétrodiffusé. Il s'agit alors de méthodes actives. Elles concernent surtout le domaine des microondes.

Nous nous intéressons ici aux méthodes passives dans le domaine de longueur d'onde variant du visible au proche infra-rouge (400-1100 nm).

La mesure la plus couramment employée pour quantifier ces transferts d'énergie est la **réflectance**; c'est le rapport de deux flux d'énergie par unité de surface:

$$R\% = \frac{\text{le flux d'énergie réfléchi par unité de surface}}{\text{le flux d'énergie incident reçu par unité de surface}}$$

(Ce rapport peut être mesuré avec des radiomètres de terrain (Cimel, Exotech)

Suivant l'angle considéré pour mesurer le flux réfléchi, on distingue :

- la réflectance hémisphérique qui prend en compte le rayonnement venant de toutes les directions de l'espace situé au dessus de la cible mesurée, ainsi que les flux réfléchis dans toutes les directions.

- et la réflectance bidirectionnelle, où l'on considère seulement une partie du rayonnement réfléchi suivant une direction bien précise variant selon l'angle d'ouverture du détecteur.

De la même façon, on définit la luminance (L) ; elle est enregistrée par les capteurs HRV, TM des satellites Spot ou Landsat... Elle est définie par la puissance émise par unité de surface et par unité d'angle solide

$$L = \frac{d^2w}{d\Omega * d\xi * \cos \Theta}$$

$d^2w$  puissance émise par  $d$   
 $d\xi$  élément de surface  
 $d\Omega$  angle solide

Généralement, les données livrées par Spot image sont sous forme de niveaux numériques codées de 0 à 255 . Des relations permettent de passer de ces niveaux codés aux luminances puis aux réflectances en faisant intervenir la hauteur et la position du soleil..(TANRE et HERMAN, 1978, DINGUARD, 1986)

Un troisième type de mesures qui est utilisé en télédétection est le **facteur de réflectance, FR**, (on l'obtient par exemple avec un spectrophotomètre). Il s'agit d'un rapport de flux d'énergie, mais cette fois entre la portion de surface étudiée (sol, végétation..) et une surface parfaitement réfléchissante comme du sulfate de Baryum .

\* Pour toutes ces mesures, le signal mesuré dans le domaine de longueur d'onde étudié (400 - 1100 nm) ne pénètre pas en profondeur. Il ne concerne que la partie superficielle du sol (quelques micromètres d'épaisseur). Il ne faudra donc pas attendre des informations sur les horizons pédologiques profonds à partir des mesures spectrales, à moins d'avoir mis en évidence préalablement des relations chorologiques entre les caractères de surfaces et ce qui est sous-jacent.

De par leur propre définition, on constate que toutes ces variables mesurées font intervenir des angles, des surfaces.. donc sont intimement dépendantes de la configuration géométrique du système terre - soleil - capteur. Fig.11.

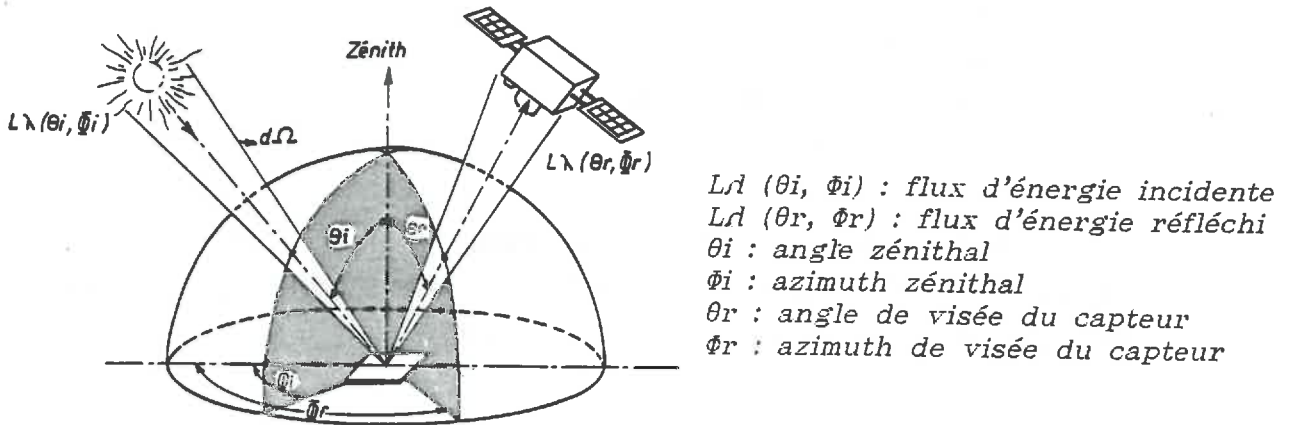


Fig.11. Description géométrique de la réflexion sur une surface élémentaire.

### B. Les facteurs de variation des mesures spectrales

Des facteurs extrinsèques et intrinsèques au sol influencent les réponses spectrales.

#### 1. Les facteurs extrinsèques

On regroupe en trois classes principales les facteurs extrinsèques (GUYOT, 1988)

- Les facteurs propres aux conditions géométriques d'observation: l'orientation, l'inclinaison de l'axe de visée à la fois du capteur et de la source illuminante., et leur position relative Fig.12.

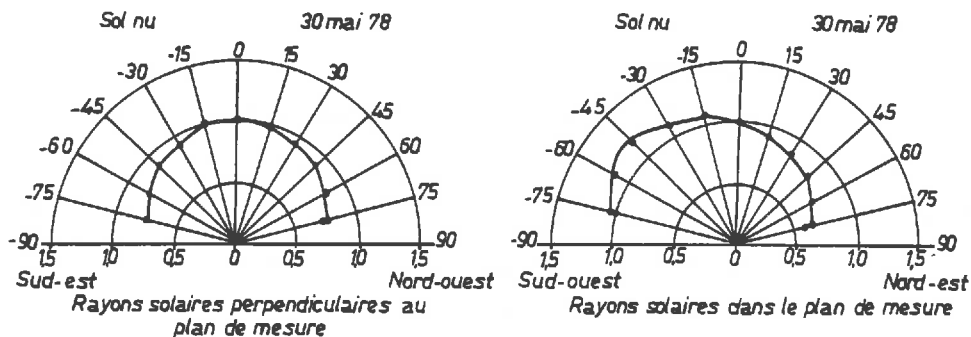


Fig.12. Variation de la réflectance du sol à différents angles de visée du radiomètre. (d'après Guyot, 1984). Indicatrices de réflectance

Chaque point représente le rapport entre la réflectance mesurée à  $0^\circ$  et celle mesurée à  $i^\circ$ ,  $i$  variant de  $0^\circ$  à  $75^\circ$ .

- les facteurs liés au rôle de l'atmosphère, de la nébulosité. On note ainsi l'effet des aérosols sur la diffusion (théorie de Mie)

- les facteurs dépendant des caractéristiques des appareils de mesures (angle d'ouverture, résolution spectrale et spatiale).

## 2. Les facteurs intrinsèques

Les facteurs intrinsèques, c'est à dire ceux qui sont liés plus particulièrement aux caractéristiques de surface du sol (couleur, constituants, humidité, rugosité..) jouent un rôle important. Ce sont ceux qui permettent d'avoir des informations sur le sol. Afin de mieux comprendre leur intervention, on rappelle quelques principes physiques importants:

### 2.1. Notion de rugosité, le critère de Rayleigh

Le critère de Rayleigh sépare la réflexion en deux expressions selon la dimension ( $d$ ) de l'objet visé:

- si  $d > \lambda / 8 \cos\theta$ : la surface est considérée comme rugueuse et la réflexion est diffuse ( $R_d$ ). La réflexion obéit à la loi de Kubelka-Munk où  $R_d$  varie en fonction du coefficient de diffusion et du coefficient d'absorption auquel il est inversement proportionnel.
- si  $d < \lambda / 8 \cos\theta$ , la réflexion est dite spéculaire ( $R_s$ ), et la surface est assimilée à un miroir.  $R_s$  d'après la relation de Fresnel varie essentiellement en fonction de l'indice de refraction et proportionnellement au coefficient d'absorption (c'est à dire à l'inverse de  $R_d$ ).

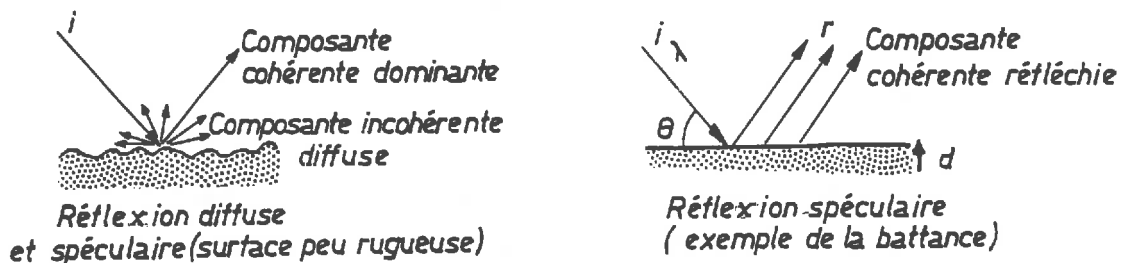


Fig.13. Variation de la réflexion suivant la rugosité de la surface.

Dans le domaine de longueur d'onde étudié (400 -2000 nm), si on calcule la dimension  $d$  d'un objet quelconque, pour un angle  $\theta$  de  $0^\circ$ ,  $d$  varie de 0,05 à 0,25  $\mu\text{m}$ . Ces variations sont largement inférieures aux variations de taille de mottes ou d'agrégats que l'on voudrait différencier. Donc à priori, pour le radiomètre, tout est rugueux et théoriquement la réflectance mesurée est diffuse. En réalité, on observe

une combinaison des deux expressions  $R_d$  et  $R_s$ .  $R_s$  peut parfois prendre une proportion importante. Certains constituants du sol comme les argiles, de par leur structure en feuillets présentent des faces planes parfaitement réfléchissantes, donc propices à la réflexion spéculaire (LOUHALA et al, 1988). Le phénomène de battance provoque également des surfaces lisses et donc favorables à la réflexion spéculaire.

## 2.2 Le phénomène d'absorption

Aussi bien pour la réflexion diffuse que pour la réflexion spéculaire, le coefficient d'absorption est important. L'absorption résulte de deux processus différents:

- *les vibrations moléculaires*: Elles concernent les longueurs d'onde dans le domaine de 1300 à 2500nm. L'excitation de certains groupements tels que OH,  $\text{CO}_3$ , SiO, AlO,...provoque des bandes d'absorption qui se soustraient au spectre de réflexion. Les bandes d'absorption les plus étudiées sont celles de l'eau à 1450 et 1950 nm. Les groupements OH permettent la différenciation des argiles entre 2000 et 2500 nm

- *les transitions électroniques*: le transfert de charges ou d'électrons inter ou intra atomiques entraînent des absorptions d'énergie. Il y a des absorptions métalliques qui concernent les minéraux opaques. Les minéraux de transition tels le Cu, le Fe, Ni, Ti.; sont également sujets à ces transferts.

Par ces propriétés, les caractéristiques spectrales de certains composés minéralogiques les plus courants dans les sols: silicates, carbonates ont pu être mis en évidence. (HUNT et SALISBURY,1971).

A partir du spectre de réflexion diffuse d'un échantillon de terre quelconque, on peut identifier les différents constituants du sol en analysant la forme de la courbe obtenue qui résulte de la présence ou de l'absence de bandes d'absorption .

Un des problèmes qui se pose lors de l'interprétation des réponses spectrales des sols est que le spectre obtenu est rarement le résultat d'un seul constituant facile alors à identifier, mais résulte de la combinaison de n facteurs qui peuvent aller soit dans le même sens, soit s'opposer, cela a pour conséquence d' abaisser ou d'augmenter la réflectance. Il faut donc connaître l'effet de chaque constituant et ses limites sur la réflectance pour interpréter les réponses enregistrées.

### 3. Rôle des facteurs intrinsèques du sol.

Parmi les facteurs intrinsèques du sol qui interviennent sur la réflectance, on distingue deux classes (GIRARD, 1983<sub>2</sub>).

- *les facteurs stables* tels que la matière organique ou le calcaire qui évoluent peu au cours du temps. (GIRARD M-C et C-M, 1977, MATHEWS, 1979, STONER et BAUMGARDNER, 1981, KING, 1985) Ils interviennent sur la réflectance par les phénomènes d'absorption. On précisera leurs domaines d'absorption ultérieurement.

- *les facteurs instables* ou évolutifs au cours du temps tels que l'humidité ou la rugosité. (BOWERS et HANKS, 1965, SKIDMORE et al, 1978, CIERNIEWSKI, 1985). Les phénomènes d'absorption mais également le critère de Rayleigh expliquent ici leur intervention sur la réflectance.

Nous développerons l'effet de ces facteurs et leurs limites sur les propriétés spectrales des sols à partir de mesures effectuées au laboratoire sur des échantillons de sols variés, dans le second chapitre .

Nous présentons ici simplement le tableau de KING et LEFEBVRE D'HELLEN COURT (1982), qui résume d'une façon synthétique les principaux effets de ces facteurs sur la réflectance. Certaines relations peuvent apparaître incomplètes, notamment en ce qui concerne le facteur texture. Il faut en effet tenir compte de l'état d'humidité du sol . Ces relations seront discutées ultérieurement. tab.3.

La relation que nous examinerons plus en détail sera la relation entre la rugosité et la réflectance.

#### **C. Relation rugosité- réflectance, les différentes approches.**

##### 1. Relations établies sur des échantillons à partir de mesures au laboratoire (relation réflectance - granulométrie)

On associe à cette troisième partie la relation entre la *réflectance* et la *granulométrie*.

En effet, la texture ou la composition granulométrique d'un échantillon de sol est un facteur déterminant pour sa structure. La taille des particules influence en partie leur

Tab.3. Principaux facteurs agissant sur la réflectance des sols  
(d'après C.King, Lefebvre d'Hellencourt, 1982).

	Action sur R d'une augmentation du facteur	Domaine spectral	Remarques
Rugosité	diminution de R	dans tout le spectre	battance, agrégation: facteurs importants
Humidité	diminution de R	dans tout le spectre bandes d'absorption à 1400 et 1950 nm	
Couleur *	Clarté: augmentation de R	surtout dans le visible	modification de la forme de la courbe dans le visible
Matière organique	diminution de R	dans tout le spectre	facteur dominant quand MO>3%
Fer	diminution de R	surtout dans le visible absorption à 870 nm	très lié à la couleur
Calcaire	augmentation de R	dans tout le spectre	facteur dominant quand CaCO <sub>3</sub> >40%
salinité	augmentation de R	dans tout le spectre	
Taille des particules *	diminution de R	dans tout le spectre	

\* relations variables en fonction de l'humidité



arrangement . Il en résulte une rugosité bien définie. D'autres facteurs interviennent sur cet assemblage comme les matières organiques..

BOWERS et HANKS (1965) constatent ainsi, que plus le diamètre des particules augmente, plus la réflectance diminue à 1000 nm. Cette diminution est d'autant plus sensible entre 0.02 et 0.4 mm.

Ces analyses ont été faites sur des argiles de type kaolinite et bentonite passées à l'étuve et tamisées à différentes fractions .Fig.14

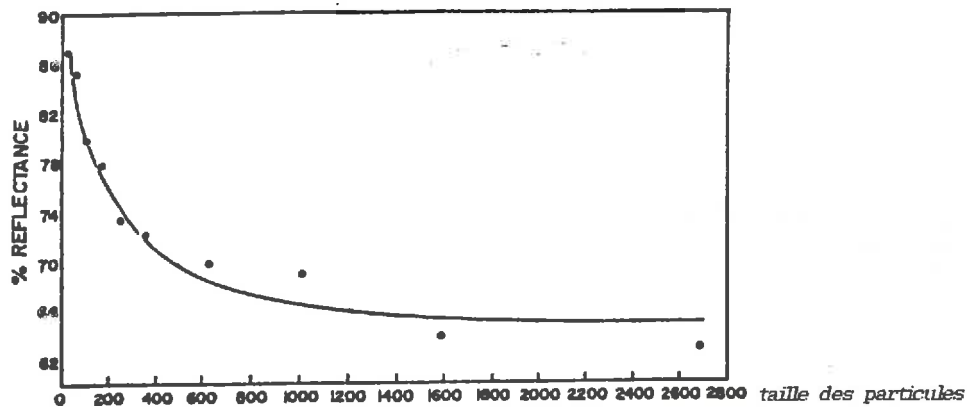


Fig.14. Relation entre la taille de particules sèches de Kaolinite et la réflectance à 1000nm. (Bowers, 1965).

Des relations semblables sont observées sur différents types de sols tamisés suivant des calibres variables, ORLOV(1966). Une relation exponentielle est établie entre le diamètre des particules et la réflectance. Au delà de 2mm, la taille des éléments ne semble pas intervenir sur la réponse spectrale. Entre 0 et 2mm, la réflectance diminue de 30%.

\* Il faut noter que cette relation ne s'applique qu'à des cas précis sur des échantillons de sols où seul le diamètre des particules varie, les autres facteurs interviennent faiblement, en particulier l'humidité doit être faible. Dans le cas des échantillons humides, la relation peut être inverse. Pour un même potentiel, on observe que plus les échantillons sont argileux, plus la réflectance diminue. (KING, 1985)

## 2. Les relations établies à partir de mesures radiométriques sur le terrain

Sans vraiment quantifier le facteur "rugosité", GIRARD et BIALOUSZ (1989) montrent l'effet de celui-ci sur la réflectance à partir de mesures radiométriques sur différents types de sols polonais. Ils notent l'interaction d'autres facteurs sur cette relation. Fig.15.



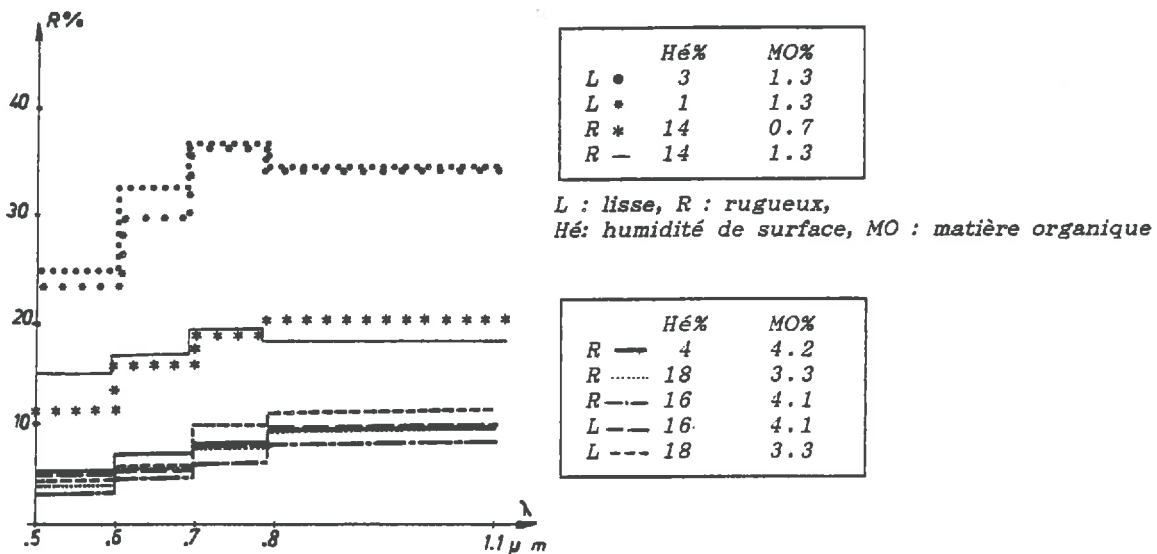


Fig.15. Courbes de réflectance de sols organiques a) et peu organiques b), où l'humidité et la rugosité varient (d'après Girard M-C, Białousz, 1989).

- lorsque la matière organique est inférieure à 2%, la réflectance diminue avec l'augmentation de la rugosité, quel que soit l'état d'humidité.

- au dessus de 3-4% de matière organique, la réflectance diminue lorsque la matière organique augmente, quel que soit le stade d'humidité et de rugosité.

Des expériences similaires ont été menées par GAUSSMAN et al (1977). Ils distinguent des pratiques culturales variées ; labour (rugosité grossière), hersage (rugosité faible)..par des mesures radiométriques, (l'humidité est fixée approximativement à 6%) et ils notent des variations de réflectances plus significatives dans le proche infra-rouge entre ces divers stades de rugosité.

Ces études interprètent la diminution de réflectance avec l'augmentation de la rugosité comme étant due principalement au *phénomène d'ombrage et à la réflexion diffuse* . La réflectance des zones ombrées est en effet nettement inférieure à celle des zones éclairées.

YOSTH et VENDEROTH (1969, in MULDER, 1987) mesurent la réflexion d' une même surface éclairée puis ombrée. Pour la surface à l'ombre, le rayonnement

arrive uniquement de façon diffuse, la part de rayonnement absorbé augmente par rapport au cas où le rayonnement est direct et diffus (cas des surfaces éclairées..)

Fig.16 .

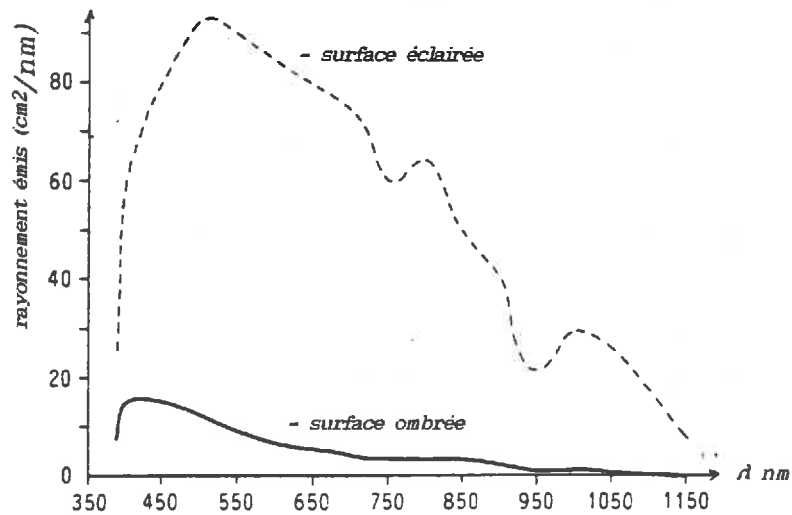


Fig.16. Comparaison du rayonnement émis par une surface éclairée et par la même surface ombrée, à la même heure de la journée (Yost, Wenderoth, 1969 in Mulders; 1987).

Les conditions géométriques d'observation et d'illumination sont déterminantes pour ces mesures, notamment en ce qui concerne la quantité d'ombre prise en compte (COULSON, 1966, EPIPHANIO et VITORELLO, 1984, GUYOT, 1984, KIMES et al, 1985).

EPIPHANIO et VITORELLO (1984) mesurent avec un radiomètre des oasis du Brésil à différentes heures de la journée et sous différents angles de visée. Ils ont fait varier la rugosité et l'humidité en irriguant ces parcelles et donc en dégradant la structure de surface par cet apport d'eau. Ils déterminent deux angles importants pour discriminer ces divers états de surface :  $0^\circ$  et  $90^\circ$  par rapport au plan solaire.

Ces différentes études résultent d'observations pour la plupart visuelles, quant à l'estimation de la rugosité. Elles sont donc relatives d'une personne à une autre, et par conséquent peu reproductibles. Elles dépendent également du référentiel par rapport auquel on se place, et aussi du niveau d'observation avec lequel on analyse le phénomène.

### 3. Approche quantitative : proposition de modèles

En télédétection, le domaine qui a nécessité une étude plus poussée de la rugosité est celui des microondes avec les mesures radar. En effet dans ce domaine de longueurs d'onde, on peut étudier ce seul paramètre indépendamment des autres à

certaines longueurs d'ondes, et s'abstraire par exemple de l'humidité . Par ailleurs, la couleur n'intervient pas, les variations de clarté entraînées par les phénomènes d'ombre ne peuvent donc pas être prises en compte comme critère de description des variations de rugosité.

Les recherches pour quantifier les variations du microrelief se sont donc surtout intéressées à mesurer les hauteurs des mottes .

Des données numériques sont reliées au coefficient de rétrodiffusion par exemple.:

- écart-type des hauteurs calées par rapport à la moyenne: HRMS (BROUSSARD,1986)

- somme des pentes : ISP (KING,1979)

Les résultats sont significatifs à des fréquence ou longueurs d'ondes bien précises (1.5Ghz et 9 Ghz, KING,1979). Fig.17.

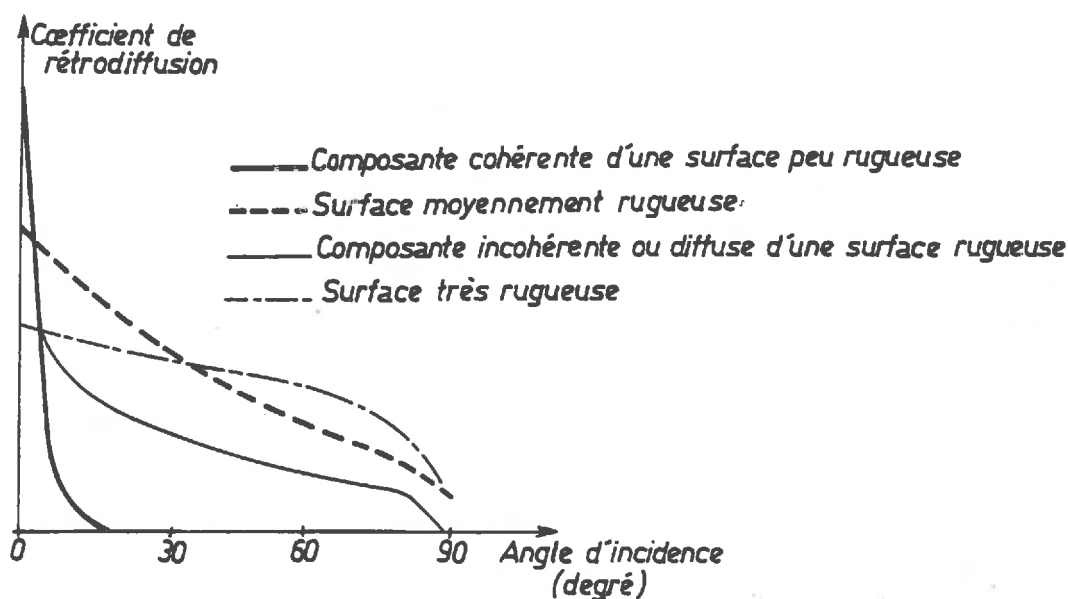


Fig.17. Variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence sur des surfaces de rugosité différentes.(d'après ULABY et al, 1971, in BOUSSARD, 1985).

Dans le domaine du visible et du proche infra-rouge, certains auteurs reprennent les mêmes indices: DESMET et al (1988) associent à la réflectance l'indice HRMS (cf p18) et distinguent ainsi des états de surface très différents. L'inconvénient de cette mesure est que l'on ne peut suivre un même état de surface au cours de sa dégradation par les pluies car le système de mesures utilisé ici (méthode "spray") détruit la structure.

CIERNIEWSKI (1988) contourne cette difficulté en s'intéressant à des systèmes de mesures qui ne perturbent pas la surface. Il utilise l'information de l'ombre à la

surface du sol. Il établit ainsi une relation entre la réflectance et un coefficient d'ombrage, SCm. (défini chap1,p21) Fig.18.

$$\text{réflectance} = a * e^{(b * \text{coef ombrage})}$$

a et b sont des constantes déterminées expérimentalement

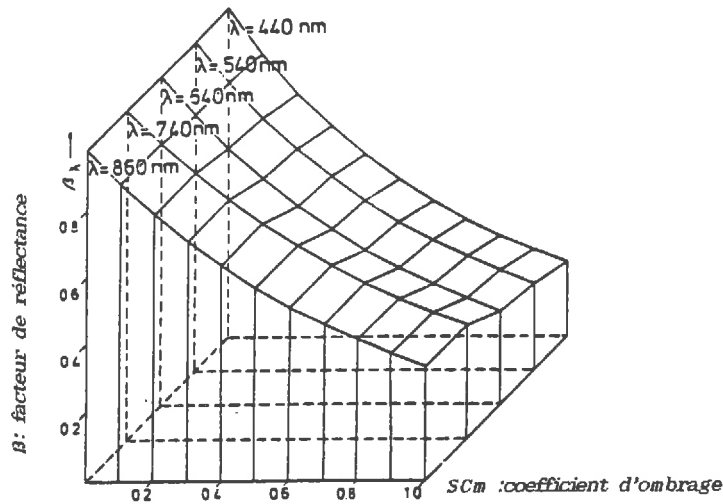


Fig.18. Variation du facteur de réflectance en fonction du coefficient d'ombrage SCm (Cierniowski, 1988)

Il teste son modèle sur divers échantillons de sols non perturbés où la couleur, la composition et la rugosité varient et il mesure la réflectance de ces surfaces au spectroradiomètre aux longueurs d'ondes suivantes 440, 550, 640, 740, 860 (CONDIT, 1970) en faisant varier à la fois la pente des surfaces et l'éclairement incident.

Il observe que la forme de la courbe de réflectance d'un même échantillon n'est pas modifiée d'un état lisse à un état rugueux, quelle que soit sa composition ou sa couleur.

Les variations de réflectance sont plus importantes entre les surfaces rugueuses et lisses pour les sols clairs que sombres et organiques.

Il trouve une relation linéaire entre le rapport de réflectances à l'état lisse et à l'état rugueux et le coefficient SCm .

Cette dernière étude semble la plus prometteuse, bien qu'elle considère des surfaces encore assez limitées (65/65cm) et que les variations dues à l'humidité ne sont pas considérées ici .

Il semble cependant que l'ombre est un critère intéressant à prendre en compte car il est directement relié à la rugosité de surface et il varie lorsque les conditions géométriques du système sont modifiées.

## Conclusion

Pour répondre à notre objectif défini au début de ce chapitre:

- suivre la dégradation structurale de la surface par télédétection, il faut répondre à quatre questions :

**- Dans quel domaine de variation, les facteurs intrinsèques du sol interviennent-ils sur la réflectance?**

En effet, il semble important d'isoler le facteur rugosité des autres facteurs qui influencent la réflectance et qui peuvent masquer par leurs interactions l'effet de la rugosité sur le signal mesuré. L'objectif est de se fixer des limites de conditions d'humidité ou de teneur en matières organiques par exemple où seules les variations de rugosité expliquent les variations de réflectance observées. Nous essayerons d'y répondre dans le chapitre 2.

**- Quelles sont les conditions optimales d'illumination et d'observation d'une surface naturelle pour en suivre sa dégradation?**

On a vu que l'ombre peut être un critère intéressant à prendre en compte pour caractériser l'état de rugosité puisque sous des conditions géométriques définies, on constate que plus la surface est rugueuse, plus il y a d'ombre et la réflectance diminue. (chapitre 3).

**- Comment relier les mesures de rugosité définies à partir de transects.. à des mesures spectrales relatives à une surface ?**

Cette question pose le problème de compatibilité des mesures entre les différents niveaux d'investigation.

On veut corréliser des mesures de rugosité obtenues dans la plupart des cas dans un espace à deux dimensions à des mesures spectrales obtenues sur un espace à trois dimensions. Il faut par ailleurs que ces mesures soient comparables d'un site à l'autre et représentatives des variations spatiales sur tout l'ensemble étudié.

**- Comment rendre cohérentes les observations et mesures faites aux différentes échelles spatiales (échantillon, placette, parcelle)?**

L'extrapolation des mesures effectuées au laboratoire et sur des sites expérimentaux peut-elle s'appliquer à des parcelles agricoles dans des bassins versants ?

Peut-on différencier sur des images Spot les différents stades de dégradation structurale? (chapitre 4)

Nous allons nous efforcer de répondre à ces questions dans les chapitres suivants.

Différents niveaux d'investigations ont été abordés sur des sites variés. Ils sont résumés dans le tableau ci dessous.

Tab.4 Les différents sites étudiés et leurs facteurs de variations.

Différents sols étudiés	nb	coul	comp	hum	rugo	topo	trx cult	angl	techn	résol spectral (nm)
échantillons 1cm <sup>2</sup>	84	≠	≠	≠	0	/	/	0	spectro	400-2000
Avignon 0,1 ha	1	0	0	≠	≠	0	0	≠	cime1	500-590 600-690 700-900
Grignon 50/50 cm	7	0	0	≠	≠	0	0	0		
Versailles 2/2 m	42	≠	≠	≠	≠	0	0	≠		
Pays de Caux	2	0	0	≠	≠	0	≠	0	Spot	
Soissonnais	3	≠	≠	≠	≠	≠	≠	0		
Aisne	2	≠	0	≠	≠	0	≠	0		
Orléans > 5 ha	2	≠	≠	≠	≠	≠	0	0		

nb : nombre de sites                      topo : topographie  
 coul : couleur de surface              trx cult : travaux culturaux  
 comp : composition                      angl : angle d'observation et d'illumination  
 hum : humidité de surface              techn : techniques ou appareils utilisés  
 rugo : rugosité                              résol : résolution spectrale

0 : facteur constant      ≠ : facteur variable      / : facteur inexistant

Nous nous sommes intéressés tout d'abord dans le chapitre 2 à analyser plus particulièrement le rôle des différents facteurs intrinsèques du sol sur la réflectance, fixer leur domaine d'influence maximal et minimal.

Cette étude s'est faite à partir d'échantillons de sols variés mesurés au laboratoire avec un spectrophotomètre.

Il semble que la couleur est un des facteurs déterminant sur la réflectance qui est influencé à la fois par la composition du sol, mais aussi par l'humidité. Nous étudierons le rôle de ces facteurs plus particulièrement dans cette partie .

Dans le chapitre 3, nous avons considéré le seul facteur "rugosité" vis à vis de la réflectance, et nous l'avons analysé suivant différentes situations en faisant varier les conditions géométriques (site d'Avignon), la composition et la couleur (parcelles de Versailles), sur des parcelles expérimentales, à la fois sous pluies simulées et naturelles.

Enfin le chapitre 4 traite de l'extrapolation de ces résultats obtenus sur des sites expérimentaux à des parcelles agricoles . On s'intéresse à l'analyse spatiale des phénomènes de battance et d'érosion. Une étude des formes à partir de photographies des états de surface et des images Spot est esquissée.

---

## CHAPITRE 2

### EFFET DES FACTEURS INTRINSEQUES DU SOL SUR LA REFLECTANCE

---



## **Effet des facteurs intrinsèques du sol sur la réflectance**

(Etude faite sur des échantillons mesurés au laboratoire)

### **\* Rappel des objectifs**

On veut isoler le paramètre "rugosité" des autres facteurs du sol qui ont un effet sur la réflectance. Il faut pour ceci bien connaître les domaines d'influence et les limites de ces facteurs sur le signal mesuré. Il faut donc revoir les relations entre les facteurs intrinsèques du sol tels que sa couleur, son humidité..et la réflectance.

Cette étude nécessite un grand nombre d'échantillons de sols dont la composition, la couleur, l'humidité varient et peuvent être contrôlées et un appareil de mesure à résolution spectrale et spatiale relativement fine pour détecter les faibles variations de réflectance .

On analyse le comportement spectral des échantillons au spectrophotomètre DK2 Beckmann.

La première partie de ce chapitre présente les échantillons choisis et l'appareil utilisé. La seconde partie commente les résultats obtenus et propose quelques modèles, entre la réflectance et la couleur notamment.

### **A. Expérimentation**

#### **1. Présentation des échantillons de sols étudiés**

Le choix des facteurs du sol que nous allons étudier est un des premiers points à définir. Nous avons vu dans le chapitre 1 qu'ils se divisent en deux parties:

- les facteurs stables qui se rapportent essentiellement à la composition du sol (matière organique, calcaire..)
- les facteurs instables comme la rugosité ou l'humidité qui varient au cours du temps.

Trois constituants ont retenu notre attention à cause de leur influence sur la couleur du sol et du rôle qu'ils jouent sur les propriétés physiques du sol: Il s'agit de la **matière organique, du calcaire et du fer.**

Nous avons fait également varier l'humidité des échantillons.

Compte-tenu des contraintes de l'appareil de mesure (dont le principe est décrit dans le paragraphe 2.1), on ne peut faire varier la rugosité. Les relations que nous avons

mis en évidence ont été obtenues pour des échantillons de sols ayant quasiment le même état de rugosité.

Si l'on veut obtenir des relations fiables et statistiquement représentatives applicables à n'importe quel type de sol, il faut une gamme variée et étendue d'échantillons.

Si l'on fixe à 4 classes les variations que l'on peut rencontrer pour la teneur d'un constituant donné: absent, présent en faible quantité, présent en quantité moyenne, et présent en quantité importante, si l'on imagine toutes les combinaisons possibles entre les trois constituants: par exemple échantillon organique et peu calcaire, pas organique et très ferreux.. , on arrive à un total de 64 cas possibles.

D'autres auteurs ont étudié ces mêmes relations. CONDIT (1970) a examiné une série de 285 échantillons de sols entre 320 et 1000nm, STONER et BAUMGARDNER (1981) ont travaillé sur plus de 500 échantillons de sols mesurés avec un spectroradiomètre entre 500 et 2300 nm.

Nous n'avons pas pu traiter autant d'échantillons pour plusieurs raisons:

- tous les 64 cas théoriquement possibles ne se trouvent pas forcément dans la nature
- il est difficile de constituer une gamme régulière et continue pour un constituant donné sans que les autres paramètres n'interviennent ou ne soient modifiés. Il y donc des discontinuités dans les distributions.
- enfin le temps et la disponibilité du matériel nous ont contraint à n'étudier qu'une série limitée d'échantillons. Nous en avons retenu 84.

Ces échantillons proviennent pour la plupart d'horizons pédologiques de surface prélevés entre 0 et 20 cm.(TRAUBE,1985). Quelques uns sont issus d'horizons plus profonds pouvant aller jusqu'à 2m. (20 échantillons).

Il s'agit de sols très variés aussi bien au niveau de la couleur que de la composition. On trouve des andosols du Mexique bruns rougeâtres, des rendzines de Tahiti, des sols ferrallitiques de l'île Maurice, une série complète des différents horizons d'un podzol de Rambouillet.. (Tab.5)

Tab.5. Classification et nombre des échantillons étudiés (CPSC).

n type de sol

6 andosols humiques	8 podzols
3 sols alluviaux	3 sables éoliens
14 sols bruns calcaires	6 sols bruns tropicaux lessivés
6 sols d'érosion sur cendres	2 sols bruns eutrophes
4 sols ferrallitiques	5 rendzines sur îlots corailliens
4 sols selmi-tourbeux	2 sols régosoliques
1 gley	2 sols subtropical tronqué
17 sols sur matériaux basaltiques	1 paléosol gypseux

Cette série d'échantillons a fait l'objet d'analyses physico-chimiques classiques au laboratoire de Grignon, et à l'ORSTOM à Bondy. On a déterminé pour chaque échantillon:

La granulométrie,

la teneur en matière organique (par la méthode ANNE,1945)

la teneur en calcaire total (calcimètre de Bernard)

la teneur en fer total et libre (méthode TANN, DEB, in BLACK, 1965)

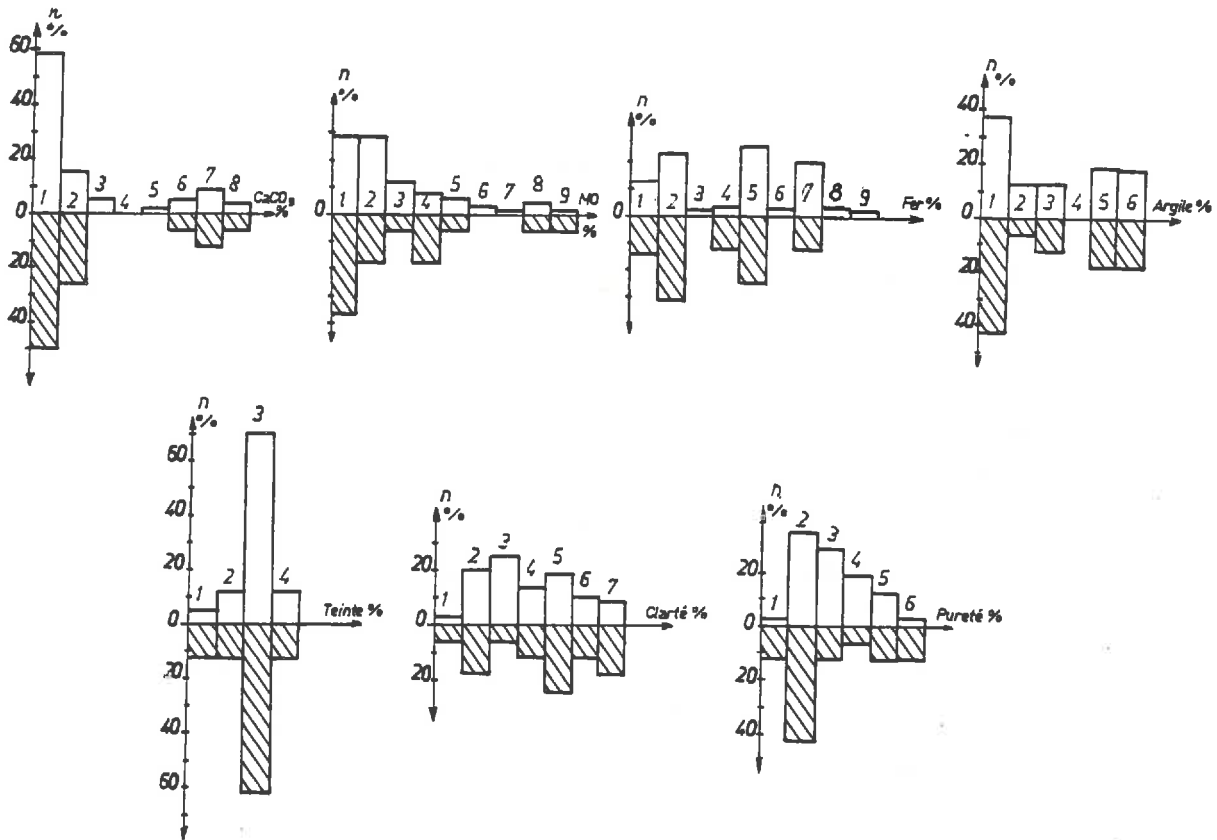
Chaque échantillon a été séché à l'air, broyé puis tamisé à 2mm. Pour chaque échantillon tamisé, la couleur a été notée d'après la charte Munsell dans des conditions d'éclairage bien déterminées et à différents stades d'humidité (ESCADAFAL et al,1988, MELVILLE et ATKINSON,1985)

Les 84 sols ont été ensuite passés au spectrophotomètre à l'état sec.

Seulement 20 d'entre eux ont été étudiés à différents stades d'humidité (cette limitation étant due essentiellement à des raisons techniques que nous exposerons ultérieurement).

Les distributions des principaux éléments étudiés sont représentés sur la figure.19.(en blanc, pourcentages calculés sur 84 échantillons secs, en hachuré pourcentages calculés sur 20 échantillons humides.)

Les classes n'ont pas été faites de façon homogène. Elles sont irrégulières pour certains constituants. En effet, nous avons détaillé volontairement les teneurs faibles, et regroupé les fortes teneurs, notamment pour la matière organique et le fer (Les variations de ces 2 éléments sont généralement significatives pour les faibles quantités, plus souvent présentes dans les sols).



Les différentes classes( %) pour les variables représentées sont:

Calcaire:	Matière Organique:	Fer total:	Argile :	Teinte:
1 : 0	1 : 0	1: 0	1: 0 - 5	1: 5YR
2 : 0- 5	2: 0 - 1.5	2: 0- 1.5	2: 5 - 10	2: 7.5YR
3 : 5- 10	3: 1.5 - 3	3: 1.5 - 3	3: 10 - 15	3: 10YR
4 : 10- 20	4: 3 - 5.5	4: 3 - 5	4: 15 - 40	4: 2.5Y
5 : 20- 35	5: 5.5 - 10	5: 5 - 7	5: 40 - 50	
6 : 35- 50	6: 10 - 20	6: 7 - 10	6: 50 - 80	
7 : 50- 80	7: 20 - 30	7: 10 - 20		
8 : 80- 100	8: 30 - 50	8: 20 - 35		
	9: 50 - 100	9: 35 - 50		

Fig.19. Distributions des principaux constituants et des coordonnées Munsell des 84 échantillons.

(en blanc : 84 échantillons secs, en hachurés : 20 échantillons humides)

Pour la Clarté et la pureté, les classes correspondent aux propres valeurs de ces deux variables.  
n représente le pourcentage d'échantillons compris dans la classe

La couleur Munsell a été décomposée en trois termes qui représentent les coordonnées cylindriques (définies dans le paragraphe B.2): la teinte, la clarté et la pureté. Nous verrons plus tard l'intérêt de distinguer ces trois parties.

On peut noter que les variations des distributions des échantillons étudiés à l'état humide sont semblables à celles des échantillons secs. On peut donc considérer que le choix de ces 20 échantillons mesurés est représentatif de la population totale des 84 échantillons, en ce qui concerne les principales caractéristiques des sols.

L'observation des distributions des divers constituants nous amène à quelques remarques:

- Il y a une certaine discontinuité des distributions, en particulier pour le calcaire. Il n'y a pas d'échantillons entre 10 et 20% de calcaire, par contre plus de 50% de la série sont dans la classe 1 (0% de  $\text{CaCO}_3$ ).

- cette disparité entre classes est encore plus nette pour le facteur texture (% d'argile). On trouve les deux pôles argileux et sableux bien représentés mais les intermédiaires manquent. (il n'y a pas d'échantillons entre 15 et 40% d'argile)

- En ce qui concerne la couleur, la gamme est variée et représentative des variations les plus courantes dans la nature. (Les teintes varient de 5YR à 2.5Y)

Bien qu'il y ait certaines discontinuités pour quelques éléments, nous avons pu mettre en évidence un certain nombre de relations en accord avec la bibliographie que nous exposerons dans la partie B.

## 2. Mesure du facteur de réflectance. Spectrophotométrie

Les échantillons séchés à l'air puis tamisés à 2mm sont passés au spectrophotomètre DK2 Beckmann afin de mesurer leur réponse spectrale. (laboratoire des Sols, INRA, Versailles, M. PROST)

### 2.1. Le principe de l'appareil

Une lampe de Tungstène émet un rayonnement incident de longueur d'onde variable. Ce faisceau de lumière monochromatique est décomposé mécaniquement par un jeu de miroirs et de lentilles en un réseau de doubles faisceaux monochromatiques qui viennent frapper l'échantillon et la cible de référence ( $\text{BaSO}_4$ ) dans une sphère intégratrice recouverte de sulfate de Baryum. ( $\text{BaSO}_4$  est un corps

considéré comme réfléchissant quasiment à 100% dans le visible et le proche infra-rouge).

Un détecteur enregistre la réflexion diffuse de ces deux corps et fait le rapport:

$$\text{FR\%} = \frac{\text{réflexion diffuse de l'échantillon}}{\text{réflexion diffuse de la cible}}$$

pour des longueurs d'ondes variant de 380 à 2500 nm.

Dans le domaine du visible, la réflexion est détectée par un photomultiplicateur, dans le domaine de l'infra-rouge par une cellule de PbS. Ce changement de détecteur entraîne au niveau des courbes résultantes un léger décalage. Le calibrage du 0 et du 100% de réflexion diffuse doit être fait dans les deux domaines séparément.

La résolution de cet appareil est de 0,2µm dans le visible et de 2.5µm dans le proche infra-rouge.

## 2.2. Expérimentation

Les échantillons sont placés dans une capsule hermétique comportant une fenêtre de 2.5 cm de diamètre recouverte d'une lame de fluorine. (la fluorine est préférée au verre car ce corps n'entraîne pas de variation de réflexion).

La capsule ferme hermétiquement par des joints en caoutchouc et des vis. La fenêtre est placée ensuite devant une des ouvertures de la sphère d'intégration sur un support vertical, ce qui nécessite de bien remplir toute la capsule par de la terre et de tasser celle-ci contre la vitre afin qu'il n'y ait pas de vide entre les deux. La surface du sol présentée au rayonnement est quasi poudreuse et lisse pour tous les échantillons étudiés. Il est donc difficile de faire varier la rugosité.

## 2.3. Dispositif mis en place pour l'étude des échantillons humides

\* Pour étudier le comportement spectral des échantillons à l'état humide, quelques opérations supplémentaires sont nécessaires.

Afin de contrôler l'humidité à chaque mesure, on a utilisé le dispositif des tubes pF de l'INRA de Versailles (M.TESSIER) qui permet d'analyser chaque échantillon individuellement. On compare le comportement spectral des échantillons pour des pF identiques

On place quelques grammes de terre sèche dans un cylindre de 2.5 cm de diamètre et de 1cm de hauteur. Celui-ci repose sur un filtre millipore qui lui-même repose sur une

membrane poreuse de quelques millimètres d'épaisseur. L'échantillon est amené à saturation puis placé dans un tube pF. Ce dernier est mis sous pression. Lorsque l'équilibre est atteint entre la pression interne du sol et celle du tube, on transfère l'ensemble cylindre+sol dans la capsule hermétique du spectrophotomètre et l'on mesure la réflexion diffuse. On pèse ensuite l'échantillon pour obtenir l'humidité pondérale pour le pF étudié. Le diamètre des pores vidés de leur eau est en relation avec la pression appliquée au sol.

Les différentes pressions choisies sont représentées ci dessous avec la taille des pores concernés mises en correspondance. Tab.6.

*Tab.6. Correspondance entre le diamètre des pores vidés de leur eau et les pressions appliquées au sol.*

<i>Pression bar</i>	<i>pF</i>	<i>diamètre des pores concernées</i>
<i>0.01</i>	<i>1</i>	<i>150<math>\mu</math></i>
<i>0.1</i>	<i>2</i>	<i>15<math>\mu</math></i>
<i>1</i>	<i>3</i>	<i>15<math>\mu</math></i>
<i>100</i>	<i>4</i>	<i>0,15<math>\mu</math></i>
<i>1000</i>	<i>6</i>	<i>0,0015<math>\mu</math></i>

#### 2.4. Tests de vérification

Le dispositif expérimental présenté ci-dessus demande quelques vérifications, notamment en ce qui concerne la saturation de l'échantillon.

On a ainsi vérifié si la saturation de l'échantillon était totale, en comparant les humidités d'échantillons (argileux et sableux) préalablement mis sous vide puis portés à saturation lente pendant 24h à celles des mêmes échantillons mis directement à saturation.

Les variations sont de 5%. Les échantillons ayant subi une saturation rapide ont des teneurs en eau plus élevées que les échantillons ayant subi une saturation lente. Ceci peut être dû à la désagrégation qui peut se produire par la montée brutale d'eau à travers les pores qui provoque la formation de pores artificiels.

En effet, si l'on récapitule les différentes étapes que subit le sol, on s'aperçoit qu'il y a des déséquilibres importants entre le temps de déshydratation et d'hydratation. L'étape 1 est une déshydratation lente de l'échantillon, c'est le séchage à l'air avant tamisage. L'étape 2 est l'hydratation brutale lors de la saturation de l'échantillon sol dont la pression interne de 1000 bars, est mis au contact d'eau libre à 0 bar. La 3ème étape est la deshydratation lente du sol dans les tubes PF. Fig.20.

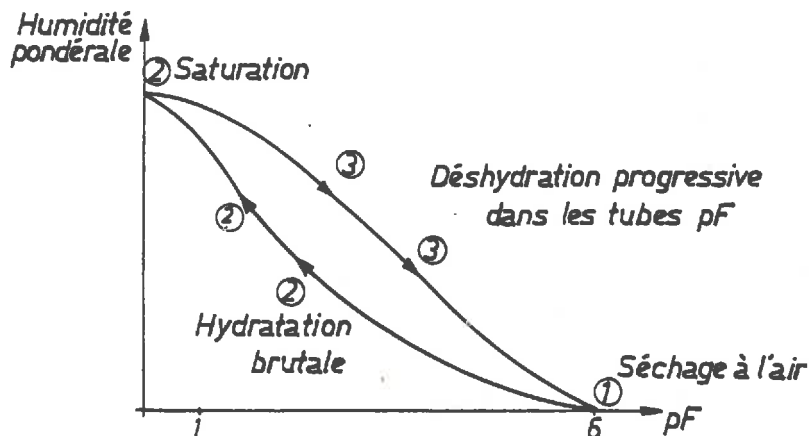


Fig.20. Principales phases que subit l'échantillon de sol.

Une autre vérification a été effectuée afin d'évaluer le pourcentage d'erreur que l'on commet sur la teneur en eau d'un échantillon que l'on pèse aussitôt après sa sortie du tube pF et celle du même échantillon qui passe au spectrophotomètre avant sa pesée. Les variations sont inférieure à 2%, on considère qu'elles sont négligeables.

### 2.5. Contraintes de l'expérience

Les contraintes dues aux appareillages ainsi que le temps que prend chaque mesure expliquent en partie notre choix de limiter le nombre des échantillons à 20.

- En effet, on ne peut analyser qu'un échantillon à la fois, le temps d'équilibre dans les tubes pF demande au moins 72h. Après la mesure de la réflexion diffuse au spectrophotomètre (1/2h), il faut peser l'échantillon à l'état humide, puis le laisser au moins 48h à l'étuve pour obtenir le poids à l'état sec.

- Le manque de terre pour certains échantillons dont nous ne possédions que quelques grammes, a été également une raison du nombre limité d'échantillons étudiés.

On a donc choisi les 20 échantillons les plus représentatifs des différentes classes de couleurs et de constituants étudiés.

### 2.6. Traitement des courbes de réflexion obtenues

Le spectrophotomètre nous livre des courbes de réflexion diffuse de 380 à 2000 nm. Le facteur de réflectance lu directement sur la courbe doit être corrigé en fonction des valeurs obtenues lors l'étalonnage du 0 et 100% de réflectance. Généralement, les variations dans le visible et le proche infra-rouge sont négligeables car inférieures à 1%.



Le traitement des données passe d'abord par une étape manuelle, puisqu'il s'agit de relever les valeurs du facteur de réflectance aux différentes longueurs d'ondes choisies et de les rentrer ensuite sur ordinateur afin qu'elles subissent différents traitements statistiques.

Le choix des longueurs d'onde est délicat. Soit on veut conserver un maximum d'informations sur la forme de la courbe, ce qui nécessite alors de relever les réflectances avec un pas relativement serré de longueur d'ondes (<50nm), soit on ne s'intéresse qu'aux bandes spectrales qu'utilisent les radiomètres de terrain ou les satellites, et on peut prendre alors la valeur moyenne de l'intervalle spectral. Pour Spot, trois longueurs d'onde suffisent (550, 650 et 800 nm), mais on perd alors un certain nombre d'informations quant à la forme de la courbe.

CONDIT (1970) montre qu'à partir de 5 longueurs d'onde bien définies, il est possible de reconstituer la courbe de réflexion diffuse d'un échantillon entre 320 et 1000 nm sans perdre d'informations importantes. Il s'agit des longueurs d'ondes suivantes: 440-540-640-740-860 nm

Elles correspondent à des bandes d'absorption ou aux principaux domaines d'influence des éléments les plus courants des sols (matière organique, influence entre 440 et 640nm), sesquioxides de fer, à 540 et 860nm..)

Pour la saisie de nos valeurs, on a relevé les réflectances tous les 50 nm.

### Discussion

Il faut préciser quelques points concernant les mesures qui sont à prendre en considération avant d'interpréter les courbes:

- les mesures de réflectance sont faites sur quelques cm<sup>2</sup> de sol remanié (échantillon tamisé). Il ne s'agit donc pas de mesures en conditions naturelles, la rugosité n'intervient pas ou peu.

- On veut corrélérer des mesures spectrales à des teneurs en matières organiques, en calcaire ou en fer..Ces divers éléments sont caractérisés par des analyses physico-chimiques qui n'indiquent qu'une valeur quantitative de la teneur de cet élément dans le sol. Il n'y a pas eu d'analyses plus précises de faites sur la nature même du constituant ou du type d'argile présent dans l'échantillon. Or la matière organique peut prendre différentes formes (liée , non liée, en fibres..), le fer peut présenter différents aspects également (en enrobant les grains, ou en concrétions..). Ce dernier suivant son degré d'oxydation ...donne une couleur très différente au sols.

Ces diverses formes entraînent des propriétés physiques différentes et par suite des comportements spectraux particuliers.

## **B. RESULTATS : Etude des relations réflectance-constituants-couleur-humidité**

Il y a différentes approches pour avoir des informations sur la composition du sol à partir de ses réponses spectrales. Une analyse de la forme des courbes spectrales permet d'avoir une première idée sur les principales caractéristiques des sols étudiés.

### **1. Analyse des principales formes de courbes spectrales rencontrées.**

#### **1.1. Rappel bibliographique**

Différents auteurs ont cherché à associer des formes de courbes à des caractéristiques du sol (CONDIT, 1970, STONER et BAUMGARDNER, 1981).

La forme des courbes de réflectance nous livre en effet, deux types d'informations : (Prost, communication orale)

- la première sur la nature intrinsèque des constituants (phénomène d'absorption)
- la seconde sur la taille, la géométrie et l'aspect des faces réfléchissant le rayonnement, ainsi que sur la nature de la matrice (dans les sols, la matrice représente le lien entre les différentes particules : (air ou eau)

On observe pour les sols "une ligne de base" croissante et régulière dans le visible (400nm-700nm). Les variations des formes observées (concave ou convexe) résultent de la présence ou de l'absence de bandes d'absorption particulières pour chaque élément.

- Ainsi le fer se caractérise par une bande d'absorption à 860nm (HUNT et SALISBURY, 1971) on constate également l'influence de cet élément à 500 nm (KRISNA MURTI et SATYANARA, 1971)

- Les bandes d'absorption de l'eau s'identifient dans le proche infra-rouge à 1450nm et 1950nm. Elles sont plus ou moins bien marquées suivant la granulométrie de l'échantillon (SKIDMORE et al, 1975, BOWERS et SMITH, 1972).

- Le gypse se différencie par ses bandes dues aux groupements OH à 1150 et 1750nm.

- Les carbonates (étudiés par HUNT et SALISBURY, 1971) lorsqu'ils sont purs se distinguent dans l'infra-rouge moyen. Lorsqu'ils sont impurs, des vibrations se manifestent dans le proche infra-rouge. Il n'y a généralement pas d'absorption dans le visible.

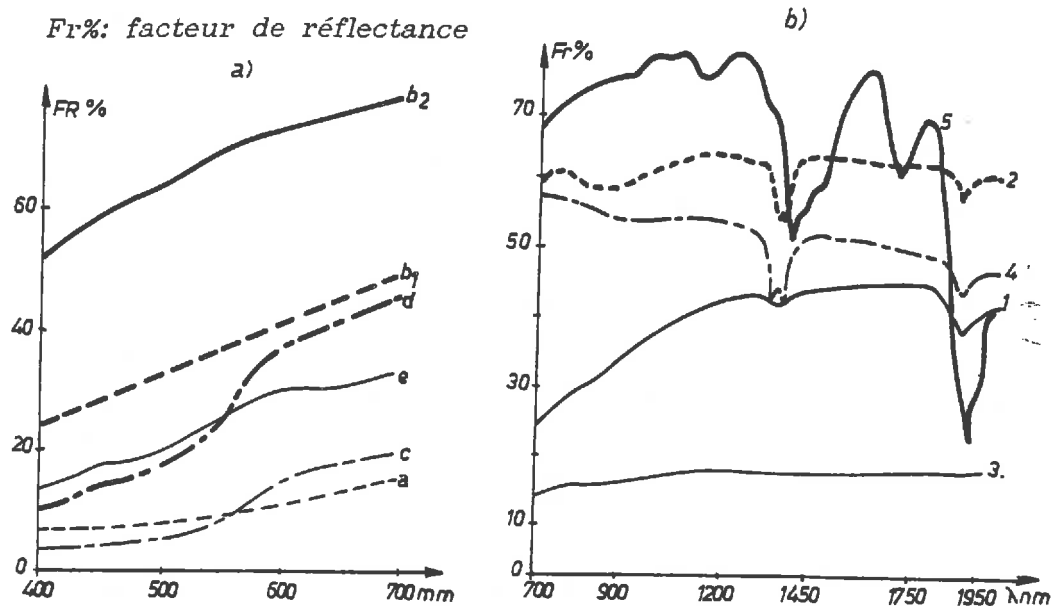


Fig.21. Principales formes de courbes spectrales rencontrées:  
(a) dans le visible et (b) dans le proche infra-rouge.

Tab.7 Relations entre les formes de courbes et les principaux constituants.

domaine spectral	cl	n	MO x	ec	CaCO <sub>3</sub> x	ec	Fer x	ec	Coul Me	iv
Visible	a	12	19,8	20,5	7,5	16,4	3,9	4,2	10YR3/2	3/2-3/3
	b1	4	1,1	0,6	90,2	0,2	2,2	2,2	10YR7/2	4/1-8/2
	b2	4	13,6	18,5	79,8	20,8	0,6	0,4	10YR8/2	6/2-8/2
	c	18	6,5	7,1	0		16,7	8,3	10YR4/3	3/4-4/4
	d	35	2,4	2,2	4,3	16,9	6,4	4,3	7.5YR6/6	6/6-6/8
	e	10	0,2	0,5	11,9	22,2	4,5	4,3	10YR7/2	6/3-8/4
pIR	1	27	7,6	13,5	29,2	35,5	2,3	2,4	10YR5/2	4/2-7/1
	2	39	1,6	3,5	8,5	18,8	7,2	7,8	10YR6/2	4/4-6/6
	3	11	14,1	14	0		9	7	10YR4/2	3/2-5/3
	4	5	4,0	5,5	0		9,5	8,8	10YR4/4	3/3-8/1
	5	1	0,3		3		0		10YR8/2	

a, b1, b2, c, d, e : principales formes de courbes spectrales dans le visible.

1, 2, 3, 4, 5 : principales formes de courbes spectrales dans le pIR

n : nombre d'échantillons

x : moyenne du constituant (%)

ec : écart-type

Me : valeur médiane de la couleur (terre sèche)

iv : intervalle de variation

- Les substances humiques ne sont pas clairement mises en évidence à une longueur d'onde bien définie (ceci étant peut-être dû aux différentes formes qu'elles peuvent prendre). STONER et BAUMGARDNER (1979) observent leur influence entre 400 et 500 nm et entre 520 et 620 nm. MATHEWS et al (1973) situent les bandes d'absorption des substances humiques entre 620 et 700 nm.

La difficulté pour identifier les constituants dans les sols et estimer leurs teneurs respectives, réside dans le fait qu'un échantillon de sol est rarement constitué d'un seul élément mais résulte de la combinaison d'un ensemble de constituants qui interfèrent entre eux. Les bandes d'absorption ne sont alors pas faciles à identifier, d'où l'intérêt d'analyser la forme générale des courbes (CERVELLE et al, 1988)

CONDIT (1970) a distingué 3 grands types de courbes entre 320 et 1000nm sur une série de 285 échantillons; STONER et BAUMGARDNER, (1981) différencient 5 types de courbes entre 500 et 2300nm sur 500 échantillons. Ces formes s'individualisent essentiellement en fonction de la présence ou de l'absence de substances humiques et de sesquioxydes de fer.

### 1.2. Différentes formes de courbes rencontrées

Nous avons différencié pour notre série : 6 classes de courbes dans le visible (380-700nm) et 5 dans l'infra-rouge (700-2300nm). Fig.21.

Ce tri résulte d'observations visuelles.

\* On a séparé ces deux domaines spectraux car une partie des relations auxquelles nous nous sommes intéressés ne concerne que le domaine du visible (couleur - réflectance).

- dans le visible, les distinctions ont été faites essentiellement en fonction des variations de pente.

- dans le proche infra-rouge, ce sont les bandes d'absorption plus ou moins marquées de l'eau, du fer ou du gypse qui ont guidé notre sélection.

Dans le tableau 7 (p. 65) sont présentés le nombre d'échantillons concernés pour chacune des classes avec leurs principales caractéristiques (teneur moyenne en matière organique, calcaire...) On remarque que les coefficients de variation sont élevés pour tous les éléments dans chaque classe et n'ont guère de signification. Ils ne permettent pas de caractériser une forme de courbe déterminée. Ce n'est qu'en faisant

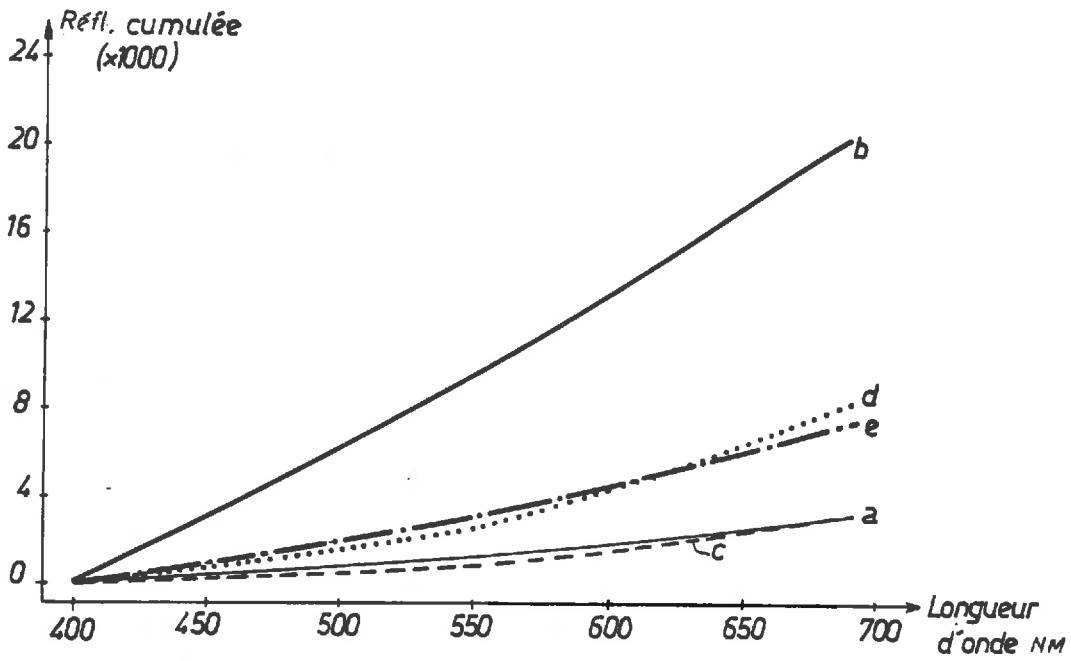


Fig.22. Intégrales des principales courbes dans le visible.

Tab.8. Valeurs des coefficients des polynômes pour les principales courbes spectrales du visible.

	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$r$
a	0,016	5,59	50,43	0,99
b	0,042	57,89	-29,78	0,99
c	0,039	-1,26	126,4	0,99
d	0,07	5,09	146,17	0,99
e	0,03	14,4	6,06	0,99

( $r$  : coefficient de corrélation du modèle)

des tests statistiques de  $X^2$ , ou des comptages que l'on en déduit certaines informations, comme par exemple que toutes les courbes concaves dans le visible correspondent à des échantillons sombres ayant au moins 8% de matière organique.

\* Les différentes classes du visible :

**a** : (type 1 de CONDIT), courbe concave, croissante, correspond à des échantillons très organiques ( $MO > 8\%$ ), de clarté faible ( $< 3$ ), les réflectances sont inférieures à 20%.

**b1** : courbe quasi linéaire, échantillons à la fois calcaires et organiques, les clartés et puretés Munsell sont faibles ( $\leq 2$ ). Ce sont des sols hétérogènes constitués de grains gris sombres organiques et blancs calcaires.

**b2** : (type 2 de CONDIT), courbe convexe, regroupe les échantillons très calcaires ( $> 40\%$ ), absence de matière organique et de fer, les réflectances sont supérieures à 25% (exception, le gley)

**c** : (type 3 de CONDIT) les valeurs de réflectance sont faibles dans le bleu et le vert (400-550nm) et quasiment constantes, puis elles augmentent légèrement à partir de 550nm et de nouveau on trouve un palier constant après 600nm. Ce sont des échantillons généralement sombres ( $< 10YR\ 4/4$ ), souvent organiques et qui contiennent du fer (6-30%) absence de calcaire.

**d** : courbe caractérisée par une inflexion marquée à 450nm suivie d'une dépression à 500nm, à 550 nm la pente devient forte. On trouve par exemple dans cette classe les sols ocres et ferrugineux des horizons profonds de podzols.

**e** : courbe qui se distingue des deux courbes précédentes par des absorptions plus marquées à 500nm et entre 600 et 700nm. Ce sont des échantillons à la fois organiques et ferrugineux qui peuvent être parfois légèrement calcaires.

\* Les distinctions faites dans le proche infra-rouge sont dues essentiellement à la présence ou à l'absence des bandes d'absorption de l'eau (classes 1 et 3), du fer (classes 2 et 4) et du gypse (classe 5). Une seule courbe est continuellement décroissante dans le pIR, il s'agit de la courbe 4 représentative d'un seul échantillon clair, contenant du fer.

Nous n'avons pu mettre clairement en évidence des relations entre les formes du visible et celles du proche infra-rouge. On remarque simplement que la classe 1 (courbe convexe dans le proche infra-rouge) est la plus représentée et peut s'associer avec toutes les formes de courbes dans le visible.

### 1.3. Essai de modélisation des formes de courbes spectrales du visible: calcul des intégrales

Un essai de modélisation mathématique des courbes a été envisagé à partir du calcul des intégrales des principales formes de courbes du visible. (avec l'aide de C. DUBY, INAPG et J. GAILLARD, SESCOF, Orléans). Les diverses "ondulations" observées sont alors éliminées et une fonction polynomiale du second degré suffit à caractériser chacune des classes. Fig.22. Tab.8.

$$S = k_1 * (\lambda_i)^2 + k_2 * (\lambda_i) + k_3$$

S, aire cumulée de la courbe.

$\lambda_i$ , longueur d'onde,  $\lambda_i$  varie de 380 à 700nm.

$k_1, k_2, k_3$  sont des constantes définies pour chaque type de courbe.

On peut distinguer trois ensembles parmi ces intégrales:

- la courbe b qui augmente très rapidement (elle correspond aux échantillons qui n'ont ni matière organique, ni fer).
- les courbes d et e qui sont liées à la présence de fer.
- les courbes a et c qui augmentent très faiblement avec les longueurs d'onde, elles regroupent les échantillons à la fois organiques et ferrugineux.

On retrouve ici les partitions faites par CONDIT (1970).

Des régressions et ACP entre les coefficients des polynômes  $k_1, k_2, k_3$  et les teneurs respectives en matière organique, fer et calcaire de chaque échantillon ont été calculées afin d'attribuer à un des paramètres un constituant particulier. Tab.9.

Tab.9. *Corrélation entre les coefficients des polynômes pour chaque type de courbe et les principales caractéristiques du sol.*

	<u>k1</u>	<u>k2</u>	<u>k3</u>
MO	- 0.017	-0.65	0.65
Fer	-0.36	-0.54	0.16
CaCO <sub>3</sub>	0	0.95	-0.78

On observe des corrélations positives entre le coefficient  $k_2$  et la teneur en calcaire (0.95) et entre le coefficient  $k_3$  et la teneur en matière organique (0.65). Le fer est corrélé négativement  $k_1$  et  $k_2$ .

Les coefficients des intégrales résultent là encore de combinaisons des différents éléments étudiés. On n'a donc pas poussé cette analyse plus loin. Le calcul des dérivées (1<sup>ère</sup> ou 2<sup>nde</sup>) serait peut-être plus intéressant ..

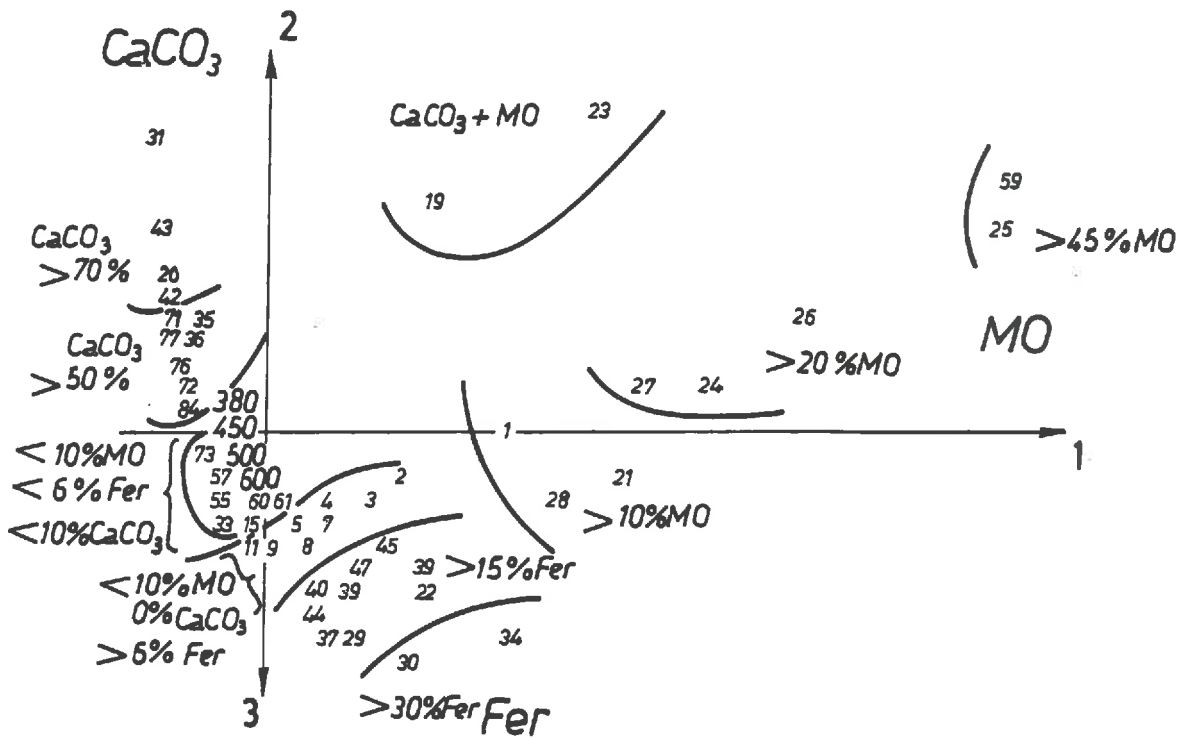
### Conclusion

L'analyse de la forme de la courbe spectrale dans le visible d'un échantillon de sol quelconque donne une information sur son contenu et sa couleur :

- forme concave (a) : échantillons sombres ( $\leq 10$ YR 3/3) et organiques (MO > 8%)
- forme convexe (b) : échantillons clairs ( $\geq 10$ YR 8/2), pas de matières organiques, le plus souvent calcaires
- forme concave dans les bandes spectrales bleues et vertes (400-500nm) et convexe à partir du rouge 550nm : (échantillons à la fois organiques et ferrugineux).
  - . Lorsqu'il y a deux paliers, c'est à dire des faibles variations de réflectance entre 400-500 nm et entre 600 - 700nm, les sols sont à la fois organiques et ferrugineux.(c)
  - . Lorsque l'on observe une pente forte à 550 nm, il s'agit d'échantillons le plus souvent rouges, ocres, contenant un pourcentage en fer élevé.(d)
  - . Enfin lorsqu'il y a une absorption marquée entre 600 et 700 nm, les échantillons sont organiques et parfois légèrement calcaires.(e)

Il s'agit d'indications plus qualitatives que quantitatives sur les caractères dominants des sols. Les différentes classes dans lesquelles on situe les échantillons sont larges.





l'axe 1 regroupe 45,5% de la population totale (essentiellement dû à la matière organique)  
 l'axe 2, 33,5% de la population, (il oppose le fer et le calcaire).

Fig.23. Projection des 84 échantillons suivant les 2 premiers axes de l'analyse factorielle de correspondance à partir des variables: constituants et réflectances dans le visible.

Dans cette partie, nous avons considéré essentiellement le rôle de la couleur et des constituants sur la forme de la courbe, l'humidité et la rugosité n'ont pas été abordées. En ce qui concerne la rugosité, nous avons vu que le type d'expérimentation effectuée ne nous permettait pas de la faire varier. CIERNIEWSKI (1988) constate que la rugosité ne modifie pas la forme de la courbe spectrale mais abaisse la réflectance de la même façon de 440 à 860 nm. En ce qui concerne l'humidité, BOWERS et al (1965, 1972), SHIELDS et al (1968) constatent le même phénomène, (pas de modification de la forme de la courbe spectrale mais un abaissement des valeurs dans le visible). Nous vérifierons ces résultats lorsque nous étudierons plus particulièrement le rôle de l'humidité sur la réflectance.

D'autres approches ont été effectuées pour préciser ces informations.

## 2. Relations constituants-réflectance (régressions-modélisations)

### 2.1. traitements statistiques

Par traitements statistiques (matrice de corrélation, ACP, régressions...) on cherche à quelle longueur d'onde, les réflectances sont le plus corrélées aux éléments étudiés. (cf matrice de corrélation, annexe.2.)

\* Matrice de corrélation :

Les corrélations totales sont faibles entre constituants et réflectances. Elles sont, dans la plupart des cas, plus élevées dans le visible que dans le proche infra-rouge, sauf pour le fer total qui apparaît plus corrélé aux réflectances dans le moyen infra-rouge (1750nm). Le calcaire est corrélé positivement avec les réflectances à 380, 400 nm ( $r=0.65$ ), le fer négativement avec les réflectances à 550, et 900 nm et au delà jusqu'à 1750nm, ( $r= 0.62$ ), la matière organique est corrélée négativement avec la réflectance à 600-700nm ( $r=0.4$ ).

Les trois constituants sont bien décorrelés entre eux et forment les axes principaux de l'analyse en composantes principales.

Une analyse factorielle de correspondance entre les trois constituants et les réflectances dans le visible fait nettement ressortir l'effet Gutmann. En effet, il y a une certaine continuité dans la distribution des points suivant les axes principaux (forme en "u"), les échantillons se différencient avant tout par leur composition, pLus

il y a de calcaire, moins il y a de matière organique. Les réflectances sont toutes regroupées au centre des axes .fig.23.

## 2.2. Relation entre la matière organique et la réflectance à 650 nm.

On observe deux ensembles bien distincts sur la figure 24.

- il y a d'une part les échantillons dont la teneur en matière organique(>8%) semble avoir un effet dominant sur la réflectance (<20%).
- et d'autre part les échantillons dont la teneur en matière organique (<1.5%) ne semble pas influencer la réflectance.

Entre ces "deux systèmes" relativement parallèles aux axes, il y a une dispersion plus importante des points que l'on peut modéliser par une relation de type exponentiel. Ces points correspondent à des échantillons de sols dont les teneurs en matière organique varient de 1.5 à 8%. Il s'agit des teneurs les couramment rencontrées pour les sols.

La relation est du type :

$$\text{Réflectance (650nm)} = a \cdot e^{(b \cdot \text{MO})} + c$$

a, b, c sont des constantes déterminées expérimentalement.

a= 25,8, b= -0.57, c= 14.6

Le coefficient de corrélation pour ce modèle est de 0.51.

Les relations entre la clarté Munsell des échantillons, les formes de courbes rencontrées dans le visible et la teneur en matière organique, sont également représentés sur cette figure.

- au dessus de 8% de matière organique, la réflectance est inférieure à 20%, les courbes sont concaves de 400 à 700 nm et les clartés de l'ordre de 2 ou 3. (que l'on ait 8 ou 60% de matière organique, le comportement spectral est le même)
- en dessous de 1.5% de matière organique, la réflectance varie de 20 à 80%, autrement dit, la matière organique ne semble plus intervenir sur la réponse spectrale.
- entre 1.5% et 8% de matière organique, la relation est quasiment linéaire entre la teneur en matière organique et la réflectance. (à partir de 4% de matière organique, les échantillons sont sombres (<10YR 4/4).

## 2.3. Relation entre le fer et la réflectance à 900 nm

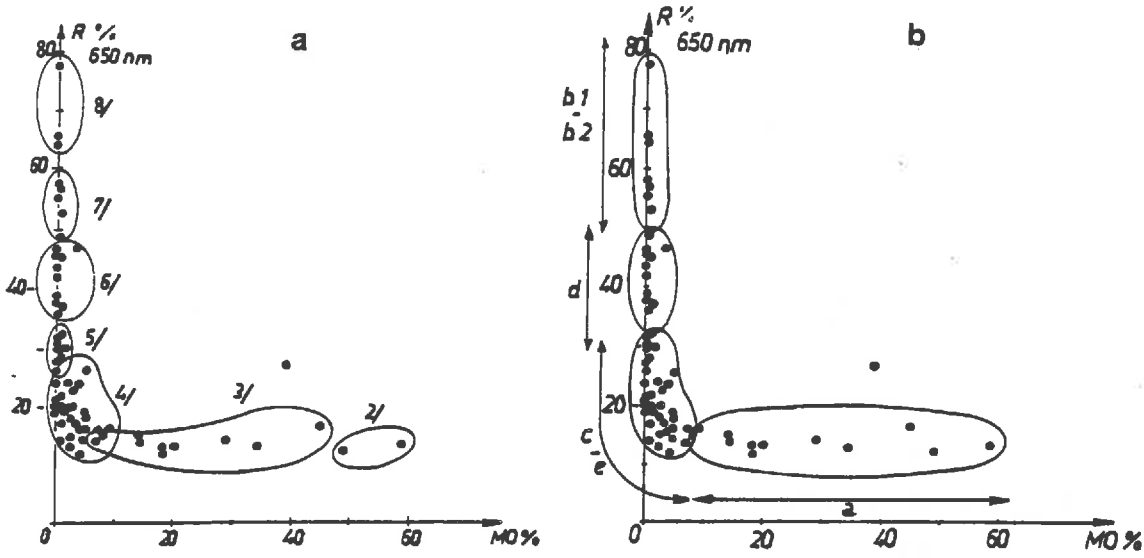


Fig. 24. Relation entre la matière organique et la réflectance à 650 nm, et (a) regroupement en fonction des clartés Munsell des échantillons et (b) en fonction des formes de courbes dans le visible.

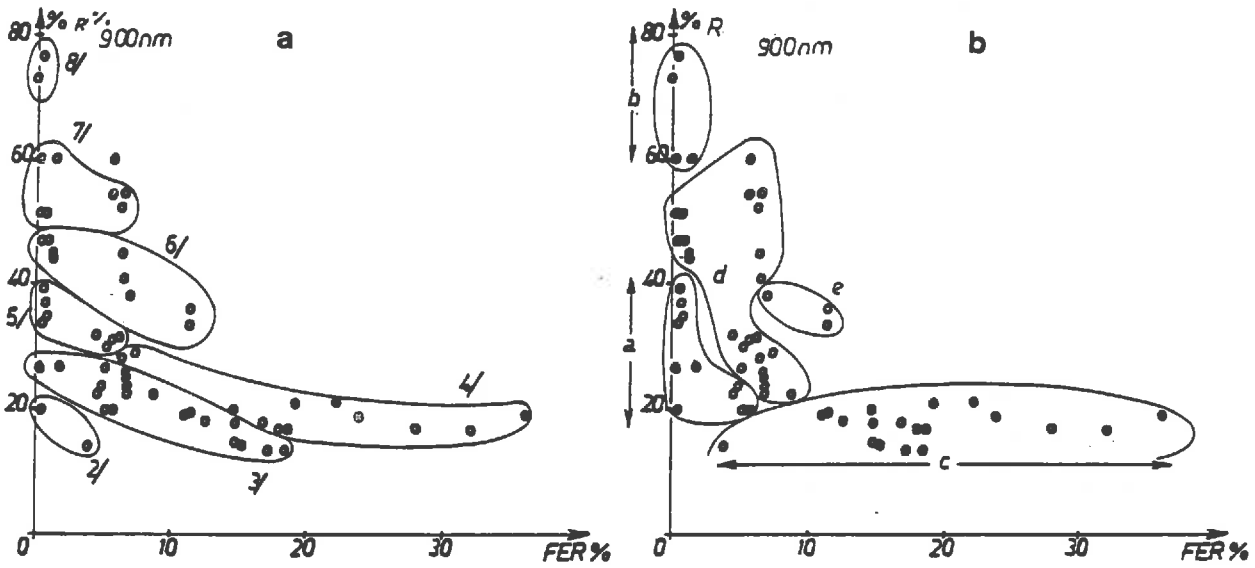


Fig. 25. Relation entre le fer total et la réflectance à 900 nm. (a) regroupement en fonction des clartés Munsell des échantillons et (b) en fonction des formes de courbes dans le visible.

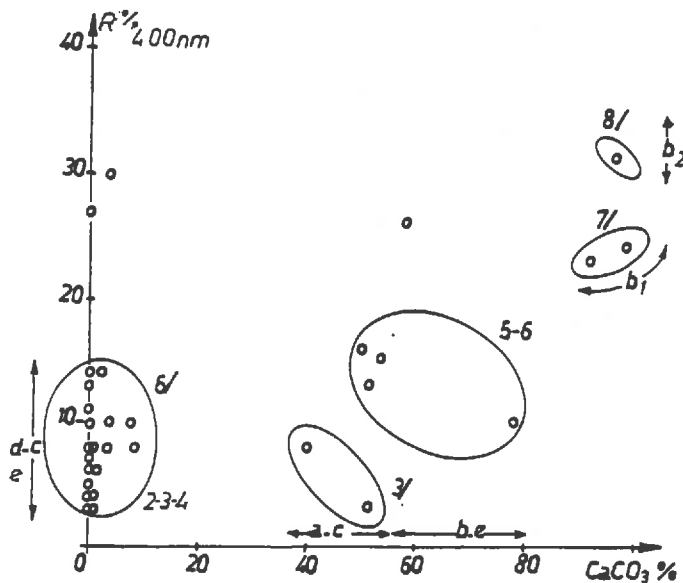


Fig. 26. Relation entre le calcaire et la réflectance à 400 nm, et regroupement en fonction des formes de courbes dans le visible et des clartés Munsell correspondantes.

Une relation du même modèle que précédemment a pu être mise en évidence entre la teneur en fer total et la réflectance à 900 nm (900 nm n'est pas la longueur d'onde la plus corrélée au fer, mais on a choisi préférentiellement les longueurs d'onde qui se situaient dans les bandes spectrales de Spot). Fig.25. La même relation est observée aux autres longueurs d'onde, notamment à 550 nm, mais les dispersions des points par rapport au modèle sont plus importantes. Le modèle d'ajustement a été calculé en considérant tous les points (84).

$$\text{Réflectance (900nm)} = a * e^{(b * \text{Fer})} + c$$

a=39.6, b=60.12, c=14.8 le coefficient de corrélation pour ce modèle est de 0.57.

- lorsque la teneur en fer est supérieure à 15%, la réflectance est inférieure à 20%, les clartés sont faibles < 4, les formes sont du type c ou d.
- en dessous de 2 à 3% de fer, la réflectance peut varier de 10 à 80%, le fer ne semble pas intervenir sur le signal mesuré.
- entre ces deux bornes, (de 5 à 15%), on trouve une relation quasi linéaire, avec une forte dispersion entre la réflectance et la teneur en fer.

#### 2.4. Relation entre le calcaire et la réflectance à 400 nm

Etant donné qu'il y a une forte disparité dans la distribution du calcaire (pas d'échantillons entre 10 et 20% de CaCO<sub>3</sub>), il n'y a pas de relations qui apparaissent nettement entre la réflectance à une longueur d'onde quelconque et la teneur en calcaire. On observe deux ensembles, Fig.26.

- Pour les échantillons dont la teneur en calcaire est inférieure à 10%, la réflectance varie de 5 à 60%, le calcaire ne joue apparemment aucun rôle sur la réponse spectrale, et les variations sont dûes principalement aux autres constituants (gypse, fer..).
- Pour les échantillons qui ont une teneur supérieure à 40%, la réflectance augmente alors de façon significative avec la teneur en calcaire. On a une relation quasiment linéaire entre ces deux facteurs. Les clartés de ces sols augmentent également de façon linéaire avec la teneur en calcaire à partir de 40%.

## Conclusion

Certaines réflectances à des longueurs d'onde bien précises apparaissent plus liées à tel ou tel constituant. Il s'agit pour la matière organique de la réflectance à 650 nm, pour le fer de la réflectance à 900 nm, et du calcaire de la réflectance à 400 nm. Les relations pour les deux premiers constituants sont de type exponentielles, et pour le dernier plutôt linéaires. Mais il reste des dispersions importantes autour de ces modèles. On a pu mettre en évidence des limites qui nous apportent des informations sur les différents domaines de variation de chacun des éléments étudiés. On résume sur le tableau ci dessous les limites de ces divers domaines. Tab.10.

Tab.10. Récapitulatif des principaux effets des facteurs étudiés sur la réflectance .

Effet sur R constituants	aucun effet	influence sur R	effet dominant
Matière Organique	<1,5%	de 1,5 à 8% R ↘	>8% courbe concave
Calcaire	<10%	de 10 à 40% R ↗	>40% courbe convexe
Fer Total	<5%	de 5 à 15% R ↘	>15% absorption

R : réflectance

Si l'on veut étudier les variations de rugosité sur un sol quelconque, il faudra donc connaître les différentes teneurs de ces trois principaux constituants, afin de savoir dans quel domaine l'on se trouve pour mieux interpréter la réponse spectrale du sol. Pour obtenir un effet moindre de ces constituants, il est préférable de se placer dans les conditions suivantes :

- MO < 1.5%
- CaCO<sub>3</sub> < 40%
- Fe < 5%

Pour obtenir des informations plus précises sur la composition du sol à partir des réflectances, il faut chercher d'autres méthodes d'analyses. On s'est intéressé alors aux calcul d'indices ou de combinaisons de réflectances à différentes longueurs d'onde. Le modèle DIMITRI (GIRARD, 1983<sup>1</sup>, KING., 1987) a été utilisé pour trier les échantillons suivant leur composition en fonction de leur réponse spectrale. (COURAULT et al, 1988<sup>2</sup>)

### 3. Application du modèle DIMITRI

#### 3.1. Principe du modèle

Il s'agit d'un modèle basé sur le calcul de la **DI**stance **MI**nimum pour **TR**ier les individus.

Dans notre série de 84 échantillons, chaque sol est défini par  $n$  variables : les réflectances aux différentes longueurs d'onde, la couleur, les teneurs en calcaire, fer et matière organique

#### 3.2. Choix des variables

- La première étape consiste à choisir les variables utiles pour différencier les échantillons. On a choisi d'examiner des combinaisons de réflectance. Différents indices issus de la bibliographie ou de nos propres observations ont été calculés. Leurs corrélations vis à vis des constituants ont été étudiées par des régressions, ACP..

Finalement trois indices ont été retenus pour notre étude. Ils ont constitué les variables à partir desquelles s'est fait le tri des échantillons. Ce sont les suivants : Tab.11.

SK = réflectance (450nm) + réflectance (650nm)

RF = réflectance (750nm) - réflectance (900nm)

SO = réflectance (750nm) / réflectance(450nm)

*Tab. 11 . Matrice de corrélation entre les indices choisis pour Dimitri et les constituants.*

RF	1					
SO	0.16	1				
SK	-0.02	0.77	1			
Fe	0.52	-0.39	-0.44	1		
CaCO <sub>3</sub>	-0.4	0.04	0.42	-0.25	1	
MO	-0.18	-0.46	-0.34	-0.11	0.01	1
	RF	SO	SK	Fe	CaCO <sub>3</sub>	MO

Le choix des variables étant fait, on partitionne les valeurs de celles-ci en classes que l'on code de 1 à 5. (On a choisi le même nombre de classes pour chacune des variables, afin de ne pas privilégier l'une d'entre elles par rapport aux autres). Le

tri se fait à partir du calcul de la distance euclidienne entre chaque variable de chacun des individus comparée aux variables des individus références. (la distance maximale entre deux individus pour une variable donnée est égale à la différence 5-1=4).

On a représenté la répartition des 84 échantillons suivant leurs codes pour chacune des variables étudiées. (Fig.27.) Aux échantillons compris dans une classe donnée, sont associées leurs teneurs respectives en calcaire, fer et matière organique. Fig.28.p 79.

Les classes ainsi codées nous donnent des informations sur les domaines de variation des trois éléments étudiés.

En effet, pour chacune des variables, il y a au moins une ou deux classes qui ne contiennent pas un de ces trois éléments cités. Par exemple, les classes 1 et 2 de la variable SK ne contiennent pas de calcaire, par contre dans la classe 5 de la même variable, la teneur du calcaire peut varier de 0 à 98%. De même pour la variable RF, dans la classe 1, le fer varie de 0 à 5%, dans la classe 2, il varie de 0 à 10%... au fur et à mesure que le code de la classe augmente, l'intervalle de variation du fer augmente. Ce sont donc les classes où les intervalles de variation seront minimums qui nous apporteront le plus d'informations sur les caractéristiques du sol.

### 3.3. Choix des références

La seconde étape consiste à sélectionner des "individus références". Chaque référence regroupe les échantillons qui lui sont le plus proche par le calcul des distances entre variables, il se forme alors un "noyau". La moyenne des distances intra-noyaux doit être minimale et celle des distances inter-noyaux, maximale. Ces noyaux sont mobiles. Pour chaque noyau, on regarde l'histogramme des échantillons en fonction du code de chaque variable. Si celui-ci est unimodal, le tri est accepté, sinon un découpage est refait en changeant les références. Plusieurs approximations sont ainsi effectuées pour ajuster au mieux la classification.

Pour notre étude, l'objectif étant de distinguer les échantillons en fonction de leur composition, des "individus extrêmes" ont été choisis comme références, c'est à dire où un seul des éléments cités est représenté en grande quantité. Il s'agit des échantillons dont les caractéristiques figurent sur le tableau suivant : Tab.12.



Fig.27. Répartition des 84 échantillons suivant le codes de chacune des variables SK, RF et SO.

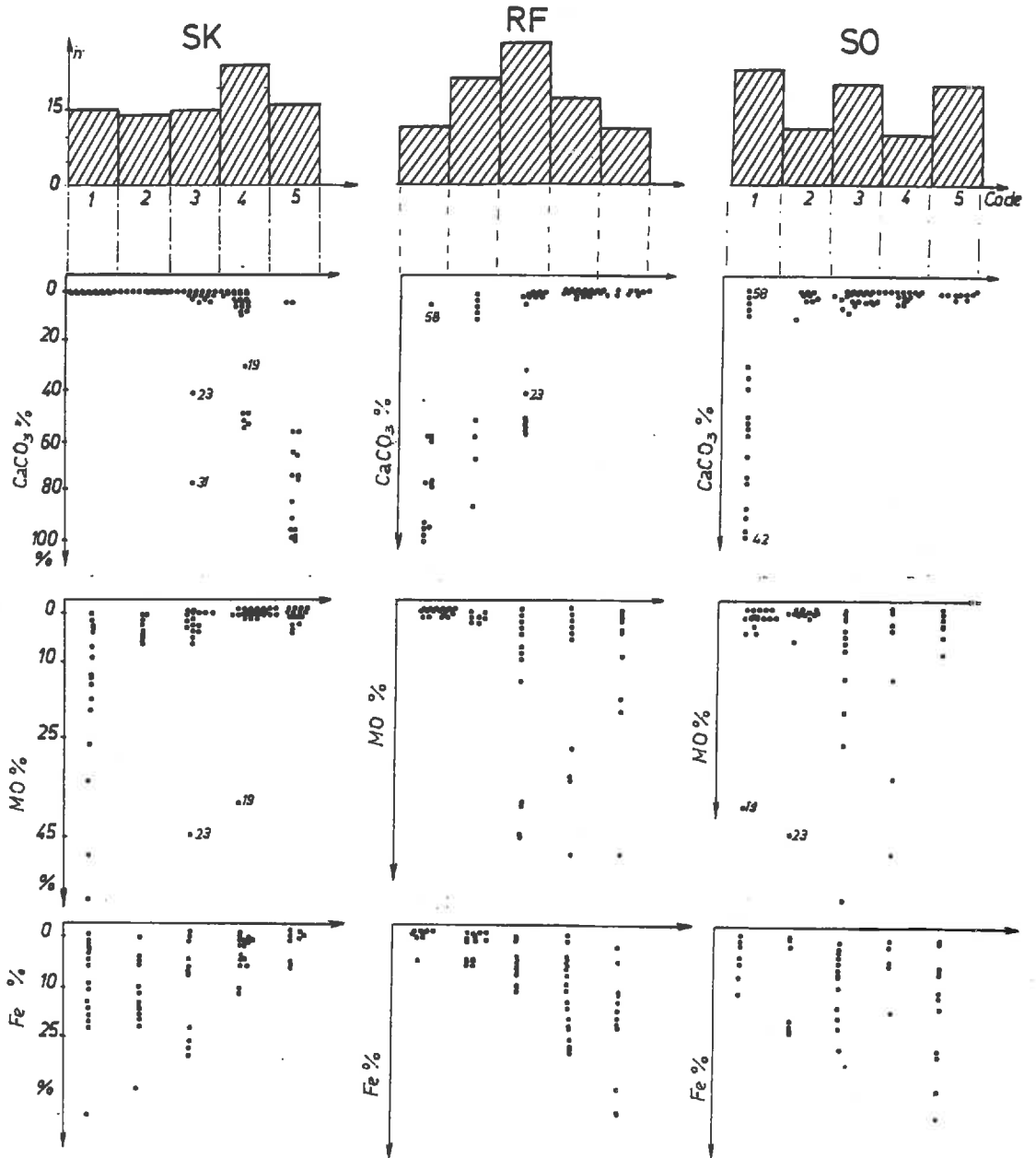
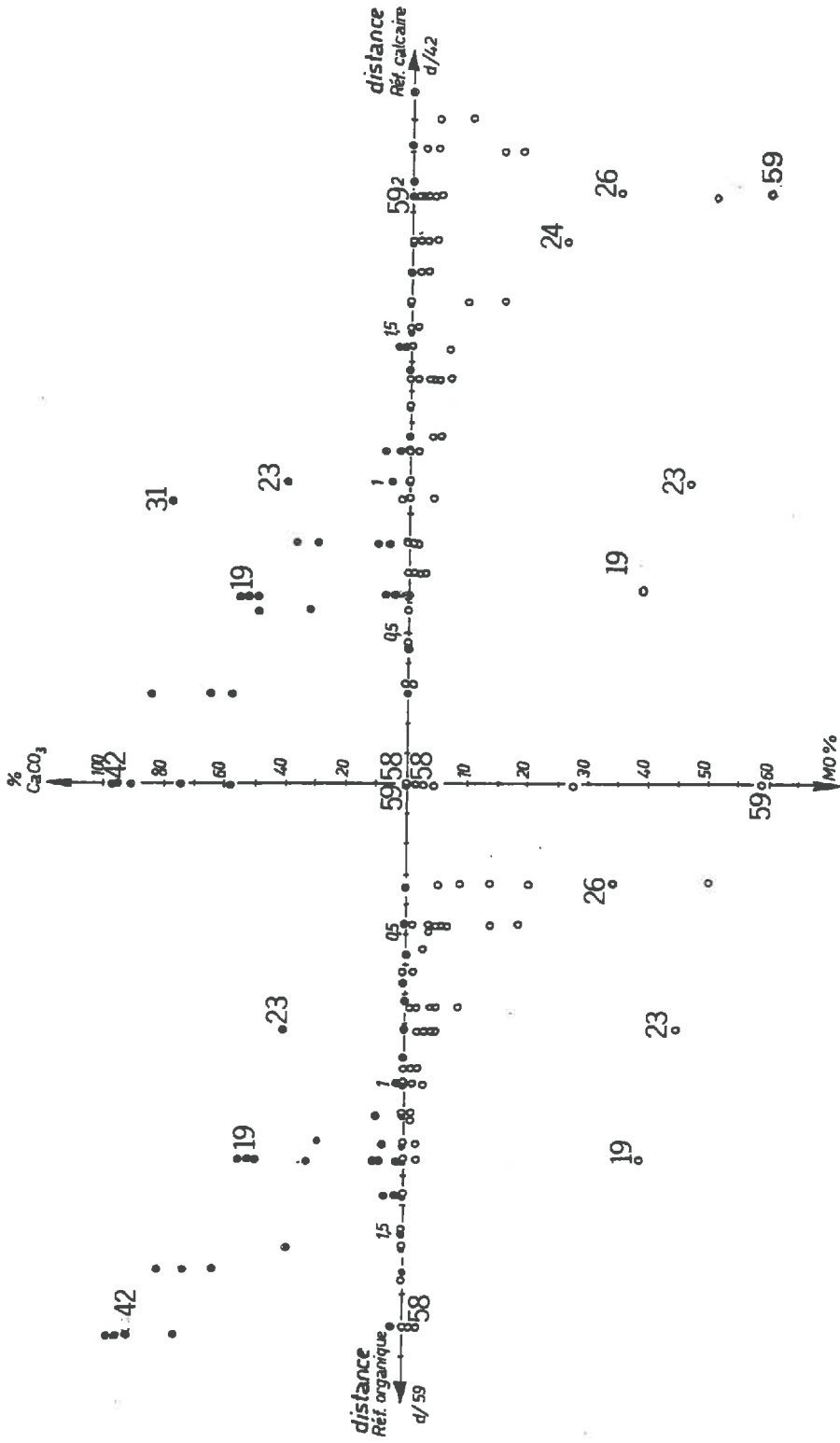


Fig.28. Répartition des différentes teneurs en calcaire, matière organique et fer total des 84 échantillons suivant les 5 classes retenues pour la classification.



(chaque point représente un échantillon classé en fonction de sa distance par rapport à l'une de ces références et sa teneur en calcaire (partie supérieure du graphique) ou sa teneur en matière organique (partie inférieure du graphique)).

Fig.29. Résultat des tris effectués successivement par rapport à la référence calcaire (42) et à la référence organique (59).

Tab. 12 . Caractéristiques des individus références choisis pour effectuer le tri.

	MO%	Fe%	CaCO <sub>3</sub>
42	0	0	96
59	58	0,28	0
37	0	22	0

### 3.4. Classement effectué

#### a). Tri effectué à partir d'une seule référence

Dans un premier temps, les échantillons sont classés en fonction de leurs distances calculées par rapport aux trois références prises individuellement. Trois tris sont donc effectués successivement. Le premier classe les 84 échantillons en fonction de leur distance vis à vis de la référence organique, le second les situe par rapport à la référence calcaire et le troisième à la référence ferrique.

La distance de chaque échantillon par rapport à une référence choisie (59, 42 ou 37) est mise en relation avec sa teneur respective en calcaire, fer ou matière organique. Fig.29.

La même remarque que pour la figure 28 peut être faite ici, les intervalles de variations des éléments étudiés varient de façon exponentielle par rapport à la distance. Plus les distances sont élevées par rapport à la référence calcaire(42) par exemple, plus la teneur des échantillons en cet élément est faible, elle devient même nulle à partir d'une "distance seuil" de 1.1. Inversement, plus on se rapproche de cette référence calcaire, plus les domaines de variations des échantillons en calcaire augmentent. Lorsque la distance des échantillons est inférieure à 0.8, leur teneur en calcaire peut varier de 0 à 98%.

Les constituants ne sont pas les principaux facteurs explicatifs de ce tri. La couleur intervient également, notamment la clarté, c'est le cas de l'échantillon 58, gypseux qui n'a pas de calcaire mais qui est très clair et qui est classé à la distance 0 de la référence calcaire.

On peut noter également que les échantillons à la fois calcaires et organiques (n° 19 et 23) se distinguent nettement de l'ensemble de la série, puisqu'ils ne suivent pas la distribution exponentielle des autres points.

Des "distances seuils " ont pu être ainsi mises en évidence pour une référence choisie. Ces distances "seuils" sont significatives de variations importantes pour l'un des trois éléments étudiés. Tab.13.

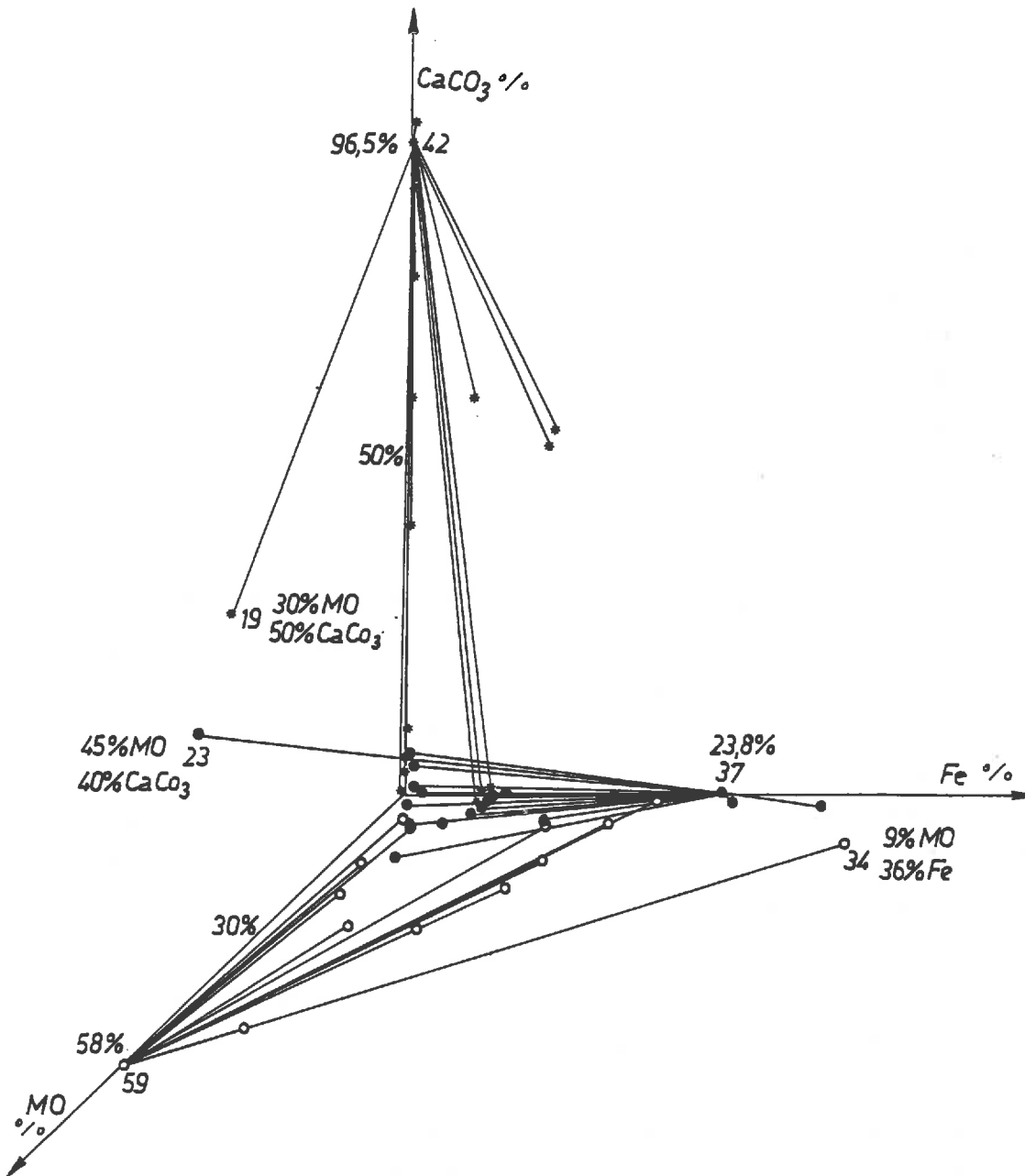


Fig.30. Résultat du tri effectué à partir des trois références prises simultanément.

(chaque point est représenté en fonction de sa teneur en matière organique, calcaire et fer total et il est rattaché au noyau auquel il a été associé après DIMITRI).

Tab.13. Distances seuils mises en évidence lors des tris effectués par rapport à la référence calcaire (a) et la référence organique (b).

Dist. seuil/réf42 teneur const.	d<0,8	0,8 -1,37	>1,37
Matière Organique	0-2 %	0-10%	0-60%
Calcaire	0-100%	0-10%	0%
fer	0-12%	0-22%	0-36%

Dist. seuil/réf59 teneur const.	d<0,74	0,74-1,2	>1,2
Matière Organique	0-60%	0-50%	0-100%
Calcaire	0%	0-10%	0-100%
fer	0-20%	0-36%	0-6%

b). Tri effectué à partir de trois références

\* Un tri des 84 échantillons est effectué en considérant les trois références (42, 59, 37) simultanément. Fig.30. Trois noyaux se forment, dont les caractéristiques sont les suivantes. Tab.14.

tab. 14 . Résultat du tri des 84 échantillons par rapport aux trois références .

	nb	MO%	CaCO <sub>3</sub> %	Fe%
noyau calcaire	35	0-5	0-100	0-12
noyau organique	20	0-60	0	3-20
noyau ferrique	29	0-6	0-5	1-35

\* Commentaires :

Le noyau calcaire (échantillons groupés autour de la référence 42) ne regroupe pas que des échantillons dont les teneurs sont élevées en calcaire, les teneurs des échantillons varient en effet de 0 à 100%. Par contre, il s'agit de sols très peu organiques. De même pour le noyau organique, la teneur des échantillons en ce dernier élément peut varier de 0 à 60%, mais il n'y a pas de calcaire.

Pour chacun des noyaux formés, le tri apporte une information utile non pas sur le constituant qui caractérise la référence la plus proche, par sa teneur élevée, mais plutôt sur les constituants peu dominants ou absents pour cette référence.

A partir du calcul des distances entre variables issues directement des réponses spectrales des sols ou de leurs combinaisons, on peut donc trier les sols en fonction de leurs principaux constituants.

#### 4. Importance de la variable Couleur sur la réponse spectrale des sols

Précédemment, on a observé les relations entre les constituants et la couleur, notamment lors de l'étude des formes de courbes dans le visible (Fig.24, p 59). La couleur est un des critères d'explication des réponses spectrales des sols. (exemple de l'échantillon gypseux clair classé précédemment dans le noyau calcaire). Il semble donc intéressant d'analyser plus particulièrement à ce facteur vis à vis de la réflectance.

##### 4.1. Intérêt pour les sols et principe de la charte Munsell

La couleur est une variable descriptive importante pour la caractérisation d'un sol. Sur le terrain, les pédologues utilisent la charte Munsell ou des référentiels (pédocomparateur) pour comparer les différents horizons pédologiques rencontrés.

Cette appréciation visuelle de la couleur des sol est généralement codée, et basée sur des comparaisons du sol avec des étalons colorés hiérarchisés sur différentes planches. Le système Munsell hiérarchise les couleurs en distinguant d'abord la teinte (hue), la clarté (value), et enfin la pureté (chroma) qui exprime la saturation de la couleur.

A chaque planche correspond une teinte, l'ensemble des teintes se répartit sur un cercle et forme donc une sorte de cylindre. Pour les sols, une partie seulement du cercle est utilisée (10R - 5GY). WYSESKI et STILES, 1982.

L'axe achromatique représente le centre du cylindre. Les clartés varient suivant cet axe de 2 à 8. Les valeurs de pureté varient dans un plan orthogonal à celui des clartés. Plus on s'éloigne de l'axe des gris (achromatique) plus la couleur devient pure. Fig.31.

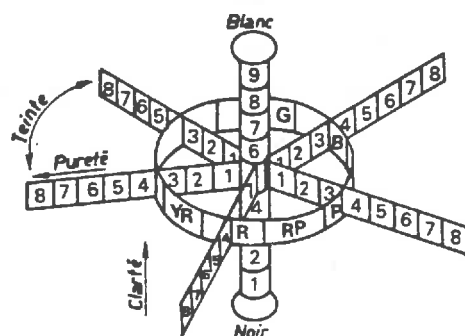


Fig.31. L'espace des couleurs Munsell et ses coordonnées cylindriques.

4.2. Relation avec les constituants :

De nombreuses études (SHIELDS et al, 1968, KARMANOV, 1970, TORRENT et al, 1980, BARRON, 1984) ont porté sur les corrélations entre la couleur et les constituants des sols. Les relations les plus souvent étudiées sont celles qui relient le fer avec la couleur rouge ou ocre des sols (KARMANOVA,1981, KEMP,1985). Des indices de rougeur ont été calculés à partir des coordonnées Munsell ou des coefficients colorimétriques et sont corrélés positivement avec la teneur en hématite. (TORRENT et al, 1983).

La matière organique et l'argile sont corrélées négativement avec la clarté (MATHEWS et al,1973,CIPRA et al, 1980).

En ce qui concerne la série des 84 sols, il semble que le principal facteur de variation soit avant tout la clarté. C'est en effet celui qui semble le plus corrélé aux éléments étudiés.Tab.15.

*Tab.15. Matrice de corrélation entre les constituants et les coordonnées cylindriques de la couleur Munsell.*

MO	1					
Fe	-0.014	1				
CaCO <sub>3</sub>	-0.054	-0.296	1			
Teinte	0.127	-0.011	0.088	1		
Clarté	-0.501	-0.495	0.482	-0.07	1	
Pureté	-0.249	0.05	-0.353	-0.412	0.016	1
	MO	Fe	CaCO <sub>3</sub>	Teinte	clarté	pureté

Ce paramètre varie en effet proportionnellement avec la teneur en calcaire et inversement avec la teneur en matière organique.

Plus la teneur en matière organique diminue, plus la clarté augmente. A partir de 8% de matière organique, la clarté est quasiment invariante et inférieure à 4.Fig.32.b.

Le calcaire inversement tend à augmenter la clarté pour des teneurs supérieures à 40%. la relation est quasiment linéaire à partir de 40% de CaCO<sub>3</sub>. Fig.32.a.

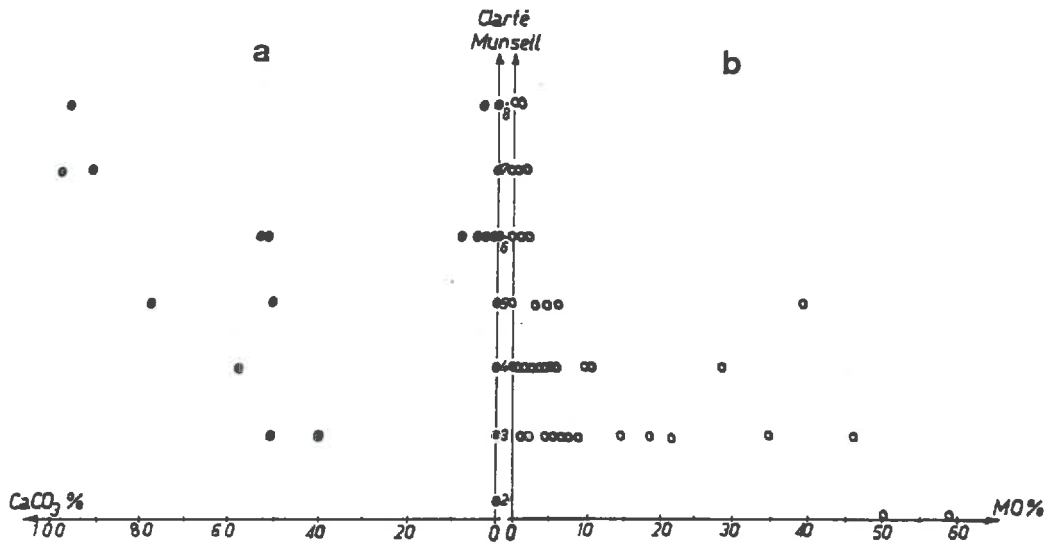


Fig.32. Relation entre la clarté Munsell et les constituants :  
(a) le calcaire et (b) la matière organique.

Les relations avec le fer sont peu satisfaisantes du fait peut-être que l'on a considéré dans cette étude le fer total et non le fer libre. Ce dernier aurait été sans doute mieux corrélé avec la couleur (KARMANOVA, 1981, TORRENT et al, 1983, BARRON, 1984).

Pour notre série, les variations de teintes sont peu importantes, la majorité des échantillons se trouvent sur la même planche 10YR.

#### 4.3. Variation de la couleur en fonction de l'humidité

On compare les couleurs des échantillons de sols séchés à l'air (PF 6) à celles des mêmes échantillons quasiment saturés (PF 1). On représente les variations des trois termes du système Munsell lors de cette transformation. Fig.33.

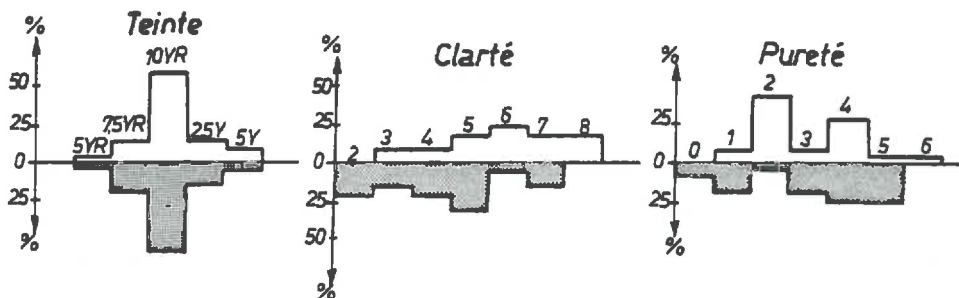


Fig.33. Distribution des valeurs de teinte, clarté et pureté des échantillons à l'état sec (pF6, en blanc) et à l'état humide (pF1, en noir).

En ce qui concerne la teinte, elle varie peu, 4 échantillons seulement changent de teinte lors du passage sec à humide. Lorsque l'on hydrate les sols, la classe modale des teintes (10YR) diminue légèrement pour s'étaler de chaque côté (7.5YR-2.5Y). Ce sont les valeurs de clarté et de pureté qui semblent le plus modifiées par l'humidité.



On note plus de changement dans la clarté que dans la pureté. Plus de 55% des échantillons augmentent au moins d'une unité de clarté lors de la deshydratation, les échantillons qui varient le plus sont sableux (+ 3 unités).

On observe une translation des valeurs de clartés suivant l'axe achromatique des états humides à secs.

En ce qui concerne la pureté, on note une augmentation des valeurs de pureté d'ordre 2 lorsque l'échantillon se deshydrate, la transformation inverse entraîne une augmentation des valeurs 0 et 1, on se rapproche de l'axe des gris. Fig.34.

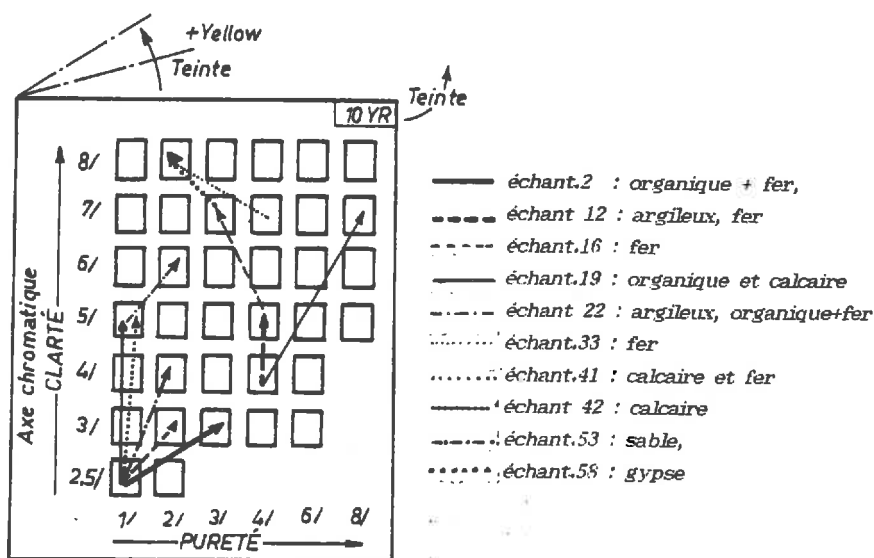


Fig.34. Transformation des couleurs de quelques échantillons lors du passage sec à humide (pF6 - pF1).

La clarté ne varie pas linéairement en fonction de l'humidité, d'autres facteurs interviennent comme la texture et les constituants...Des échantillons très organiques restent toujours sombres, les variations d'humidité sont importantes pour de faibles variations de clarté. Fig.35.

#### 4.4. Relations avec les propriétés spectrales, modélisation

Les résultats présentés dans cette partie ont été obtenus à la suite d'un travail effectué avec R.ESCADAFAL .(ESCADAFAL et al, 1988, 1989<sub>2</sub>, COURAULT et al, 1988<sub>1</sub>)

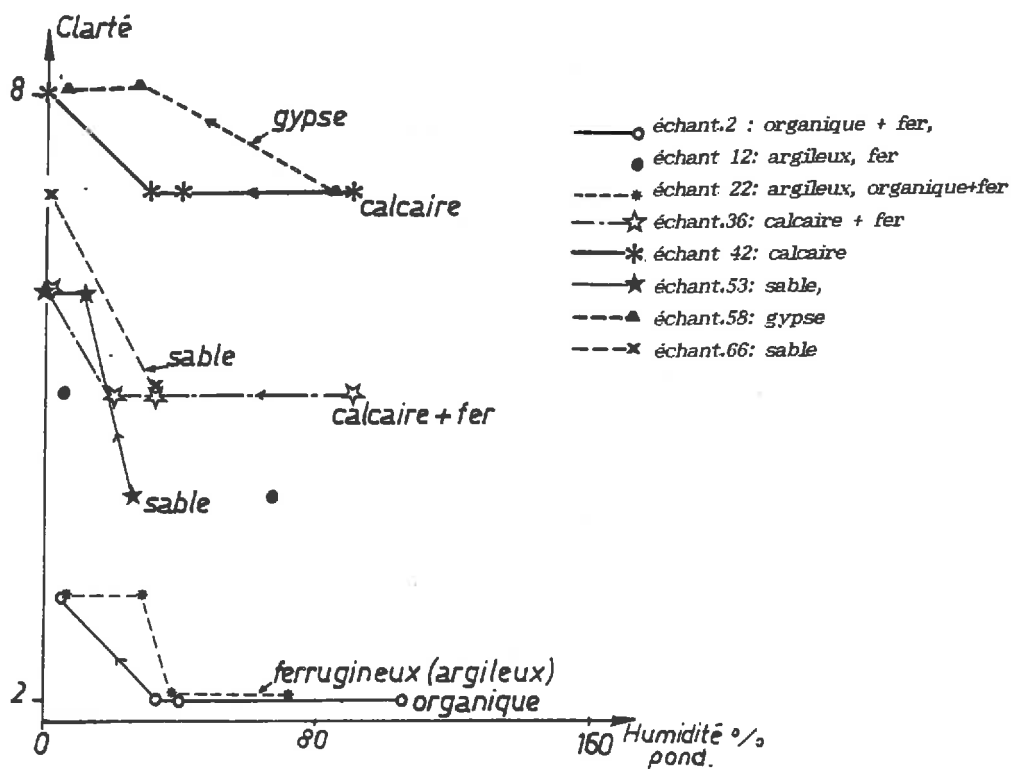


Fig.35. Relation entre l'humidité pondérale de quelques échantillons à différents pF et la clarté Munsell correspondante à chaque état.

a). Rappel des éléments de colorimétrie

Les lois de la colorimétrie montrent que chaque couleur peut être reproduite par un mélange de trois lumières colorées indépendantes dites primaires :

- le rouge (700nm) R
- le vert (546 nm) G
- le bleu (436 nm) B

Une couleur quelconque (C) peut donc s'écrire :  $\vec{C} = r\vec{R} + g\vec{G} + b\vec{B}$

r, g, b sont les coordonnées trichromatiques dans le repère R,G,B.

Lorsque  $r=g=b=1$ , la couleur est blanche (W), la droite qui relie ce point W à l'origine est l'axe achromatique.

Le système RGB présente l'inconvénient d'utiliser des valeurs négatives. Pour simplifier ces notations, on effectue un changement de repère et on définit les composantes XYZ suivantes :

$$X = 2.76 R + 1.75 G + 1.13 B$$

$$Y = R + 4.59 G + 0.06 B$$

$$Z = 0.056 G + 5.59 B$$

Y représente la luminance

La couleur du sol peut donc être définie à la fois dans le système trichromatique RGB et dans le système cylindrique Munsell.

La géométrie de l'espace RGB et celle de l'espace Munsell se sont pas les mêmes. Pour passer de l'une à l'autre notation, il ne suffit donc pas d'un simple changement de repère. Il existe des tables de conversion qui permettent le passage de XYZ à des notations Munsell.

b). Calcul de la couleur d'après les courbes de réflectance

Selon les lois de la colorimétrie, il est possible de calculer la couleur produite par un objet de réflectance  $C(\lambda)$  par les équations suivantes :

$$R = \int_{380}^{780} C(\lambda) * H(\lambda) * r(\lambda) * d(\lambda)$$
$$G = \int_{380}^{780} C(\lambda) * H(\lambda) * g(\lambda) * d(\lambda)$$
$$B = \int_{380}^{780} C(\lambda) * H(\lambda) * b(\lambda) * d(\lambda)$$

$H(\lambda)$  répartition spectrale d'énergie de la source lumineuse.

$d(\lambda)$  différentiel

A partir de ces coordonnées R,G,B, on passe à XYZ, puis aux notations Munsell. Les valeurs de RGB calculées à partir de la courbe spectrale sont ainsi comparées à celles issues des couleurs Munsell observées au laboratoire. Les corrélations sont élevées pour les trois composantes R,G,B.( $r > 0.9$ ). On en déduit donc que l'on évalue assez bien les couleurs au laboratoire dans des conditions très précises. *Il est donc possible d'associer à une courbe spectrale une couleur bien définie.*

### c). Inversion du modèle

On s'intéresse à présent à l'inversion du modèle précédent en essayant de répondre à la question suivante :

- Peut-on prévoir le comportement spectral d'un sol si l'on connaît sa couleur?

Le phénomène de métamérisme interdit théoriquement ce passage.

Ce terme désigne le fait que des objets de propriétés spectrales différentes peuvent produire la même sensation colorée (un exemple en est le vert qui peut résulter d'une seule bande monochromatique à 600nm verte, ou de la combinaison de deux bandes spectrales à 450 et 650nm, jaunes et bleues).

Des études ont montré que les courbes de réflectance d'objets métamères doivent se recouper au moins trois à cinq fois (OHTA et WYSZECKI, 1977). Or en ce qui concerne les sols, toutes les courbes sont croissantes et monotones dans le visible et ne se recoupent que deux fois au maximum. *On fait donc l'hypothèse que le phénomène de métamérisme est peu probable dans les sols* et qu'à une couleur donnée correspond une courbe spectrale et une seule.

Pour tester cette hypothèse, les corrélations multiples sont calculées entre la couleur RGB observée et la réflectance  $Re(\lambda)$  aux différentes longueurs d'ondes (de 450 à 750 nm) suivant le modèle :

$$Re(\lambda) = a\lambda * R + b\lambda * B + c\lambda * G + d$$

a, b, c, d, constantes définies pour chacune des longueurs d'onde testées pour le modèle de régression multiple.

Les coefficients de corrélation élevés ( $> 0.9$ ) montrent qu'il est possible de reconstruire la courbe spectrale à partir des valeurs RGB calculées. Fig.36.

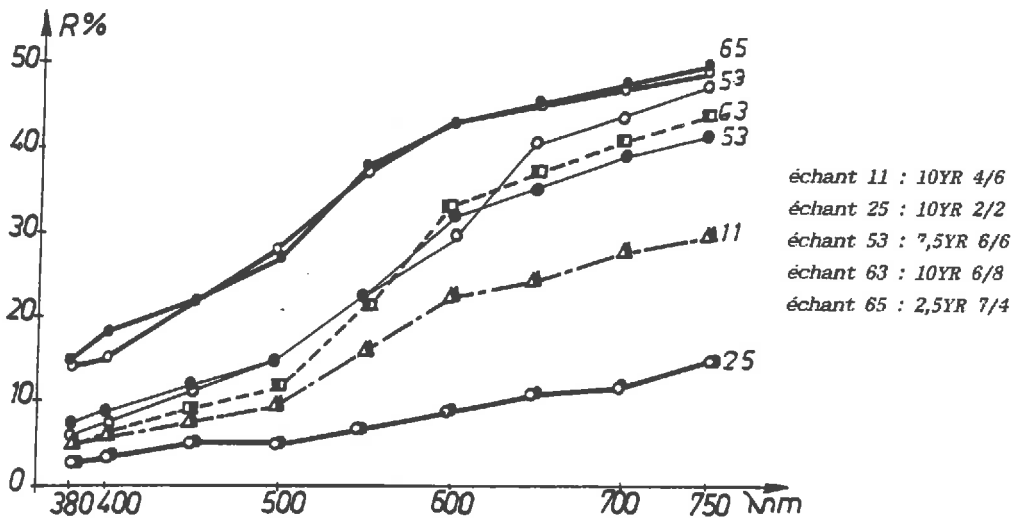


Fig.36. Comparaison des courbes spectrales modélisées (●) et des courbes spectrales mesurées avec le spectrophotomètre (○) de quelques échantillons. (ESCADAFAL et al, 1988)

### Conclusion

Ce travail montre bien que la couleur des sols est une information utilisable pour estimer le comportement spectral des sols dans le domaine du visible. En se basant sur les lois de la colorimétrie, on montre qu'à partir de la courbe spectrale d'un sol quelconque, la couleur du sol peut être retrouvée, et par le modèle inverse, grâce à la fréquence négligeable du métamérisme dans les sols, il est possible de préciser les réponses spectrales de sols dont on connaît la couleur Munsell.

### 5. Rôle du facteur humidité sur la réflectance

#### 5.1. Comportement des sols étudiés à différents stades d'humidité

Suivant la nature du sol (texture, composition..) le comportement vis à vis de l'eau varie. Les phénomènes d'absorption et de rétention en eau sont différents suivant le pourcentage d'argile ou de matière organique des sols. Ces variations de comportements en fonction de l'humidité s'observent sur les courbes de déshydratation obtenues sur quelques échantillons. Fig.37.



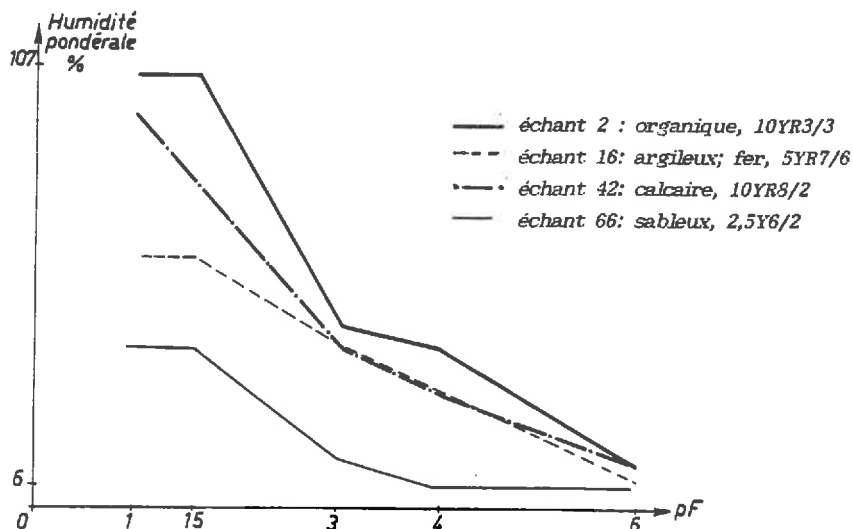


Fig.37. Courbes de deshydratation obtenues sur quelques échantillons de couleur et de composition variées.

Les échantillons sableux se distinguent nettement des échantillons argileux. Pour des mêmes pF, le pourcentage d'humidité est plus important pour les sols argileux, à cause de leur capacité de rétention en eau plus forte que pour les sols sableux.

Les échantillons calcaires présentent une courbe de déshydratation plutôt concave, alors que les échantillons organiques présentent des courbes à tendance convexes pour des pF inférieurs à 3.

Les relations entre le pourcentage d'argile et l'humidité pondérale des échantillons montrent deux systèmes pour notre série. Fig.38.

- il y a d'une part les échantillons qui présentent une forte variation d'humidité pour de faibles variations d'argile. Ces variations sont dues essentiellement à la présence de calcaire, matière organique ou gypse.

- et d'autre part, les échantillons qui présentent de fortes variations d'argile pour de faibles variations d'humidité. Dans ce cas, la texture semble le facteur dominant sur ces variations.

Ces deux systèmes s'observent de nouveau, lorsque l'on étudie la relation entre la matière organique et l'humidité Fig.39. Pour certains échantillons très organiques, les teneurs en eau peuvent être supérieures à 100% aux pF < 1.5. La matière organique joue dans ce cas le rôle d'une éponge, les fibres des débris végétaux retiennent l'eau et gonflent.

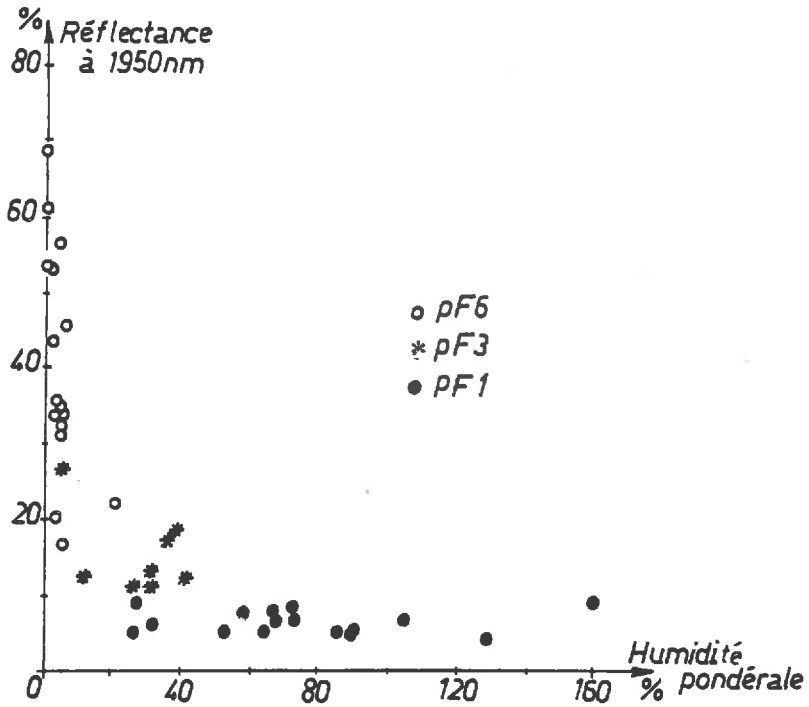


Fig.41. Relation entre l'humidité pondérale des échantillons à différents  $pI$  et la réflectance à 1950 nm.  
o pF6, \* pF3, ● pF1

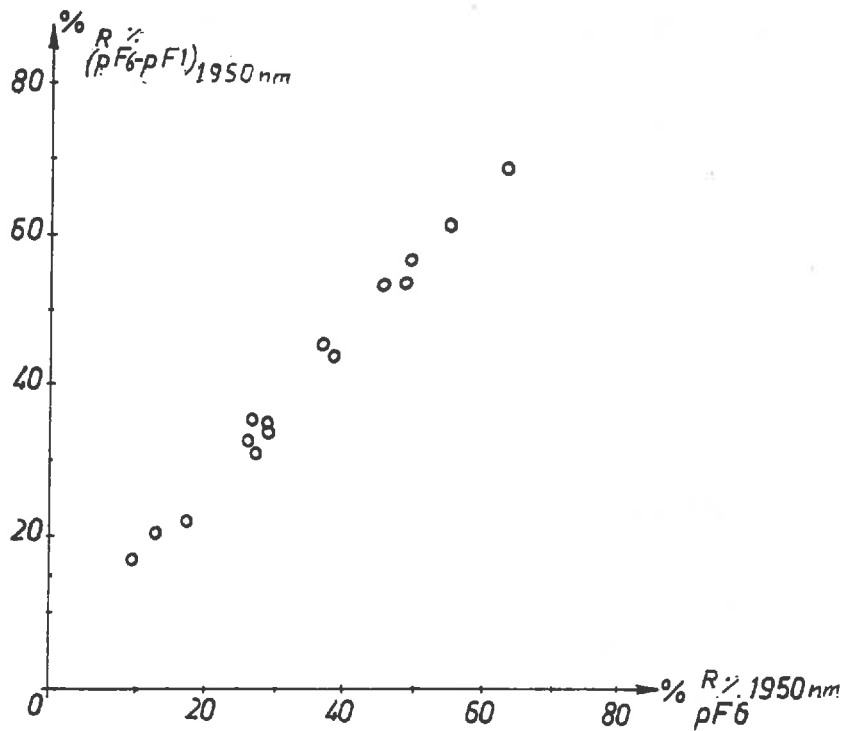


Fig.42. Relation entre la réflectance à 1950 nm des échantillons secs (pF6) et la différence des réflectances à 1950 nm entre les échantillons secs (pF6) et humides (pF1).



### 5. 2. Effet de l'humidité sur la réflectance

Bien que les bandes d'absorption de l'eau se situent dans le proche infra-rouge à 1450 et 1950 nm, on constate une diminution de la réflectance sur tout le spectre (de 380 à 2000nm), lorsque l'humidité augmente. (BOWERS et SMITH, 1965, LINDBERG et SNYDER, 1972, PROST et al, 1983). Cette diminution est d'autant plus importante que les longueurs d'onde augmentent. Les écarts de réflectances entre états secs et états humides dépendent des variations de texture et de constituants des échantillons. Fig.40.

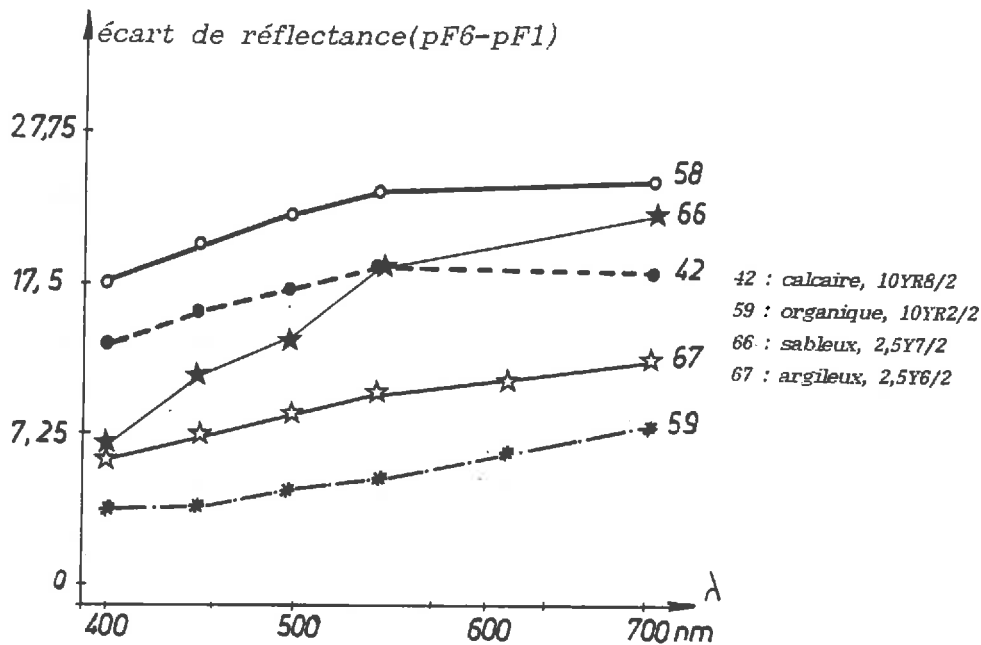


Fig.40. Variation des écarts de réflectances entre les états secs et humides de 400 à 700 nm de quelques échantillons de couleurs et de compositions diverses.

#### a). Relation entre l'humidité et les réflectance aux bandes d'absorption de l'eau (1950nm)

Ce sont les réflectances à 1950nm qui sont le plus corrélées à l'humidité (BOWERS et SMITH,1965).

La relation obtenue pour notre série d'échantillons est du type :

$$\text{Réflectance}_{1950 \text{ nm}} = a * e^{b * \text{Hé}} + c \quad r = 0.86$$

$$a = 52, b = -0.158, c = 8.6$$

Pour les pF < 1.5, les variations de réflectances (< 20%) sont faibles par rapport à celles de l'humidité, pour les pF élevés, c'est l'inverse, il y a de fortes variations de réflectances (20- 80%) pour de faibles variations d'humidité. Au dessus de 6.5%

d'humidité, la réflectance ne semble plus être influencée par l'humidité, ce sont les autres paramètres tels que les constituants, la couleur ...qui dominent. Fig.41.

\* On retrouve bien les mêmes relations que PLANET (1970) à savoir que les écarts de réflectance entre les états secs et humides, à 1950 nm varient linéairement en fonction des réflectances des états secs. Fig.42.

$$(R_{\text{sec}} - R_{\text{hum}})_{1950\text{nm}} = a \cdot R_{\text{sec}}_{1950\text{nm}} + b \quad r = 0.9$$

$$a = 1.01, b = -7.07$$

b). Effet de l'humidité dans le domaine du visible

En dehors du domaine des bandes d'absorption de l'eau, l'effet de l'humidité se note sur les courbes de réflectances par un abaissement des valeurs de réflectances sur tout le spectre sans modifier la forme de celles-ci. L'humidité modifie de façon importante la couleur du sol en abaissant les valeurs de clarté. (Fig.43.b). Le film d'eau qui entoure les particules entraîne une absorption d'une partie du rayonnement, des phénomènes de réfraction interviennent, par suite la réflexion du sol diminue.

Les types de relations mises en évidence entre les constituants ou la couleur avec les réflectances ne sont pas perturbées. Le modèle observé entre la matière organique et la réflectance à 650 nm reste le même (type exponentiel). Les paramètres sont légèrement modifiés, mais ils gardent toujours le même signe. Fig.43.a.

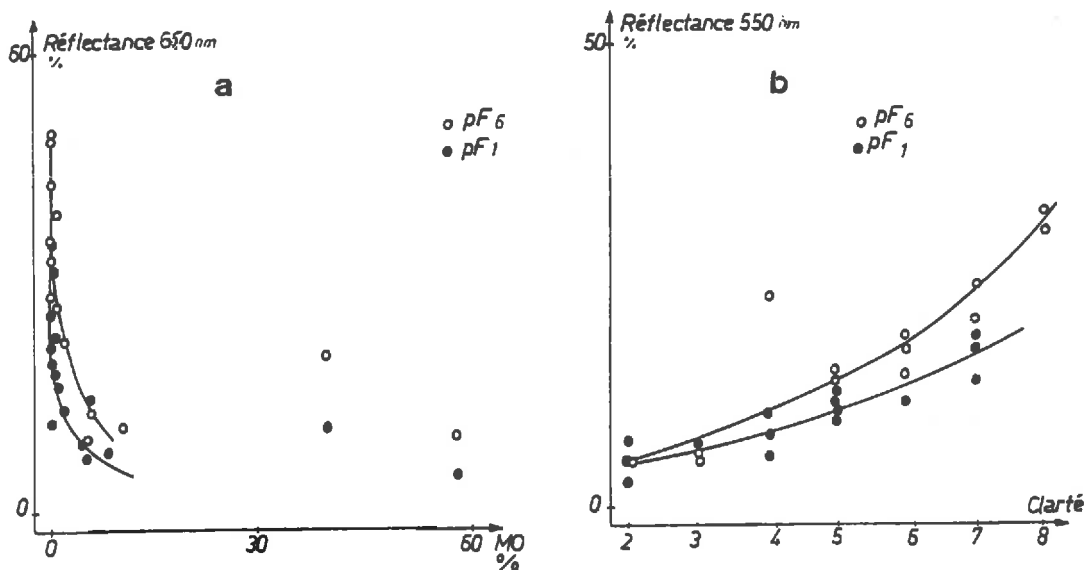


Fig.43. Effet de l'humidité sur les relations établies entre (a) la matière organique et la réflectance à 650 nm et (b) entre la clarté et la réflectance à 550 nm.

## Conclusion du chapitre 2

Dans le but d'isoler le facteur rugosité des autres facteurs du sol qui influencent la réflectance, nous nous sommes intéressés à préciser les différents rôles joués par les facteurs intrinsèques du sol.

Nous avons noté qu'une première approche concernant l'analyse de la forme des courbes spectrales nous apporte des informations qualitatives sur les principales caractéristiques des sols.

Des modèles exponentiels permettent de relier :

- la matière organique et la réflectance à 650 nm
- le fer et la réflectance à 900 ou 550 nm
- l'humidité et la réflectance à 1950 nm

et de fixer des limites (ou des valeurs seuils) où ces facteurs jouent un rôle moindre sur la réflectance. (matière organique < 1.5%, calcaire < 40%, fer total < 15%)

Ces relations sont déterminées à des longueurs d'ondes bien spécifiques.

En ce qui concerne le domaine du visible, l'importance de la couleur a été observé. Ses relations avec l'humidité et la composition du sol en font une variable prépondérante pour les sols.

Un modèle réversible montre qu'à partir de la réponse spectrale d'un sol quelconque, il est possible de retrouver sa couleur Munsell, et inversement à partir de la couleur d'un échantillon de sol, on peut reconstruire sa courbe de réflectance dans le visible.

Un tri des échantillons à partir de combinaisons de réflectance à différentes longueurs d'onde a été effectué à l'aide du modèle DIMITRI. Il classe les sols en fonction de leur distance par rapport à des références définies. Des informations sont obtenues simultanément sur les trois principaux constituants et leur domaine de variation.

Dans ce chapitre, des relations ont été établies à des longueurs d'onde précises. La transposition de ces relations ou modèles sur le terrain peut être faite à condition de bien préciser certains points, notamment en ce qui concerne la résolution spatiale et spectrale des instruments de mesures utilisés.

---

## **CHAPITRE 3**

**SUIVI DE LA DEGRADATION STRUCTURALE DE LA SURFACE DU  
SOL PAR LA REFLECTANCE**

---

## **Suivi de la dégradation structurale de la surface du sol, par la réflectance.**

(Etudes faites sur des sites expérimentaux)

### Rappel des objectifs

Il s'agit de suivre la dégradation structurale de la surface du sol par la réflectance et voir si le signal mesuré distingue les principales phases de dégradation décrites par BOIFFIN(1984).

Pour ceci, les mêmes phénomènes ont été observés sur différents sites sur lesquels on a fait varier les facteurs extrinsèques et intrinsèques. Une première partie concerne les mesures effectuées sur des parcelles expérimentales sous pluies contrôlées ou naturelles. La seconde concerne les mesures sur les parcelles agricoles où d'autres facteurs tels que la topographie ou les pratiques culturales interviennent.

La première partie présente l'expérience menée lorsque la situation est la plus simple (expérience d'Avignon). Elle va nous permettre d'établir une relation de référence entre la réflectance et la rugosité. Les modifications de cette relation sont ensuite étudiées lorsque les facteurs comme la couleur, la composition interviennent (Grignon, Versailles).

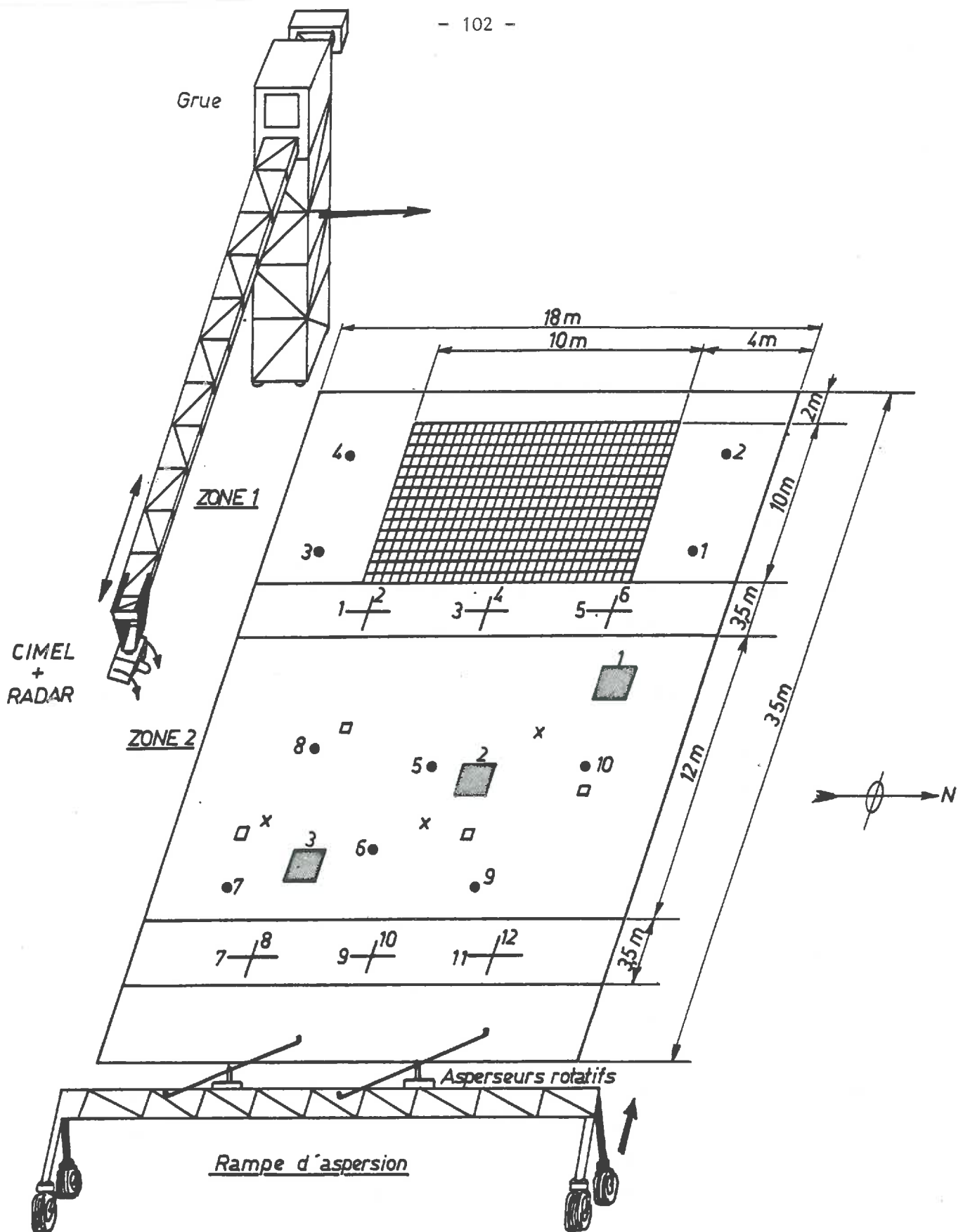
En ce qui concerne les expérimentations faites sur le terrain:

- il y a d'une part, les observations macroscopiques de surface selon le modèle de BOIFFIN.

- et d'autre part, les mesures de réflectance faites avec un radiomètre de type Cimel.

La seconde partie du chapitre 1 a montré que ces dernières étaient influencées par les facteurs intrinsèques et extrinsèques du sol. Les études faites au laboratoire sur des échantillons de sol ont permis de définir plus précisément le rôle des premiers facteurs sur la réflectance, notre étude porte à présent sur l'action des seconds facteurs sur la réponse spectrale. La résolution spectrale et spatiale a changé. Il s'agit ici de la réflectance bidirectionnelle dans les trois bandes spectrales: le vert, le rouge et le proche infra-rouge sur des surfaces de l'ordre de  $10\text{ cm}^2$  à  $1\text{ m}^2$ .

Sur un sol bien défini (composition connue, humidité contrôlée..), des mesures radiométriques ont été prises à différentes heures de la journée, pour différents angles de visée du radiomètre et sur divers stades structuraux (site d'Avignon).



- ▣ zone non piétinée réservée pour les mesures radiométriques prises à partir de la grue
- placette d'observation pour les notations Boiffin
- x pluviographes
- emplacement des prélèvements pour l'humidité
- emplacement de mesure pour la densité apparente
- + emplacement des profils de rugosité

Fig.44. Dispositif expérimental de la parcelle d'Avignon.

Ces expériences impliquent la mise en place de dispositifs particuliers qui seront décrits dans cette première partie. Une recherche pour quantifier les variations de rugosité et leur associer des indices pertinents est également présentée.

## I. Suivi de la dégradation structurale de la surface du sol sous pluies simulées. Variation des facteurs extrinsèques. (expérience d'Avignon)

### A. Description du dispositif expérimental

Ce travail s'est effectué en collaboration avec P.BERTUZZI (INRA, Sciences du sol, Avignon).

Nous avons choisi de travailler sur une parcelle expérimentale sur laquelle tous les paramètres du sol sont contrôlés : l'humidité par la rampe d'irrigation, la rugosité avec le rugosimètre laser ...).

A partir d'un stade initial choisi peu rugueux semblable à un semis, on soumet la parcelle à des pluies simulées jusqu'à obtention d'une croûte de battance. Après chaque passage de l'asperseur, des mesures spectrales (et des mesures des paramètres du sol à l'état sec et à l'état humide) sont prises systématiquement aux différentes heures de la journée et avec différents angles de visée du radiomètre.

#### 1. Caractérisation de la parcelle et préparation.

La parcelle expérimentale se trouve sur le domaine de l'INRA de Montfavet. Ses dimensions sont de 18m sur 43m (0.1 ha). Elle est orientée suivant la direction Est-Ouest. Elle est limitée à l'Ouest par des rails sur béton qui permettent à la grue (support des instruments de mesures) de se déplacer. Fig.44.

La parcelle a une texture limono-argileuse, elle est peu organique et sa structure est grumeleuse en surface. Il s'agit d'un sol peu évolué d'apport alluvial (CPCS). Tab.16.

*Tab.16. Principales caractéristiques de l'horizon de surface de la parcelle d'Avignon.*

profondeur	% argile	% limon	% sable	% matière organique	structure
0-17cm	27	61	11	1.7	grumeleuse

La variation spatiale à l'échelle de la parcelle en ce qui concerne la texture de surface est faible (coefficient de variation < 8%, WITONO, 1988), la parcelle peut donc être considérée comme homogène d'un point de vue granulométrique.

#### \* Préparation du stade F0

Le stade initial a été choisi proche d'un semis sans effet directionnel marqué, c'est à dire sans rangées de semis ou traces de roues distinctes. Plusieurs passages d'outils différents ont été nécessaires: un labour (<30cm), puis le passage d'une herse avec un rouleau. Le passage d'un rotavator a permis de réduire la taille des mottes. Enfin pour effacer les traces des divers engins et aplanir la surface, une herse suivie du rouleau a été repassé sur la parcelle. L'ensemble paraît homogène en surface sans traces apparentes. La classe modale des mottes est de 2 à 4 cm.

Il y a sans doute un certain tassement en profondeur aux endroits de passage des engins agricoles qui se répercutera plus tard sur l'infiltration de l'eau dans le sol, mais il semble difficile d'éviter ce phénomène. Dans un premier temps, c'est l'homogénéité de l'état de surface qui a été privilégiée.

#### \* Mise en place des points de mesures de contrôle terrain

La parcelle a été divisée en deux parties.

- la première, côté Ouest (zone 1), près des rails est réservée pour les mesures spectrales prises par le radiomètre installé sur la flèche de la grue. Cette partie est préservée des piétinements dans sa partie centrale (10/10m).

- la seconde partie (zone 2) est réservée pour les mesures de contrôle terrain : humidité, rugosité, densité apparente, couleur Munsell, paramètres de BOIFFIN..., pluviomètres

- 6 points pour les prélèvements d'humidité ont été répartis aléatoirement sur cette seconde partie et 4 autres sur les bordures de la zone 1 (bordures qui n'interviennent pas pour les mesures de la réflectance).

Les prélèvements se font simultanément avec les mesures radiométriques. Les prélèvements s'effectuent entre 0 et 1cm pour les états humides (juste après aspersion) et tous les centimètres jusqu'à 5 cm de profondeur pour les états secs (3 jours après l'aspersion).

Certains points peuvent se situer dans des dépressions plus humides, d'autres sur des emplacements de traces de roues, ou bien encore sur des zones surélevées plus sèches. La moyenne est faite à partir des 10 prélèvements (de 0 à 1 cm) pour chaque date de mesures.

- 4 points pour mesurer la densité apparente sont répartis aléatoirement sur la parcelle dans la zone 2.



- 12 profils de rugosité de 2m de long, sont placés sur la zone 2, dont 6 au centre de la parcelle à la limite des deux zones et 6 autres à l'extrémité Est. Les profils sont couplés par deux dans des directions perpendiculaires.

- 3 placettes de 50/50cm sont disposées pour le suivi des observations de surface (selon le modèle de BOIFFIN). Elles sont placées dans la zone intermédiaire délimitée par les profils de rugosité, et espacées de façon à prendre en compte l'hétérogénéité éventuelle de l'aspersion.

## 2. Les appareils et techniques utilisées

### 2.1. La rampe d'irrigation

Pour contrôler l'humidité le mieux possible, l'expérience s'est déroulée pendant l'été à cause des faibles risques de pluies et de l'évaporation importante. Les mesures ont commencé le 20 Juillet 1988 et se sont terminées le 16 Août 1988. Il n'y a eu qu'un orage le 2 Août qui a apporté moins de 2mm d'eau.

Afin de contrôler les apports d'eau, une rampe d'irrigation a été utilisée. Les différents stades de dégradation de la surface sont ainsi créés "articiellement". Les caractéristiques de la rampe sont les suivantes :

Elle couvre la largeur de la parcelle (20m de long sur 1,6m de haut). Elle se compose d'asperseurs paraboliques sur toute sa longueur qui délivrent de fines gouttelettes et de deux asperseurs rotatifs libérant des grosses gouttes. La vitesse d'avancement peut être réglée et par suite l'énergie cinétique des gouttes d'eau peut varier. Un passage à vitesse moyenne correspond à une pluie d'intensité 20 à 30mm/h.

Des pluviomètres (3) sont placés sur la parcelle, ils sont dispersés sur toute la largeur de la parcelle afin de mesurer l'hétérogénéité de l'aspersion.

Au cours de cette expérience, il y a eu 11 passages de la rampe d'irrigation, répartis en 5 étapes(intensité > 30mm/h).Tab.17.

*Tab.17. Les différents apports d'eau et les stades structuraux correspondants.*

dates	20/07	22/07	26/07	02/08	10/08
apport d'eau (mm)	0	30	34	32	37
nb de passage	0	3	3	2	3
stade structural	F0	F1	F1+	F2	F2+

## 2.2. Le rugosimètre laser

Afin de mesurer précisément les variations du microrelief de la surface, nous avons utilisé le rugosimètre laser mis au point par BERTUZZI et CAUSSIGNAC (1987). Cet appareil est constitué d'une poutre métallique de 2m de long sur laquelle se déplace un dispositif optique à rayon laser. Celui-ci est situé à 25cm du sol et projette un spot lumineux à la surface du sol. Les variations de réflexion de ce spot donnent des informations sur les variations du microrelief. Celles-ci sont directement enregistrées sur un micro-ordinateur de type Hunter. Ces données sont ensuite transférées sur des micro-ordinateurs plus importants pour subir divers traitements statistiques.

Les avantages de cet appareil sont nombreux :

- les mesures ne perturbent pas la surface, donc on peut suivre un même profil au cours du temps.

- la résolution est fine (<2mm)

- les données sont lues directement et transférées automatiquement sur micro-ordinateur, le traitement est donc rapide

Il y a quelques contraintes d'utilisation cependant :

- l'appareil est lourd à déplacer et nécessite au moins deux personnes

- les repères pour chaque profil doivent être notés très exactement et la mise en place prend un certain temps

- le spot lumineux doit être à l'ombre pendant l'acquisition des mesures

- il faut noter les fissures ou cailloux rencontrés sur le profil, car ceux-ci entraînent des variations brusques des hauteurs mesurées. Il est important de les connaître lors des traitements statistiques pour interpréter l'évolution des profils.

Au cours de cette étude, nous avons effectué 57 profils de rugosité (12 profils pour chacun des principaux stades de dégradation. Il faut environ une journée pour l'acquisition des 12 transects, chaque transect ou profil comprend 950 points.)

Les traitements que nous avons effectués sur ces données sont présentés dans la deuxième partie de ce chapitre.

On peut reprocher à ce système d'évaluer la rugosité dans un espace à deux dimensions. A moins de faire des approximations et d'utiliser des modèles permettant le passage de 2 dimensions à 3 dimensions, on n'obtient pas la représentativité spatiale de la rugosité de surface.

L'analyse de photographies de surface est proposée ici pour compléter ces données.

### 2.3. Les photographies des états de surface, numérisation et traitement d'images.

A chaque stade de dégradation, des photographies en noir et blanc ont été prises verticalement à 1m de la surface au dessus des placettes ombrées. Ces photographies ont été numérisées avec un système de caméra video à haute résolution qui balaie le négatif de la photo puis transfère l'image sur traitement d'image, le péricolor\*. (bioclimatologie, INRA, Grignon). L'image est codée en niveaux numériques variant de 1 à 256. La résolution de l'image est variable suivant la distance focale de l'objectif. Dans notre cas, un pixel représente 1.3mm.

Les contrastes entre les différents niveaux de gris observés sur l'image nous indiquent des variations relatives entre les divers éléments de la surface. Des traitements spécifiques à l'analyse d'image : histogramme, transect, morphologie mathématique nous livrent des paramètres pouvant caractériser d'une certaine façon la rugosité de surface. Cette partie sera traitée plus particulièrement dans le chapitre 4 concernant l'analyse spatiale et les traitements d'images.

## 3. Les Mesures spectrales

### 3.1. Le radiomètre Cimel

Pour cette étude, nous avons disposé de 2 radiomètres de type Cimel, l'un placé sur la grue à 19,7m du sol, l'autre que nous tenions à la main à 1m de la surface du sol.

Il s'agit d'un appareil conçu par GUYOT et al (1984) qui mesure la réflectance du sol dans les mêmes bandes spectrales que le satellite Spot1:

le vert (500-590nm)

le rouge (600-690nm)

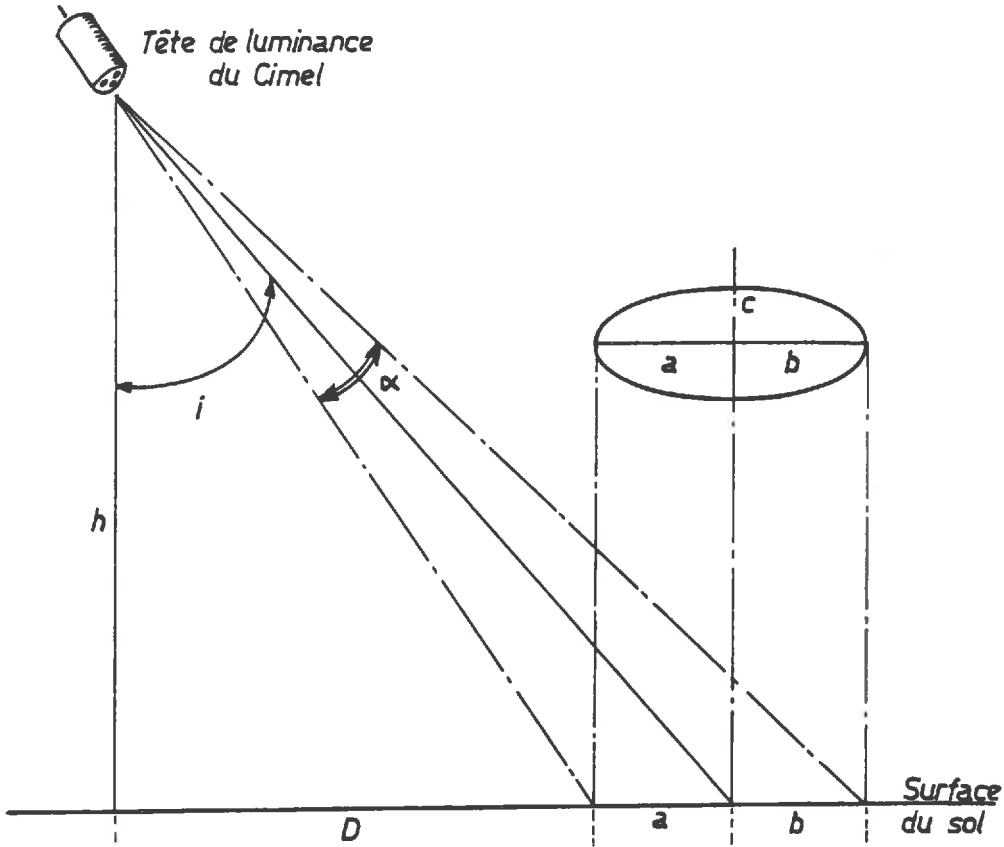
le proche infra-rouge(790-900nm)

Il nous donne ici la valeur moyenne de la réflectance sur les intervalles considérés

Il est composé de 3 parties:

- la tête d'éclairement visant le ciel qui capte l'énergie incidente. (sur la grue, elle est placée au plus haut point, sous une cloche de verre).

- la tête de luminance, qui mesure l'énergie réfléchiée par le sol. (sur la grue, cette partie est accrochée sur une platine pivotante sur la flèche). Cette platine peut se déplacer sur une longueur de 20 m et osciller de 0 à 50°. (Pour les mesures au sol, les deux têtes sont reliées entre elles et tenues verticalement à 1m de la surface)



$h$ : hauteur de la tête de luminance,  
 $h = 1\text{ m}$  pour les mesures au sol  
 $h = 19\text{ m}$  pour les mesures de la grue  
 $\alpha$ : angle d'ouverture du radiomètre,  $\alpha = 12^\circ$   
 $i$ : angle de visée de la tête de luminance,  $i$  varie de  $0^\circ$  à  $50^\circ$ .

Fig.45. Evaluation des surfaces intervenant dans la mesure de réflectance suivant les variations d'angles de visée.

$$\begin{aligned}
 a &= h * (tgi - tg(i - \alpha/2)) \\
 b &= h * (tg(i + \alpha/2) - tgi) \\
 c &= h * tg(\alpha/2)/cosi \\
 D &= h * tg(i - \alpha/2)
 \end{aligned}$$

$i$	$a$	$b$	$a + b$	$c$	$D$
$0^\circ$	1,86	1,86	3,73	1,86	0
$15^\circ$	2,1	2,28	4,38	1,91	5,28
$23^\circ$	2,3	2,5	4,8	2	8,3
$40^\circ$	2,56	3,15	5,71	2,3	11,66
$50^\circ$	4,46	5,7	10,19	2,6	23,5

- le boîtier (ou la centrale d'acquisition) qui récupère les données des deux capteurs sous forme de tensions et les transforme soit directement en réflectance (cas du cimel au sol) soit les livre telles quelles (cas du cimel grue). Dans ce dernier cas un étalonnage est nécessaire pour calculer les valeurs de réflectance qui sont données par la formule:

$$R = \frac{k_i a_i (L_i - L_o)}{a_e (E_i - E_o)}$$

$k_i$  = constante d'étalonnage (facteur multiplicatif constant pour un canal donné)

$a_i, a_e$ : gains de l'amplificateur

$L_i, E_i$ : tensions de sorties

$L_o, E_o$ : tensions d'obscurité

\* Pour connaître la constante  $k$ , les réflectances sont mesurées sur des cibles de papier Canson de différentes couleurs (blanches, noires, grises, beiges). Un échantillon de chaque feuille est ensuite passé au spectrophotomètre DK2 de Beckmann pour connaître sa réflectance. Les tensions d'obscurité sont mesurées pour chacune des têtes en les masquant dans le noir. La valeur de  $k$  est calculée pour chacun des canaux:

$k = 0.81$  pour le canal 1

0.8 pour le canal 2

0.85 pour le canal 3

\* résolution au sol

L'angle d'ouverture de la tête de luminance est de  $12^\circ$ , la surface mesurée au sol varie donc en fonction de la hauteur du détecteur et de l'angle de visée. Fig.45.

\*\* Choix des angles de visée et des angles d'illumination pour l'expérience:

Pour toutes les mesures radiométriques, on a fait varier l'angle d'illumination, en prenant des mesures à différentes heures de la journée: 8h- 14h -18h. (programme, INRA Bioclimatologie, L.PREVOT). Tab.18.

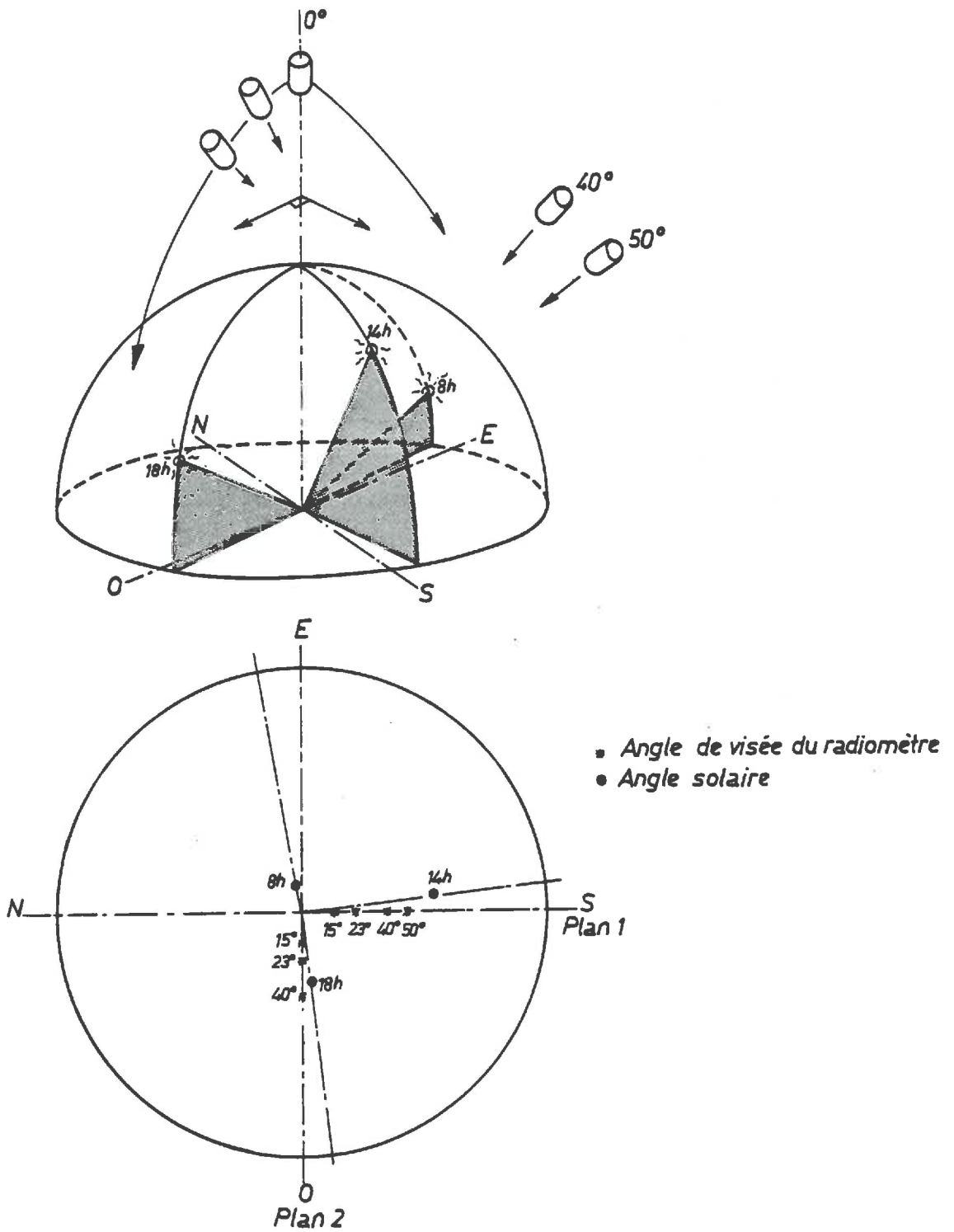


Fig.46. Positions relatives du soleil et du radiomètre pour les différentes mesures effectuées.

Tab..18. Variation des angles et azimuths solaires du 20/07/1988 au 16/08/1988.

Heure de mesure	angle	azimuth
8h	12-16	97-104
14h	60-67	7-8
18h	28-33	82-87

Des mesures ont été prises pour chacun des états de surface rencontrés: F0, F1, F1+, F2,F2+, à l'état humide(juste après aspersion) et à l'état "sec", c'est à dire ressuyé (3 jours après l'aspersion).

### 3.2. Les mesures au sol

30 mesures de réflectance sont prises au sol, systématiquement à chaque stade. Les deux têtes d'éclairement et de luminance sont placées à l'extrémité d'une tige métallique de 2m de long. Celle-ci est tenue horizontalement à 1m de la surface du sol. On se déplace sur les bordures de la zone 1 en visant le centre de la parcelle non piétiné.

3 mesures sur chacune des placettes sont relevées également afin de tester la représentativité de celles-ci vis à vis de la parcelle.

### 3.3. Les mesures faites à partie de la grue

En plus des variations des angles d'illumination, les angles et azimuts de visée du capteur varient. La tête de luminance se déplace dans un quart de plan (1) orienté Nord - Sud de 0 à 50° et dans le quart de plan qui lui est perpendiculaire (2) Est-Ouest de 0° à 40°. Suivant la position du soleil, les mesures faites dans le plan1 sont perpendiculaires au plan solaire à 8h et 18h et celles effectuées dans le plan 2 sont parallèles au plan solaire à ces mêmes heures. A 14h, la situation s'inverse. Les variations d'ombre seront donc mieux perçues dans ce dernier plan, lorsque les angles solaires sont les plus bas.Fig.46.

Les angles retenus sont :

dans le plan 1: 0°,15°,23°,40°,50°

dans le plan 2: 15°,23°,40°

Pour des raisons pratiques, on a choisi les mêmes angles que pour les mesures radar qui se faisaient en même temps sur la parcelle avec d'autres équipes.

L'acquisition simultanée des mesures radar- Cimel prend en effet beaucoup moins de temps, le réglage du dispositif et la transmission des données étant plus rapides.

La position de la parcelle à l'extrémité des rails, sa dimension et la résolution du radiomètre sont les principales causes de limite des mesures entre 0° et 50°.



**B. RESULTATS : Quantification des phases de BOIFFIN,  
Elaboration d'un modèle de référence**

**1. Caractérisation des différents états de surface par des méthodes classiques**

**1.1. Les phases de BOIFFIN**

5 états de surface différents se sont succédés du 20/07 au 16/08/1988.

On les distingue suivant la terminologie de BOIFFIN avec des signes indiquant que le stade de dégradation est plus ou moins avancé. Tab.19.

*Tab. 19. Principales caractéristiques des états de surface rencontrés.*

	Dmin	Ntf	remarques
F0	0,1	0	labour
F1	2	1-2	apparition de croûtes structurales
F1+	5	2-3	extension des croûtes structurales
F2	15	4-5	flaquage
F2+	/	6	croûtes sédimentaires

*Dmin: claire du plus petit élément discernable à l'oeil nu*

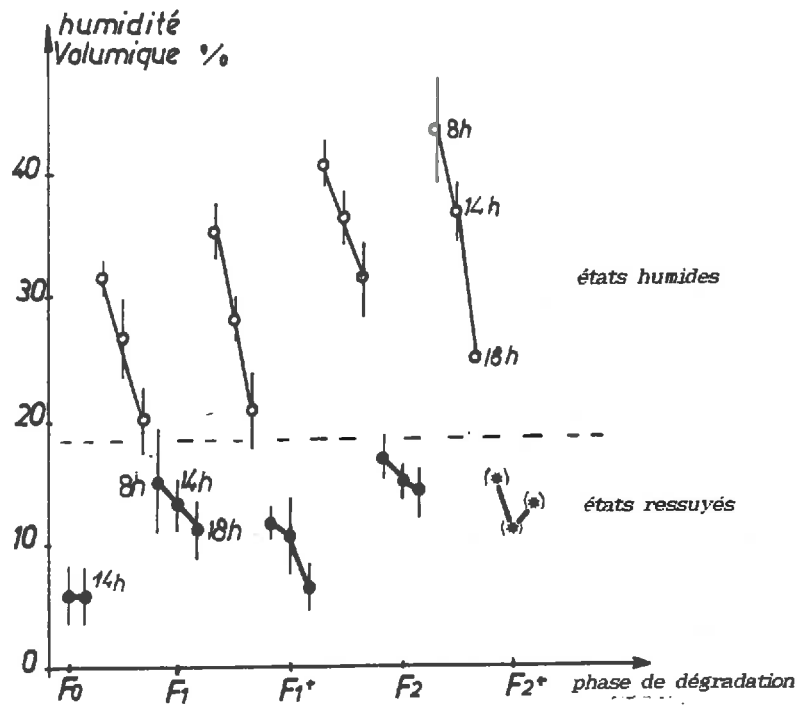
*Ntf: note de désagrégation de la terre fine .*

Les apports d'eau se sont effectués approximativement de la même façon pour ces différentes phases (environ 30mm d'eau pour chaque phase, avec une intensité de 25mm/h, 133mm d'eau au total).

**1.2. Les mesures d'humidité de surface**

En ce qui concerne les variations d'humidité volumique des divers états de surface au cours du temps, les coefficients de variation sont importants: de 5 à 30%(annexe.3.). Ces variations s'expliquent par le fait que l'on effectue une moyenne à partir de 10 prélèvements sur l'ensemble de la parcelle. Certains points peuvent se trouver dans des microdépressions plus humides, d'autres par contre peuvent être sur des zones planes plus sèches. Les écarts d'humidité sont généralement plus importants pour les états ressuyés que pour les états humides (ces derniers ne présentent pas d'eau libre en surface). Fig.47.

Bien que la parcelle soit considérée comme homogène en surface d'un point de vue textural, et point de vue travail du sol initial, on observe un ressuyage plus rapide au centre de la parcelle que sur les bordures.



(chaque point représente la moyenne de 10 mesures effectuées entre 0 et 1cm)  
(\* ) valeurs extrapolées par le modèle, fig.54.

Fig.47. Variation des valeurs d'humidité volumique du 20/07/88 au 16/08/88, pour les phases de dégradation F0 à F2\*, à différentes heures de la journée.

On peut noter que l'évaporation est importante, les différences d'humidité entre 8h et 18h pour les états humides sont supérieures à 20% alors que pour les états ressuyés, les écarts sont inférieurs à 10%.(Fig.47). Sur cette figure, on note également que l'on peut placer une limite à 20% d'humidité entre les états ressuyés et les états humides. (cette limite n'est valable que pour ce type de sol).

### 1.3. Les indices de rugosité

Différents indices de rugosité ont été calculés à partir des données obtenues avec le rugosimètre laser (BERTUZZI et al, 1989).

Des moyennes ont été calculées pour chacun des états de surface rencontrés :

- séparément pour les profils orientés N-S (1) et les profils orientés E-O (2)
- et globalement en groupant tous les profils indépendamment de leur orientation.(1+2)

Tab.20.

Discussion:

On note peu de différences suivant l'orientation des profils pour les indices D, LD et IR.

Par contre pour les indices HRMS et R3, les différences d'orientation des profils pour un même état de rugosité peuvent être supérieures aux différences de rugosité pour un même profil, passant de F0 à F2+.

Les indices qui marquent le plus de variations entre les différents stades sont D et LD. Ils ont en plus l'avantage de ne pas dépendre du pas d'échantillonnage des mesures. (cf chap1).

Les coefficients de variation sont élevés pour tous les indices et pour tous les états de surface (>15%) sauf pour l'indice IR (<10%).

\* Une recherche a été faite sur le *calcul d'un coefficient d'ombrage* obtenu à partir des transects du rugosimètre. Selon les positions relatives du soleil et du capteur, le pourcentage de surface à l'ombre varie.Fig.48. L'ombre intervient sur la couleur en assombrissant la surface mesurée par le radiomètre et par suite modifie la réponse spectrale du sol en abaissant la réflectance. Il semble donc intéressant de prendre en compte ce critère d'ombrage en essayant de le quantifier.(Programme P.ROBIN, P.BERTUZZI, D.COURLAULT).Tab.21.

Tab.20. Variation des différents indices de rugosité calculés à partir des profils obtenus avec le rugosimètre laser.

phase	HRM cv	IR1 cv	R3 cv	LS cv	LD cv	D cv
F0	1 12,4 15	1,85 7	1,5 43	14,6 13	1,6 15	-0,2 12
	2 10,1 19	1,85 9	1 25	12,3 21	1,69 15	-0,19 13
	1+2 11,3 19	1,85 8	1,25 43	13,3 19	1,65 14	-0,19 12
F1	1 11,1 18	1,59 6	1,19 37	12,6 18	1,65 14	-0,15 12
	2 9,3 20	1,6 10	0,98 30	11,5 19	1,19 23	-0,15 22
	1+2 10,2 21	1,59 8	1,08 35	12,1 19	1,2 19	-0,15 17
F1+	1 10,3 25	1,37 10	0,98 42	12,3 27	1,23 27	-0,1 30
	2 7,9 19	1,39 10	0,79 29	10 17	0,82 31	-0,1 30
	1+2 9,1 26	1,38 10	0,89 38	11,2 25	0,88 29	-0,1 30
F2	1 9,3 25	1,2 6	0,82 36	11,5 32	0,85 24	-0,06 29
	2 7,3 19	1,2 7	0,67 30	10,6 19	0,51 30	-0,06 36
	1+2 8,3 26	1,17 6	0,75 35	11 27	0,52 27	-0,06 32
F2+	1 9,5 27	1,17 5	1,02 34	10,9 37	0,46 20	-0,05 20
	2 6,7 20	1,18 3	0,8 43	8,6 20	0,48 17	-0,05 21
	1+2 8,1 30	1,18 4	0,9 39	9,8 33	0,47 18	-0,05 20
x	9,31	1,44	0,17	11,45	0,94	-0,11
dx	28	0,67	0,48	3,7	1,14	-0,15
dx/x	0,08	0,59	0,49	0,3	1,2	1,36

(se reporter au chapitre 1, p pour la signification des indices).

1 : moyenne calculée à partir de 6 profils orientés dans le plan Nord-Sud.

2 : moyenne calculée à partir de 6 profils orientés dans le plan Est-Ouest

1+2 : moyenne calculée à partir des 12 profils indifférenciés.

cv : coefficient de variation

x : moyenne d' un indice de rugosité de F0 à F2+

dx : écart maximal entre les valeurs de rugosité pour un indice donné

Tab.21. Variation du coefficient d'ombrage suivant les heures de mesures et les angles de visée du radiomètre.

		8h		14h		18h	
		Co90°	Co50°	Co90°	Co50°	Co90°	Co50°
F0	x	0,73	0,71	0,2	0	0,54	0,3
	ec	0,01	0,02	0,02	0	0,03	0,01
	cv	1	3	12		6	4
F1	x	0,71	0,71	0,14		0,4	0,29
	ec	0,02	0,02	0,03		0,02	0,021
	cv	3	14	21		5	10
F1+	x	0,63	0,65	0,08		0,3	0,2
	ec	0,03	0,03	0,04		0,02	0,01
	cv	5	4	50		6,6	5
F2	x	0,52	0,52	0,036		0,2	0,13
	ec	0,08	0,07	0,02		0,06	0,03
	cv	15	13	55		32	23
F2+	x	0,51	0,52	0,024		0,19	0,14
	ec	0,06	0,07	0,09		0,05	0,04
	cv	12	13	12		30	33

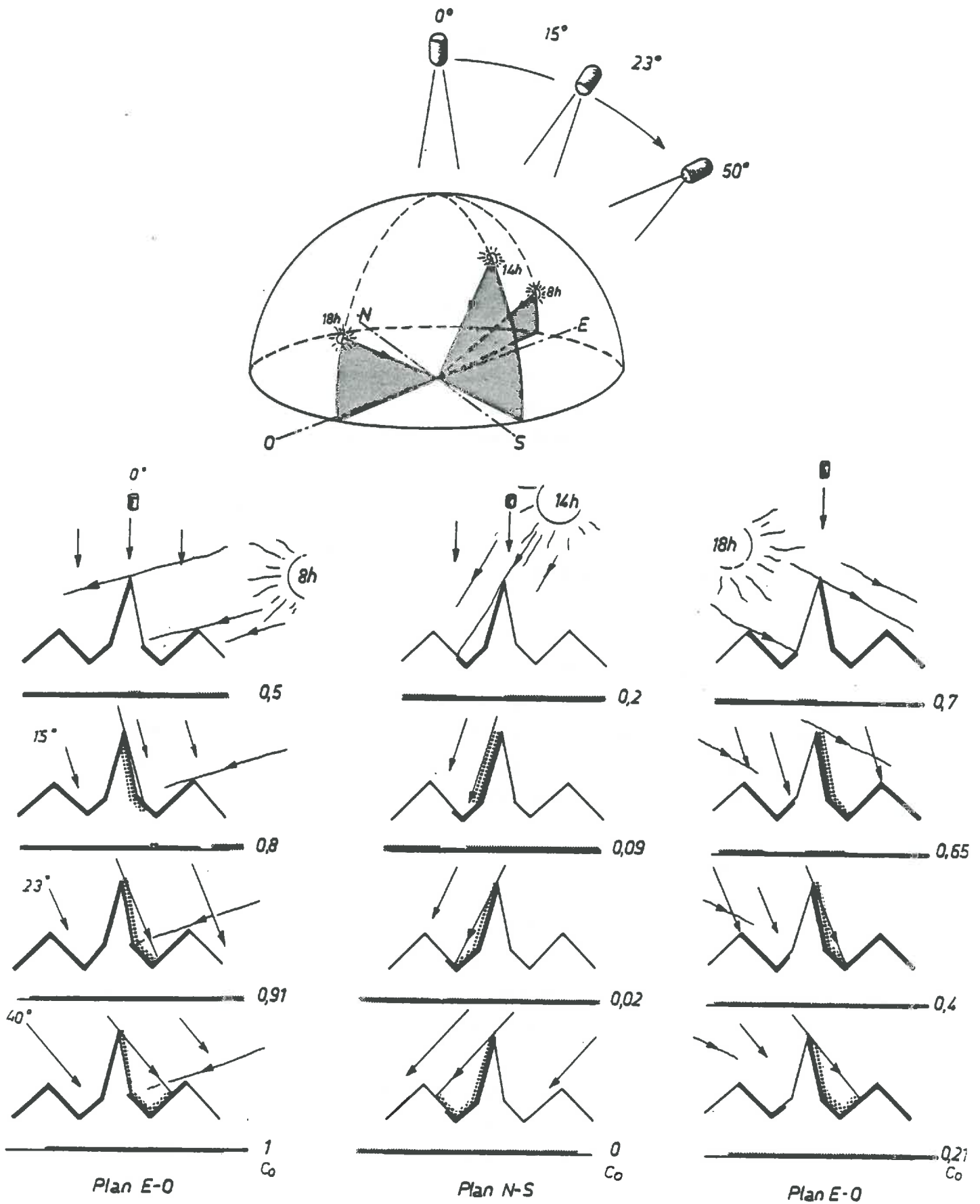
Co<sup>i</sup> : coefficient d'ombrage pour un angle de visée de i°

(Co =  $lnc/(l_0 - l_0c)$  cf fig.48.

x : moyenne calculée sur 6 profils de rugosité orientés dans le plan perpendiculaire au plan solaire.

ec : écart-type

cv : coefficient de variation



- longueur éclairée vue par le capteur,  $L_{ec}$
- longueur cachée au capteur,  $L_{cc}$
- longueur à l'ombre vue par le capteur,  $L_{oc}$

Fig.48. Différentes situations d'éclairément et d'observation d'un profil théorique.

Le coefficient retenu est le suivant :  $C_o = \frac{\text{Longueur à l'ombre vue par le capteur}}{\text{Longueur totale} - \text{longueur cachée au capteur}}$   
(ligne brisée li cf chapitre 1 p26)

### Discussion:

Plusieurs remarques sont à noter:

- quels que soient l'angle de visée et l'heure de la mesure, le coefficient  $C_o$  diminue avec la diminution de la rugosité.

-  $C_o$  est toujours plus élevé à 8h puis 18h et enfin 14h, c'est à dire suivant l'angle solaire le plus bas, et ceci quel que soit l'angle de visée ou le stade de dégradation

- lorsque l'angle de visée du radiomètre augmente,  $C_o$  augmente à 8h car le radiomètre se situe dans le plan opposé au rayonnement incident, par contre  $C_o$  diminue à 18h et 14h (ces dernières mesures se faisant dans le plan de rétrodiffusion solaire).

Par ailleurs, les coefficients de variations sont peu élevés.

\* Une des principales critiques qui ressort de ces caractérisations des états de surface, c'est qu'elles ne prennent en compte que des variations enregistrées dans un espace à deux dimensions dans un plan vertical, suivant une direction bien précise. La représentation spatiale n'est pas envisagée.

C'est un problème d'autant plus important que la radiométrie nous donne des mesures obtenues à partir d'une surface située sur un plan horizontal. Pour obtenir des corrélations de la réflectance avec des caractéristiques de surface, il est préférable que celles-ci soient représentatives du même espace.

### \* Intégration de la surface

A partir des images numérisées, on peut travailler sur une surface. Des histogrammes des valeurs de densité de l'image entière et les paramètres statistiques associés à ces distributions (moyenne, mode, écart-type..) peuvent caractériser d'une façon quantitative les différents états de surface rencontrés. Fig.49.

Les états les plus dégradés apparaissent généralement plus clairs, les valeurs de densité sont fortes et peu dispersées comparées aux valeurs des états F0 où les coefficients de variations sont plus élevés.

Des transects horizontaux ou verticaux sont effectués sur l'image. Ils traduisent les variations de niveaux de gris ou de densité suivant une ligne bien précise.

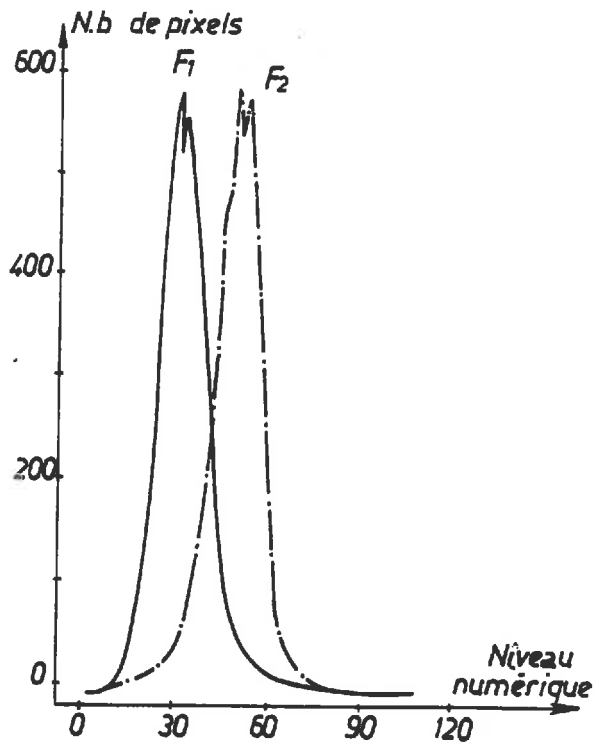


Fig.49. Histogrammes des niveaux numériques des photographies des états de surface numérisées sur péricolor.

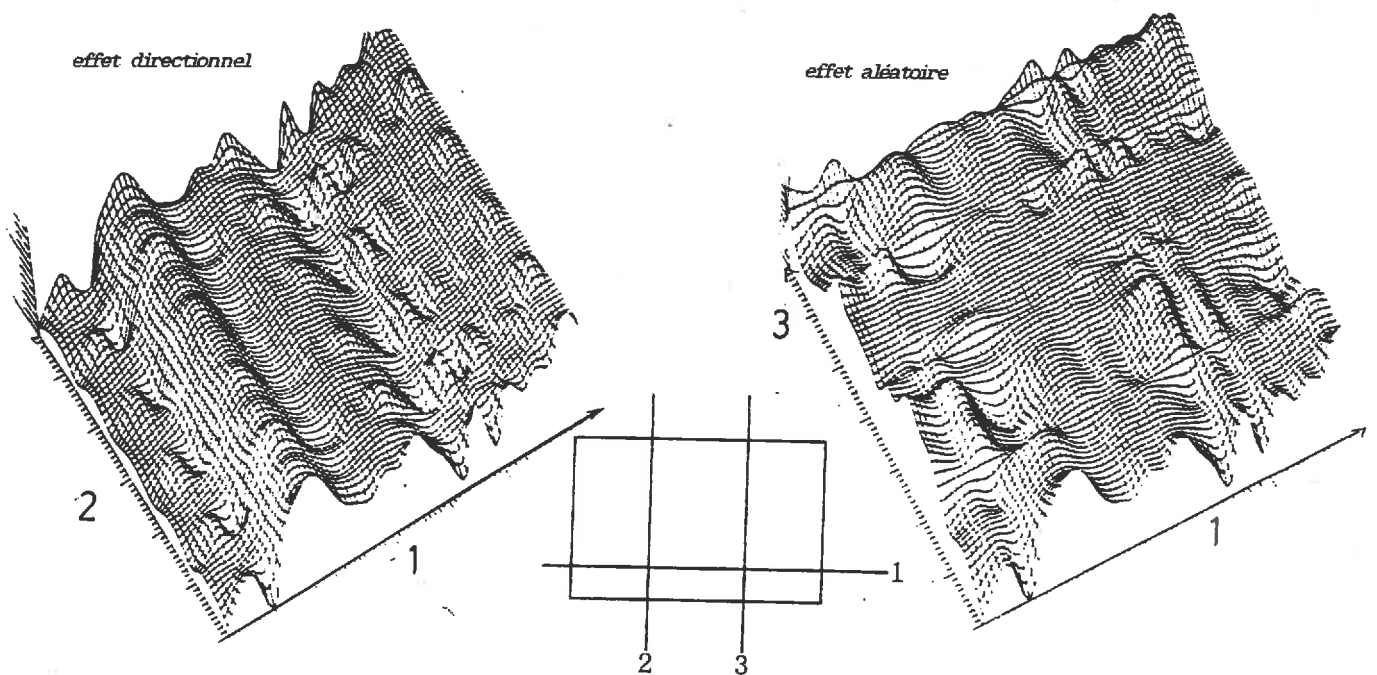


Fig.50. Différents essais de modélisation en trois dimensions de la surface à partir des profils relevés avec le rugosimètre dans deux directions perpendiculaires.

De la même façon que les traitements précédents on calcule des indices caractérisant ces transects, en particulier l'indice de tortuosité IR. Tab.22.

Tab.22. Variation de l'indice de rugosité de F0 à F2+, calculé à partir de transects effectués sur les photos numérisées des états de surface.

stade	F0	F1	F1+	F2	F2+
IR1	5,1	5	4,2	3,8	3,6

DISCUSSION:

On observe une décroissance de cet indice avec la diminution de la rugosité. Cependant, cet indice n'a pas la même signification que celui calculé à partir des hauteurs relevées sur les transects de terrain, il évalue ici non pas les variations de hauteurs mais des différences de contrastes ou de densité. Suivant l'éclairement incident, certains contrastes entre les agrégats sont plus moins marqués. Les variations sont significatives surtout des surfaces et non des hauteurs, en effet des grosses mottes peuvent présenter de fortes densités de même intensité que des mottes peu élevées présentant de grandes surfaces planes.

\* Modèle 3d

Les profils de rugosité obtenus sur le terrain étant couplés pour chaque mesure dans deux plans perpendiculaires, si l'on émet des hypothèses quant à l'homogénéité de la surface à l'état initial (c'est à dire pas de direction préférentielle), on peut extrapoler des modèles à trois dimensions exprimant le microrelief de la surface considérée. A partir de ces blocs diagrammes, on peut calculer les surfaces à l'ombre..mais les calculs deviennent complexes et longs. Les hypothèses de départ sont aussi insatisfaisantes pour les sols (Fig.50.), aussi n'avons nous pas poussé cette analyse plus loin.

Conclusion

Différentes recherches ont été effectuées pour quantifier les modifications des états de surface au cours de leur dégradation par la pluie, à partir des transects de rugosité obtenus sur le terrain ou bien à partir de photographies de surface numérisées. Des indices classiques ont été calculés caractérisant la rugosité suivant une dimension bien précise.



Ces caractérisations seront complétées par des analyses de formes des images qui seront développées dans le chapitre 4.

## **2. Caractérisation des états de surface par la radiométrie**

### **2.1. Vérifications préliminaires**

#### **a. Homogénéité des mesures radiométriques**

Le 1er point à vérifier concerne la distribution des mesures de réflectances aux différents stades de dégradation et les coefficients de variation de ces mesures.

30 mesures sont prises systématiquement à chaque état sec et humide à 1m et 19m de hauteur de la surface.

L'hétérogénéité est beaucoup plus importante pour les mesures à 1m du sol. (les coefficients de variations sont élevés 5- 30%) par rapport à ceux de la grue (< 5%). annexe.3. Ces variations peuvent être dues au problème des mesures prises "à la main" et des conditions d'environnement . Par ailleurs, la surface considérée n'est pas la même:

- pour la grue: 3,75/3,75m, le radiomètre a une vue d'ensemble plus homogène
- pour le sol : 21cm/ 21cm, le radiomètre perçoit beaucoup plus d'hétérogénéités.

En ce qui concerne les mesures "grue", on peut approximer les distributions des valeurs de réflectances à des lois normales et considérer la moyenne des 30 mesures pour une date donnée comme représentative de l'ensemble des mesures.

Pour les mesures terrain, les distributions sont relativement homogènes pour les premiers stades de dégradation, puis deviennent rapidement hétérogènes lorsque la dégradation augmente (l'histogramme des valeurs de réflectance devient bi ou tri modal).

Les réflectances redeviennent homogènes pour le stade F2+.

#### **b. Corrélation réflectance grue/ réflectance terrain**

On s'est intéressé aux corrélations entre les mesures prises à partir de la grue à 19m de la surface et celle prise à 1m du sol.

Bien que les coefficients de variations entre ces deux types de mesures soient très différents, on compare les réflectances moyennes des deux radiomètres mesurées à 8h, 14h et 18h pour un angle de visée de 0° pour chaque stade de dégradation sec et humide du 20/07 au 16/08/88.

On obtient des régressions linéaires avec des coefficients de corrélation > 0.89. Les corrélations sont fortes dans les trois bandes spectrales, mais plus élevées dans le domaine du visible que dans le pIR. Les pentes des droites sont différentes de 1, ceci pouvant s'expliquer par des calibrations différentes pour les deux radiomètres.

$$\begin{aligned}
 & x1g = 0,87 * x1t - 2,375 \quad r = 0,93 \quad \text{xig réflectance grue} \\
 (1) \quad & x2g = 0,82 * x2t - 0,35 \quad r = 0,92 \quad \text{xit réflectance terrain} \\
 & x3g = 0,89 * x3t + 0,75 \quad r = 0,91 \quad \text{1,2,3 : rouge, vert, pIR}
 \end{aligned}$$

On peut donc considérer que les principales variations détectées à 1m du sol le sont aussi à 19m. Le transfert d'échelle n'implique pas ici de pertes d'informations.

Cependant, pour la suite, on travaillera essentiellement sur les valeurs mesurées à partir de la grue, à cause de la faible dispersion des valeurs autour de la moyenne, au cours du temps.

### c. Représentativité des placettes d'observation par rapport à la parcelle entière

On compare les moyennes des trois mesures de réflectance prises sur chacune des placettes à celles obtenues sur la parcelle entière. Les corrélations sont satisfaisantes. Tab.23.

Tab.23. *Corrélation entre les réflectances moyennes de la parcelle entière du 20/07/88 au 16/08/88 et les réflectances mesurées sur les placettes d'observation.*

	r(xs1)	r(xs2)	r(xs3)
placette 1	0,92	0,92	0,87
placette 2	0,91	0,92	0,85
placette 3	0,93	0,92	0,81

*r(xs<sub>i</sub>): coefficient de corrélation de la régression linéaire entre les réflectances des placettes et celles de la parcelle dans la bande spectrale x<sub>s<sub>i</sub></sub>, i= 1,2,3: vert, rouge, pIR.*

Les réflectances relevées sur les placettes diffèrent peu des réflectances moyennes calculées sur l'ensemble de la parcelle. Il y a quelques dispersions parfois plus importantes pour certaines placettes, notamment pour la placette 2 qui évolue plus rapidement dès les 1ers apports d'eau, mais à partir des apports suivants, les trois

emplacements deviennent plus homogènes et se situent dans le domaine de variation des réflectances moyennes de la parcelle. Les variations de réflectances entre placettes résultent des variations de vitesse de dégradation, la répartition des apports d'eau n'étant pas homogène.

Globalement, on peut considérer que les mesures et observations sur les placettes sont représentatives de l'ensemble des variations que l'on peut observer sur la parcelle entière.

#### d.Extrapolation des valeurs manquantes

A la suite de pannes techniques, quelques mesures de réflectance prises à partir de la grue manquent à certains stades. (F2+, 16/08/88)

Les relations établies précédemment (paragraphe b,(1)) permettent de compléter ces données à partir des mesures effectuées au sol à 1m.

En utilisant les régressions linéaires par paliers, on calcule ensuite les réflectances de ces mêmes stades manquants aux différents angles d'incidence du capteur, 15°, 23°, 40°. Les coefficients de corrélation étant supérieurs à 0.9, les valeurs ainsi extrapolées sont considérées comme relativement fiables.

## 2.2.Variation de la réflectance au cours de la dégradation structurale

### \*.Principaux facteurs intervenant:

Au cours de cette expérience, les facteurs de variation de la réflectance sont de deux ordres:

- les facteurs intrinsèques du sol dûs aux variations de rugosité, (a), d'humidité (b) et de couleur. (les variations de couleur étant liés principalement aux variations d'humidité.)
- les facteurs dûs aux variations d'angles solaires (c) et d'incidence du radiomètre.(d).

On s'intéresse à la relation "réflectance - rugosité" dans le temps.

On peut poser un modèle simple qui se présente suivant le schéma suivant :

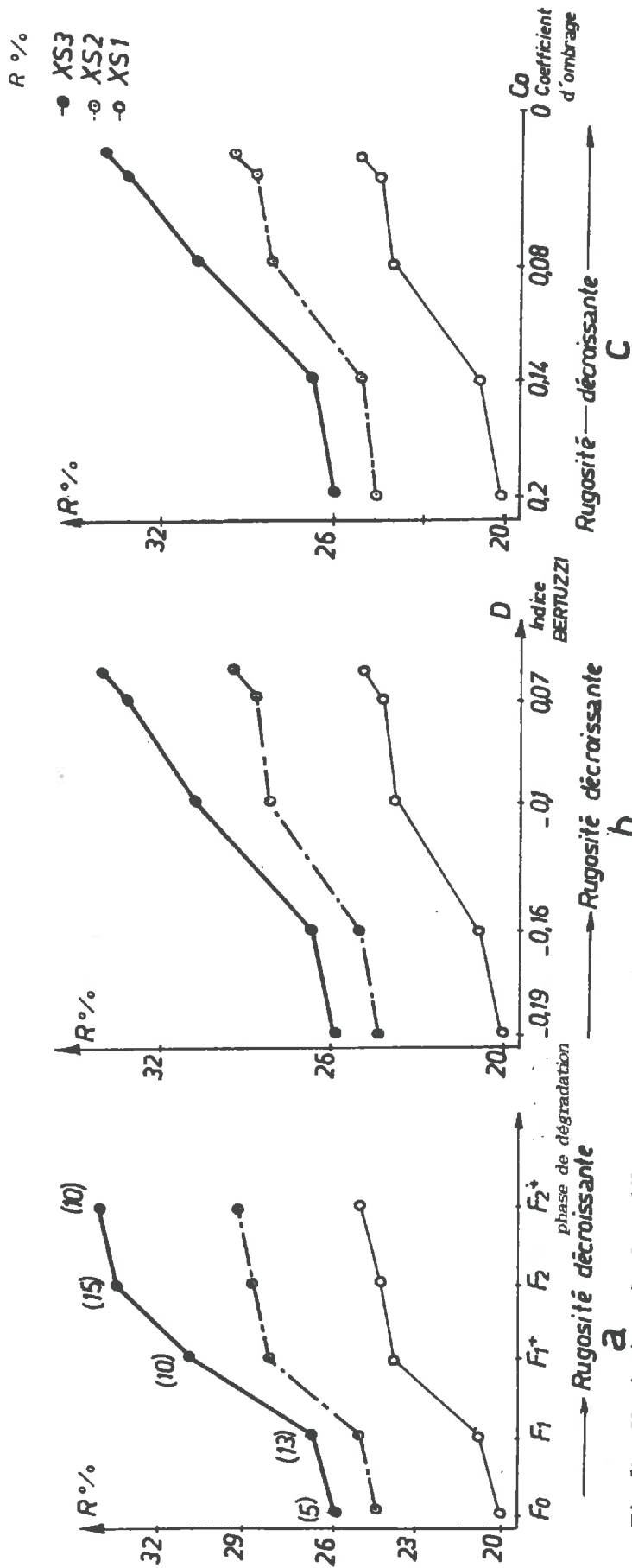


Fig.51. Variation de la réflectance mesurée à partir de la grue suivant trois critères de rugosité différents du 20/07 au 16/08/88 sur les états ressuyés, à 14h, pour un angle de visée de 0°.

(1) humidité volumique moyenne des états de surface

(Chaque point représente la valeur moyenne de 30 mesures prises sur toute la parcelle, les écarts -types concernant la réflectance ne sont pas notés car ils sont très faibles).

- réflectance dans la bande spectrale du vert
- réflectance dans la bande spectrale du rouge
- réflectance dans la bande spectrale du NIR.

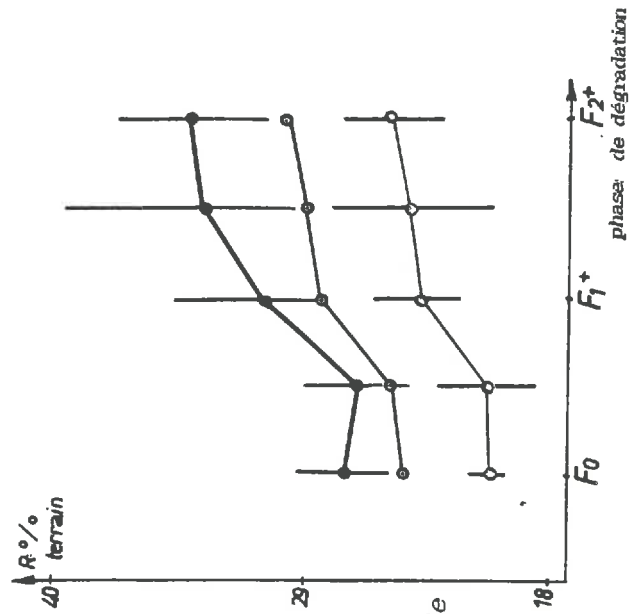


Fig.52. Variation des réflectances mesurées au sol à 1m de hauteur, du stade F<sub>0</sub> au stade F<sub>2</sub><sup>+</sup>, sur des états ressuyés à 14h à 0°.



On va donc étudier l'évolution de cette relation lorsque les autres facteurs cités plus haut varient.

Différentes situations sont étudiées en partant du cas le plus simple où ces facteurs interviennent faiblement (14h, visée verticale  $0^\circ$ , états secs), puis progressivement, lorsque l'humidité, les angles solaires.. varient, on regarde les modifications apportées au schéma de départ

*a) 1er cas simple où les facteurs intrinsèques et extrinsèques jouent un rôle moindre sur la réflectance (14h,  $0^\circ$ , états ressuyés)*

Les mesures considérées sont prises à :

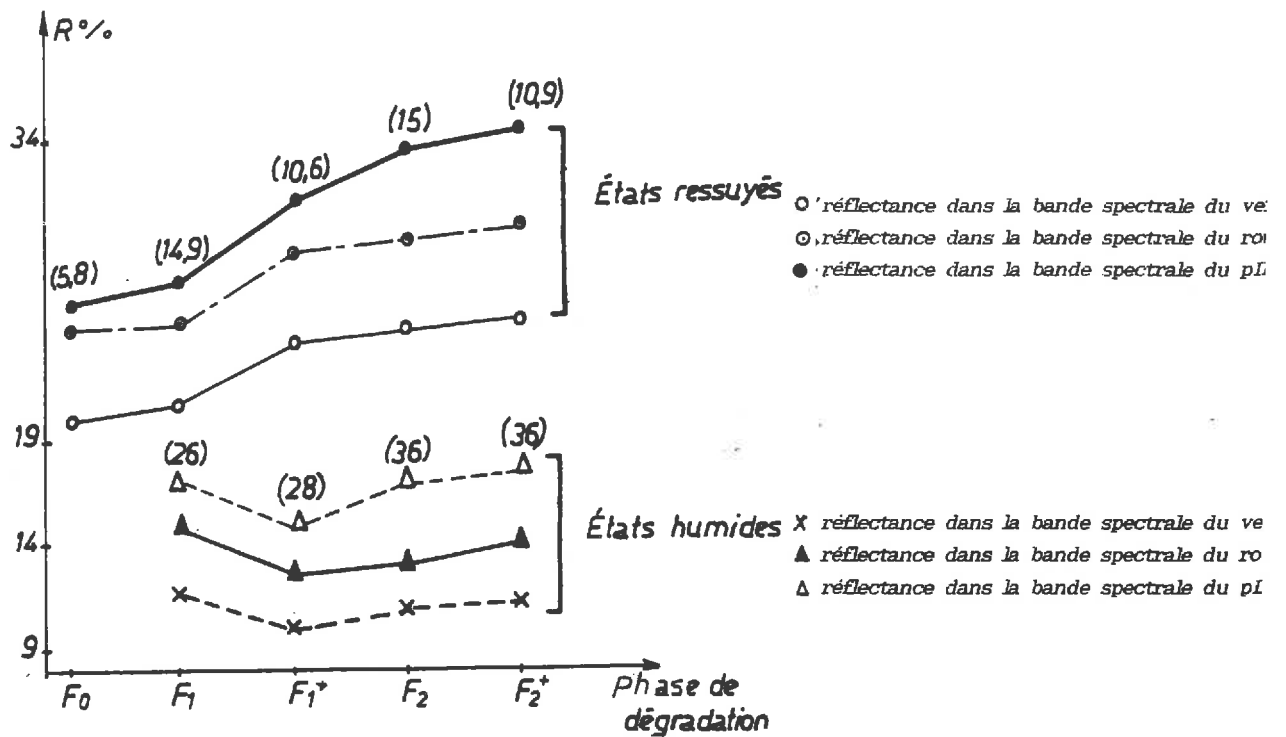
- 14h, l'angle solaire est le plus élevé, les effets d'ombre sont donc les moins importants
- l'angle de visée du radiomètre est de  $0^\circ$ , (on se place dans les situations les plus courantes des mesures satellitaires)
- les états de surface sont considérés comme secs (3 jours après les apports d'eau, l'humidité volumique moyenne est inférieure à 15%)

Divers critères ou indices peuvent être choisis pour exprimer les variations de rugosité en relation avec la réflectance.

Nous en avons comparé trois, l'échelle temps étant la même pour les trois représentations (du 20/07/88 au 16/08/88): Fig.51.

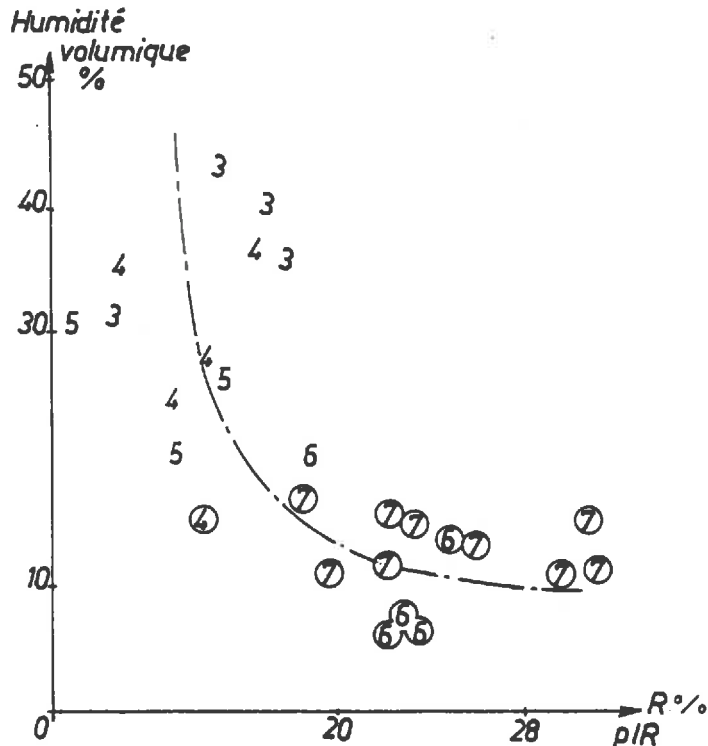
- les phases de BOIFFIN (considérée comme une variable qualitative, nous l'avons ordonnée avec un pas d'espacement égal entre chaque phase, ce qui ne signifie pas que la vitesse de dégradation est la même entre chacune de ces phases.)
- l'indice D (BERTUZZI)
- le coefficient d'ombrage  $C_o$

Quel que soit le critère choisi, on observe une décroissance de la réflectance dans les trois bandes spectrales étudiées, lorsque la rugosité augmente. Les variations sont faibles de F0 à F1 puis augmentent plus fortement de F1 à F2.



(chaque point représente la réflectance moyenne de 30 mesures).  
 (i%) représente l'humidité volumique moyenne calculée à partir de 10 prélèvements.

Fig.53. Variation de la réflectance des stades F<sub>0</sub> à F<sub>2</sub><sup>\*</sup>, sur des états ressuyés et humides.



(chaque point représente la moyenne de 10 mesures prises sur l'ensemble de la parcelle)  
 les points entourés correspondent aux états ressuyés (3 jours après aspersion), les autres aux états humides (juste après aspersion).  
 3, 4, 5, ...: clarté Munsell des états de surface.

Fig.54. Variation de la réflectance dans le proche infra-rouge en fonction de l'humidité volumique moyenne des états de surface rencontrés du 20/07/88 au 16/08/88 à 8h, 14h et 18h.

En ce qui concerne les mesures prises à 1m du sol, les valeurs moyennes suivent la même évolution que les mesures "grue", mais on constate qu'il peut y avoir une certaine confusion entre les stades voisins, les écarts-types étant importants. Cependant, on peut différencier les principales phases F0, F1+ et F2+. Fig.52.

Pour la suite, on considèrera la relation établie entre les phases de BOIFFIN et la réflectance Fig.51.a comme "modèle de référence" et on s'intéressera aux modifications de cette relation lorsque les facteurs comme l'humidité, où les angles solaires varient.

*b). Influence de l'humidité sur le modèle de référence, (14h, 0°)*

Dans les mêmes conditions d'éclairement et d'observation que précédemment, (14h, 0°) on fait varier l'humidité des états de surface. On mesure les états ressuyés (3 jours après aspersion) et humides (juste après l'aspersion). Fig.53.

- les réflectances diminuent fortement pour un même état de rugosité de l'état sec à l'état humide. Des variations de 10 à 20% de réflectance s'observent pour des variations de 10 à 25% d'humidité. Ces écarts sont plus marqués dans le proche infra-rouge et augmentent avec le stade de dégradation de la surface.

- Il est possible que l'humidité masque en partie l'effet de la rugosité ou du moins l'atténue fortement puisque les variations de réflectance observées entre les stades F0 et F2+ sont beaucoup moins importantes que pour les états ressuyés. Pour les états humides, à partir de F1+, il y a une légère augmentation de la réflectance lorsque la rugosité diminue.

Ces remarques nous ont amené à étudier les relations entre l'humidité volumique mesurée pour ces différents états de surface, à 8h, 14h et 18h et la réflectance dans le proche infra-rouge. Fig.54.

On obtient une relation du même type que celle obtenue entre la réflectance à 1950 nm et l'humidité pondérale des échantillons mesurés au laboratoire (chapitre 2, Fig.41.p 94). Plus l'humidité des sols augmente, plus la réflectance diminue. Mais cette diminution ne se fait pas de façon linéaire, elle suit un modèle exponentiel avec une dispersion ici plus importante que dans le cas des échantillons mesurés au spectrophotomètre. ( $r = 0,6$ )

Lorsque l'humidité volumique est inférieure à 15%, les clartés sont supérieures à 6 ou 7 et la réflectance est supérieure à 20%.

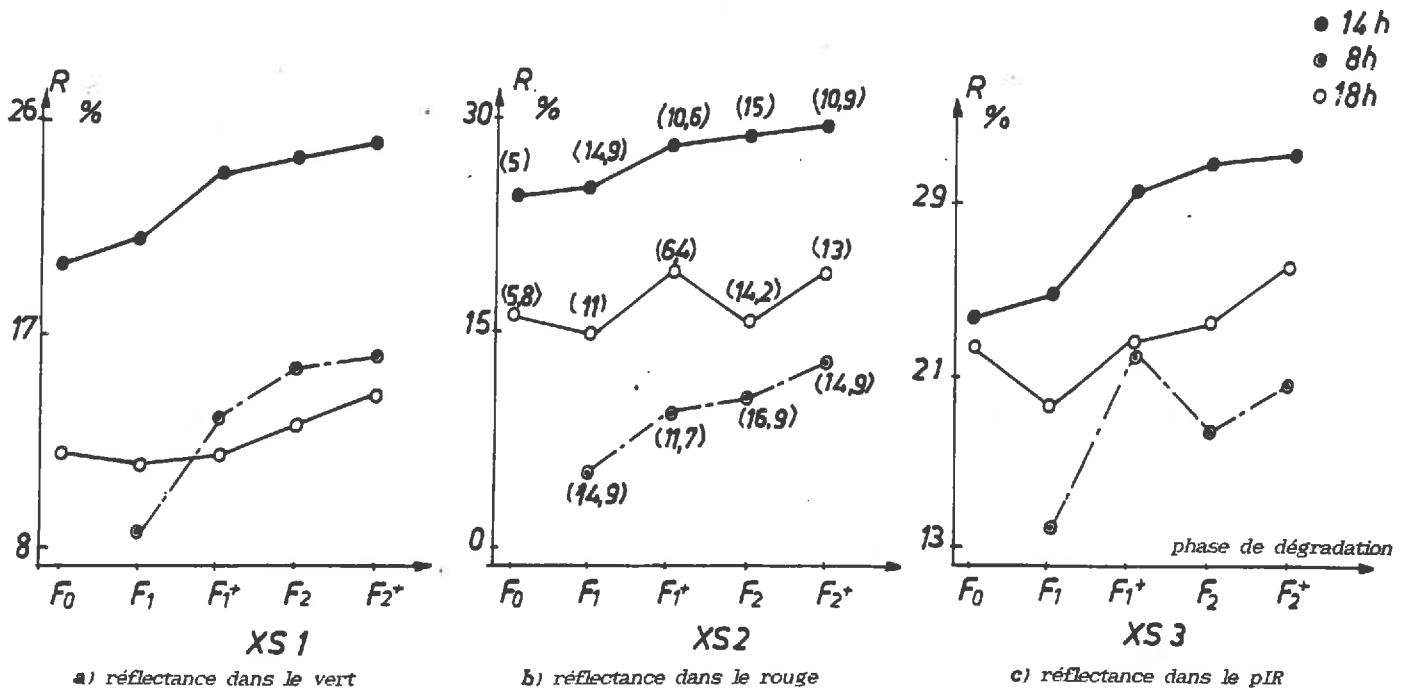
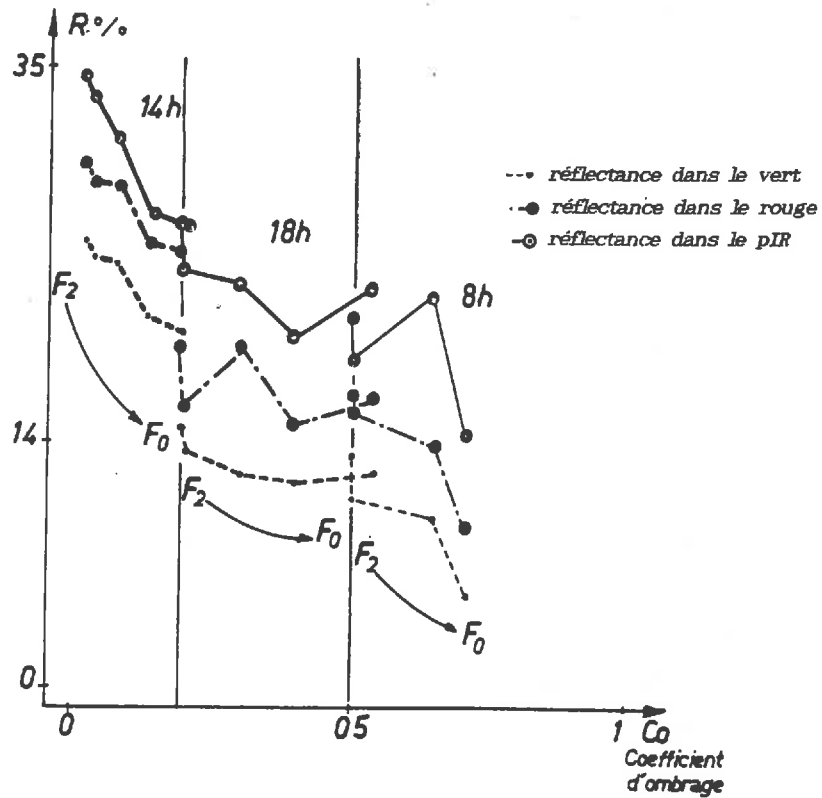


Fig.55. Variation de la réflectance des stades  $F_0$  à  $F_2^+$  suivant les conditions d'éclairément à 8h, 14h et 18h sur des états ressuyés.  $t_i$  humidité volumique moyenne



(Pour la valeur du coefficient d'ombrage, on a pris la moyenne calculée à partir de 6 profils de rugosité pour chacun des stades)

(Pour la réflectance, il s'agit de la moyenne de 30 mesures prises à partir de la grue.)

Fig.56. Variation de la réflectance dans le pIR en fonction du coefficient d'ombrage calculé à 8h 14h et 18h, pour des angles de visée du radiomètre de  $0^\circ$ .



Au dessus de 15% d'humidité, les variations de réflectance sont faibles ( $\leq 10\%$ ), les clartés sont inférieures ou égales à 4.

*c) Variation des conditions d'éclairement, (0° états ressuyés)*

Deux conditions du modèle initial sont conservées: les mesures sont prises sur des états considérés comme ressuyés, avec un angle de visée du radiomètre de 0°. Ce sont les conditions d'éclairement qui changent puisque l'on considère à présent les mesures prises à 8h (18°, plan E-O), 14h (64°, plan N-S) et 18h (30°, plan E-O). Fig.55.

Les variations de réflectance du stade F0 au stade F2<sup>+</sup> sont différentes pour ces trois situations. Ceci peut s'expliquer par plusieurs phénomènes qui interviennent :

- les humidités de surface sont différentes à 8h, 14h et 18h
- plus l'angle solaire est bas, plus il y a d'ombre.

Une première remarque: à 8h et 18h, les variations de réflectance entre F0 et F2 diffèrent suivant la bande spectrale considérée.

- à 8h, la courbe est croissante dans le visible, alors que dans le proche infra-rouge, il y a des fluctuations, ce dernier domaine semblant plus sensible aux variations d'humidité.

Globalement, il y a une décroissance de la réflectance (mesurée à 0°) en fonction de l'augmentation de la rugosité quelle que soit l'heure de la mesure, cette décroissance est plus nette à 14h dans le pIR. A 8h ou 18h, les variations d'humidité ou d'ombrage semblent avoir plus d'importance et entraînent quelques fluctuations sur ce modèle.

Pour un stade structural quelconque, on constate que la réflectance varie à l'inverse du coefficient d'ombrage, à 8h, 14h et 18h.(on retrouve le même modèle de CIERNIEWSKI, 1988, chap.1.,Fig.18.p 35) Fig.56.

*d) Variation des angles et azimuts de visée du radiomètre, (14h états ressuyés)*

On considère les mesures prises à 14h sur les états ressuyés, les angles de visée du radiomètre varient de 0° à 40° dans deux plans perpendiculaires, l'un orienté E-O, l'autre orienté parallèle N-S.Fig.57.

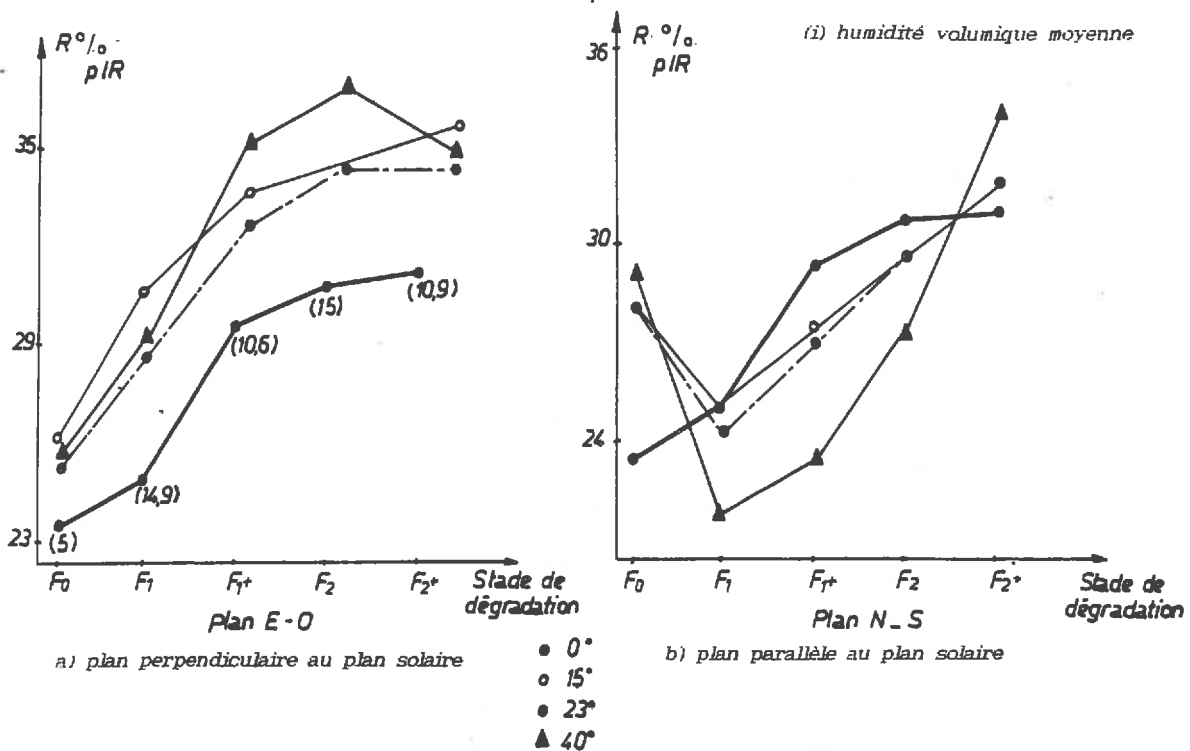


Fig.57. Variation de la réflectance dans le pIR à 14h sur des états ressuyés des stades F<sub>0</sub> à F<sub>2</sub> aux différents angles de visée du radiomètre (0°, 15°, 23°, 40°) dans le plan perpendiculaire aux rayons solaires (a) et dans le plan parallèle aux rayons solaires (b).

- dans le plan E-O, Fig.57.a., (perpendiculaire au plan solaire à 14h, la quantité d'ombre perçue par le radiomètre est la même quel que soit son angle de visée).

La forme du modèle de référence est peu modifiée quel que soit l'angle étudié. La réflectance est toujours croissante de F<sub>0</sub> à F<sub>2</sub>.

Plus l'angle de visée est élevé, plus la réflectance augmente. Il semble qu'il y ait un seuil à partir de 15°, car on observe une différence bien marquée entre les réflectances à 0° et celles aux autres angles d'incidence. (Peut-être y a-t-il des similitudes entre les angles des différents états de surface (proches de 15° ou plus) et l'angle de visée du radiomètre. Des effets spéculaires interviendraient dans ce cas.

- dans le plan N-S, Fig.57.b, (plan parallèle au plan solaire à 14h), au stade F<sub>0</sub>, plus les angles augmentent, plus la réflectance augmente (la tête de luminosité se déplace dans le plan de rétrodiffusion des rayons solaires). Entre F<sub>1</sub> et F<sub>2</sub>, la situation est inversée, plus les angles de visée augmentent, plus la réflectance diminue. Il semble dans ce cas que les variations d'humidité soient prépondérantes sur les variations d'ombre qui sont relativement faibles au midi solaire.

e) *Variation des angles et azimuts d'éclairément et d'observation, (états ressuyés)*

On considère les états ressuyés, lorsque les conditions d'éclairément (8h, 14h, 18h) et les conditions d'observations (de 0° à 40°) varient dans les deux plans perpendiculaires. Fig.58.

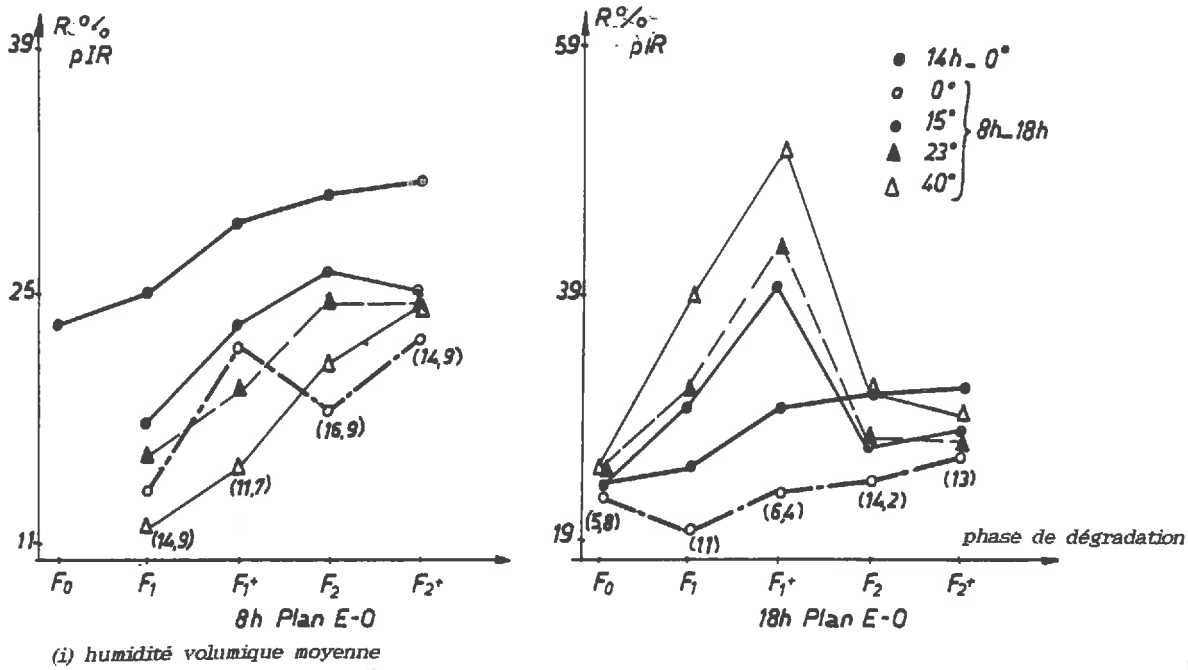


Fig.58. Variation de la réflectance des stades F0 à F2+ lorsque les conditions d'éclairément (8h, 14h, 18h) et les conditions d'observation (0°, 15°, 23°, 40°) changent. (sur des états ressuyés.)

Les situations où les variations sont maximales de F0 à F2+, sont celles où l'angle solaire est le plus bas, (8h) avec l'angle d'observation le plus élevé (40°) lorsque celui-ci se situe dans le plan opposé au rayonnement solaire. C'est la situation où les variations d'ombre sont le mieux perçues et semblent dominer sur la réflectance par rapport aux variations dues à l'humidité.

A 18h, comme à 14h, les variations d'angle d'observation se faisant dans le plan de rétrodiffusion, l'ombre intervient moins. Les variations de réflectance observées semblent être dues essentiellement aux variations d'humidité.

## Conclusion

Plusieurs points ressortent de ces résultats :

- 1) Le transfert d'échelle aussi bien dans le sens "horizontal" (passage de la placette à la parcelle) que dans le sens "vertical" (passage de 1m à 19 m) s'effectue sans perte d'information essentielle. Les coefficients de corrélations sont en effet supérieurs à 0,9 entre ces différents niveaux.
- 2) Sous certaines conditions : 14h, 0°, états ressuyés
  - on peut différencier les principales phases de dégradation définies par BOIFFIN, par la réflectance.
  - on obtient en effet une relation croissante entre la réflectance et la dégradation structurale de la surface de F0 à F2. Cette relation constitue notre modèle de référence.
- 3) deux facteurs semblent prépondérants sur la forme de cette courbe
  - l'humidité de surface
  - la quantité d'ombre prise en compte par le radiomètre.

On a observé les modifications de ce modèle lorsque l'humidité et les conditions d'éclairage et d'observation ont varié.

Lorsque l'humidité augmente, la réflectance diminue fortement (10%) quel que soit le stade de dégradation, la clarté diminue également, les contrastes entre les surfaces éclairées et celles à l'ombre sont moins importants, par suite, l'écart de réflectance entre F0 et F2 est plus faible.

Les conditions optimales pour différencier le mieux les phases de BOIFFIN sont celles où les variations d'ombre sont le plus importantes, c'est à dire à 8h du matin avec l'angle de visée le plus élevé 40°, dans le plan solaire, direction opposée au rayonnement solaire.

Cependant, ce sont des conditions rarement rencontrées avec les données satellitaires (l'angle maximal est de 27° et le plus souvent les mesures sur nos régions d'étude sont prises entre 10 et 14h).

Une modélisation de cette relation "réflectance - stade de dégradation" a été tentée pour les différentes situations par une régression multiple faisant intervenir les deux principaux facteurs énoncés plus haut suivant une équation de la forme :

$$\text{Réflectance} = a * (\text{humidité volum. \%}) + b * (\text{coefficient d'ombrage}) + c$$

a, b, c sont des constantes déterminées pour chacun des cas.

Chaque situation a ses propres paramètres. Tab.24.

Tab.24. Valeurs des coefficients des régressions multiples et corrélations correspondantes pour différentes situations de mesures des états de surface ressuyés.

	a	b	c	r
8h v	-0,67	-38,2	46	0,96
8h r	-0,82	-37,7	43,8	0,94
8h pIR	-1,6	-35	67,3	0,97
14h v	-0,24	-58,8	38,3	0,98
14h r	-0,17	-35,4	32,5	0,98
14h pIR	-0,14	-34,6	27	0,98
18h v	0,01	-10,8	21	0,68
18h r	0,12	-11,21	24,21	0,69
18h pIR	-0,03	-15,26	32,68	0,55

$$\text{Réflect.} = a * \text{humidité} + b * \text{coeff. d'ombrage} + c$$

Les corrélations sont relativement satisfaisantes puisque le coefficient r est supérieur à 0.9, quelle que soit la bande spectrale considérée à 8h et 14h. A 18h, le coefficient de corrélation est plus faible, le radiomètre se situe dans le plan parallèle au plan solaire, dans le plan de rétrodiffusion, les résultats auraient été peut-être meilleurs si celui-ci avait été dans le plan opposé au rayons solaires, l'ombre aurait pris plus d'importance dans le signal.

On constate que pour ces trois situations (8h, 14h, 18h), les valeurs des coefficients affectés au coefficient d'ombrage (b) sont largement supérieures à celles affectées à l'humidité volumique (a).

Ces résultats sont applicables dans le cas de l'expérience d'Avignon, pour un type de sol donné. Pour d'autres situations, chaque type de sol a son comportement particulier, les valeurs limites des états ressuyés sont différentes..., il convient donc d'étudier le rôle des paramètres tel que la matière organique ou le calcaire sur les relations mises en évidence ci dessus.

## II. Suivi de la dégradation structurale de la surface sous pluies naturelles. Variations des facteurs intrinsèques. (Exemple des placettes de Grignon et des 42 parcelles de Versailles)

Différents sites sont choisis où la composition, la couleur, la rugosité initiale du sol varient pour mener les mêmes expériences que précédemment.

L'objectif est de mesurer les variations de réflectance pour un même stade structural donné lorsque les facteurs cités ci-dessus varient.

- quelles sont les modifications apportées au modèle de référence et les facteurs dominants sur la réponse spectrale?

Les protocoles établis pour les expériences suivantes sont relativement simplifiés par rapport à celui d'Avignon pour plusieurs raisons :

- on ne dispose pas du même matériel : grue, asperseur, rugosimètre laser..
- les emplacements sont limités

Ces expériences se sont donc déroulées sous pluies naturelles, ce qui implique certaines contraintes notamment pour les mesures radiométriques.

L'organisation des mesures comporte toujours deux aspects :

- les observations macroscopiques des états de surface, à partir de placettes. Celles-ci ont été faites après chaque épisode pluvieux important. (notations des phases de BOIFFIN, de la couleur Munsell, prélèvement d'humidité entre 0 et 2 cm)

- les mesures radiométriques. Elles sont très dépendantes du temps puisqu'elles doivent se faire sous un ciel dégagé le plus homogène possible.

Elles ont été faites suivant les conditions standards définies pour le modèle de référence, c'est à dire à 14h (midi solaire, angle solaire le plus élevé avec un intervalle de +/- 2h), avec un angle de visée de 0° verticalement) sur des états considérés comme secs (après ressuyage, pas d'eau libre en surface) à 1m de la surface (surface visée : 21cm/21cm).

### 1. Variation de la rugosité initiale, expérience des placettes artificielles de Grignon.

7 états de surface différents ont été créés, relativement homogènes où seule la rugosité varie. La couleur et la composition du sol restent constantes.

Sur un sol initialement labouré, sur le plateau de Grignon (sol brun lessivé, 22% d'argile en surface, 1.2% de matières organiques), on a disposé 7 placettes de 50cm/50 cm, tamisées chacune à des calibres différents.

>2cm, (1- 2 cm), (0.5 - 1 cm), (0.35 - 0.5 cm), (0.2 - 0.35 cm), (0.1 - 0.2 cm),  
<0.1 cm.

Le choix de ces classes s'est fait essentiellement en fonction des tamis disponibles et de façon à avoir une gamme de situations bien contrastées.

La terre est étalée de façon homogène à la surface de la parcelle sur quelques centimètres d'épaisseur.

Les assemblages réguliers d'agrégats ou de mottes constituent une micro ou une macro-rugosité avec une certaine périodicité.

On observe comment évolue la réflectance de ces placettes au cours du temps lors de leur dégradation sous pluies naturelles.

Le suivi s'est effectué du 22 octobre 87 au 10 Décembre 1987. Les hauteurs angulaires solaires durant cette période d'observation sont relativement faibles, elles varient de 33° à 19°. (ce qui correspond aux variations d'angles solaires à 18h, pour le mois de Juillet en Avignon). Les variations du coefficient d'ombrage calculé à partir d'un profil théorique nous donne des valeurs de Co allant de 0,2 à 0,46.

Les placettes ont reçu 90 mm d'eau dont deux épisodes pluvieux importants survenus le 27 octobre (intensité > 5mm/h) et le 26 novembre 87 (intensité supérieure à 10mm/h)

### 1.1.Effet de la taille des agrégats sur la réflectance

\*Au stade F0, les courbes de réflectance des différentes placettes sont relativement proches. Les écarts de réflectance entre les placettes les plus grossières (>2cm) et les plus fines sont faibles. Ces écarts augmentent avec les longueurs d'onde. Fig.59.  
La réflectance semble peu sensible à un micro ou à un macrorelief.

\* Dès 34 mm d'eau (29oct), les différenciations se font plus nettement, notamment pour les placettes dont les éléments ont les tailles les plus fines (<5mm). A cette même date, toutes les placettes sont en phase F1, mais certaines sont à des stades plus évolués que d'autres. La dégradation structurale est d'autant plus rapide que les agrégats sont petits. Alors que les placettes dont la taille des éléments est inférieure à 5mm sont déjà en phase F1 avancée (F1+), les placettes dont les éléments sont les

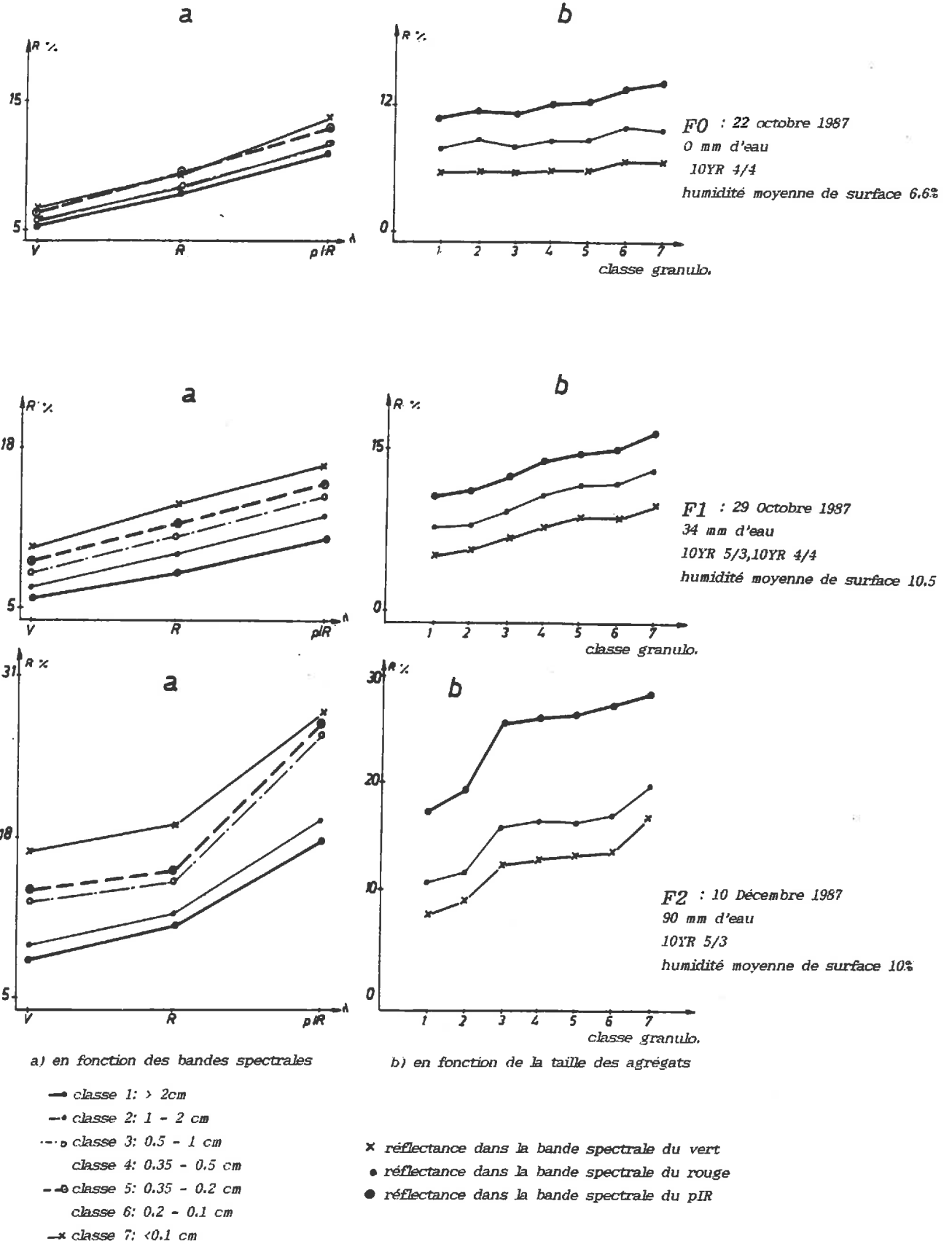


Fig.59. Variation de la réflectance suivant la taille initiale des agrégats et évolution de ces variations au cours de la dégradation structurale.



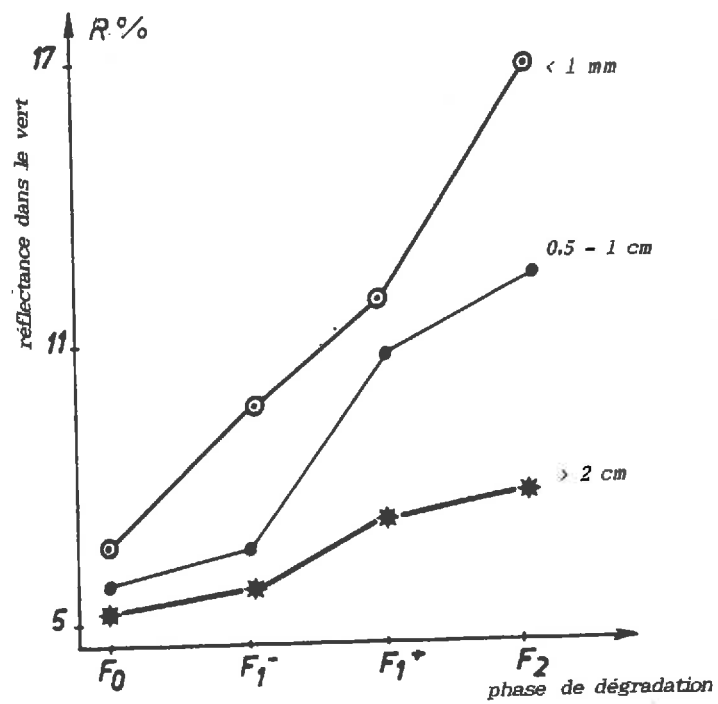


Fig.60. Evolution de la réflectance au cours du temps de quelques placettes de granulométrie différente.

plus grossiers (> 2cm) sont en début de phase 1 (F1<sup>-</sup>). Ces écarts se traduisent par la radiométrie puisque les variations entre placettes augmentent de F0 à F1.

\* Enfin le 10 décembre (90mm d'eau), toutes les placettes sont en phase F2. La même remarque que précédemment peut être faite : à une même phase correspondent des états de surface de rugosité variable. La placette <1mm a une surface complètement plane et claire (10YR 6/3), la placette >2cm présente une croûte continue, des dépôts de limons blancs.. mais sa surface est encore bosselée, les effets de l'ombre sont plus importants, par suite la réflectance est plus faible.

### 1.2. Evolution de la réflectance au cours de la dégradation de la surface de quelques placettes

La réflectance est continuellement croissante du stade F0 au stade F2, quelle que soit la placette considérée. Fig.60. La pente de la courbe est la plus forte pour les placettes <5mm, puis progressivement, plus la taille des agrégats augmente, plus la pente de la courbe diminue. Deux paliers s'individualisent pour les états les plus grossiers (F0-F1<sup>-</sup>, F1<sup>+</sup>-F2).

Les écarts de réflectances du stade F0 au stade F2 sont plus importants pour les placettes dont la granulométrie est la plus fine. Tab.25.

Tab.25. Variation de réflectances  
intra-placettes des stades F0 à F2.

	Dxs1	Dxs2	Dx3
<1 mm	10,5	10	8,5
0,5-1 cm	7	8	14
>2 cm	3	7	13

*Dxs1: réflectance de la placette i au stade F2 - réflectance de la même placette au stade F0 pour la bande spectrale du vert.*

*1, 2, 3: vert, rouge, pIR*

Dans la plupart des cas, l' écart de réflectance entre F0 et F2, quelle que soit la bande spectrale considérée pour une même placette (variation "intra-placette"), est plus important que l'écart de réflectance pour un stade structural quelconque, entre les placettes dont la taille des agrégats varie ("variation inter-placette"). Tab.26.

42 Témoïn	41 Sulfate de potasse	40 Chaux	21 Témoïn	20 Nitrate d'ammoniaque	19 Sulfate d'ammoniaque
39 Carbonate de chaux	38 Super- phosphate de chaux	37 Chlorure de potasse	18 Sang d'esséché	17 Nitrate de soude	16 Nitrate de chaux
36 Sylvinite	35 Scories	34 Témoïn	15 Chlorhydrate d'ammoniaque	14 Phosphate d'ammoniaque	13 Témoïn
33 Phosphate naturel	32 Témoïn	31 Carbonate de chaux	12 Fumier	11 Témoïn	10 Fumier
30 Témoïn	29 Sylvinite	28 Phosphate naturel	9 Témoïn	8 Sang d'esséché	7 Chlorhydrate d'ammoniaque
27 Super- phosphate de chaux	26 Chaux	25 Sulfate de potasse	6 Nitrate d'ammoniaque	5 Nitrate de chaux	4 Nitrate de soude
24 Scories	23 Chlorure de potasse	22 Témoïn	3 Phosphate d'ammoniaque	2 Sulfate d'ammoniaque	1 Témoïn

*Fig. 61 . Dispositif expérimental des 42 parcelles de Versailles.*

*les parcelles hachurées ont été analysées plus particulièrement*

Tab.26. Variation de réflectances inter-placettes au différents stades de dégradation.

	dxs1	dx2	dxs3
F0	1,5	1,5	3,5
F1	3,5	5	6,5
F2	8	9	10

*dxs1*: écart maximal de réflectance entre les placettes pour la bande spectrale du vert  
1, 2, 3 : vert, rouge, pIR  
(Réflectance de la placette <1mm - réflectance de la placette >2cm)

### Conclusion

La taille des agrégats est inversement proportionnelle à la vitesse de dégradation. En effet, on a observé que plus la rugosité initiale est grossière, plus la dégradation structurale de la surface est lente, inversement, les états les plus fins (<5mm) passent rapidement en phase F2.

La réflectance traduit bien ces différences de comportements.

Au stade initial, F0, on a constaté que les mesures radiométriques sont peu sensibles à une macro ou une microrugosité.

Les variations de réflectance sont plus importantes entre les divers stades structuraux qu'entre les différentes granulométries des placettes.

## 2. Variation de la couleur et de la composition. expérience des 42 parcelles de Versailles

### 2.1 Présentation du site

Il s'agit d'un dispositif sur lequel sur un sol initialement sablo-limoneux en place, depuis 1928, sont appliqués des engrais et amendements variés sur des emplacements de 2m/2.5m. Ces 42 parcelles sont retournées deux fois par an et maintenues en jachère nue toute l'année. Elles ne sont soumises qu'aux agents de dégradation extérieurs, en particulier le plus important, la pluie.

Il demeure 9 témoins du sol initial sablo-limoneux dont les caractéristiques sont les suivantes : 3.9% d'argile, 63% de sable, 3.9 %MO, pH=6.4. Les autres placettes reçoivent soit des amendements organiques ou calcaires, soit des engrais phosphatés, ou potassiques ou azotés en automne ou au printemps. Fig.61.

Suivant le traitement appliqué depuis des années, les parcelles se sont individualisées par leur comportement physique et leur couleur différents. Le pH décroît progressivement depuis 1928, avec les engrais azotés et phosphatés et augmente avec les amendements calcaires.

A certaines périodes de l'année (après une forte pluie) alors que certaines parcelles sont encore couvertes d'eau (parcelle sodique ou potassique), on constate un ressuyage beaucoup plus rapide dans les parcelles fumier et chaux.

On peut distinguer trois classes principales parmi les 42 parcelles suivant leur comportement physique.

- les parcelles stables : la dégradation est lente, la structure de surface bien conservée (fumier, chaux, scories) ceci étant dû au rôle des cations  $Ca^{2+}$  stabilisateur, et de la matière organique qui est importante pour la cohésion des éléments.

- les parcelles instables : la dégradation est rapide, elle résulte de l'effet dispersif des gros cations présents dans la solution apportée. (nitrate de soude, chlorure de potasse).

- les parcelles moyennement stables : il s'agit des parcelles à traitements azotés et des parcelles témoins.

Etant donné la proximité du site, nous avons pu effectuer 3 campagnes de mesures : deux au printemps 1987 et une en automne 1988.

## 2.2. Les diverses expérimentations de 1987 à 1988

De nombreuses études ont contribué à amincir l'horizon superficiel. Par suite, les prélèvements et mesures perturbatrices de la surface sont fortement déconseillés. Donc les points de contrôle au sol ont été limités. Ce manque est compensé par le nombre important d'analyses variées qui ont eu lieu sur ces parcelles. (BOIFFIN, BRESSON, 1988, CLOAREC, 1985...) qui compléteront nos mesures.

Les expérimentations pour chacune des saisons diffèrent légèrement par le nombre de parcelles étudiées et les mesures effectuées. Elles sont décrites dans les paragraphes suivants.

a. Les mesures du 17 Mars 1987 au 23 Juin 1987

Il s'agit d'une première approche sur les réponses spectrales de sols de couleur et de composition différentes. On veut juste observer les variations maximales de réflectances entre les parcelles, provoquées par des traitements différents pour un stade structural donné ou à une date fixe.

Des mesures de réflectances ont été prises systématiquement sur toutes les parcelles à partir du stade F0, date du bêchage jusqu'à un stade F2 avancé. (118mm d'eau dont trois pluies d'intensités supérieures à 5mm/h).

5 mesures ont été prises sur chaque emplacement, la moyenne de ces 5 mesures a été suivie au cours du temps pour une même placette et on a observé les modifications du modèle de référence, apportées par les variations des facteurs couleur et composition.

\* Au stade initial, F0, (17/03/87), c'est à dire juste après le bêchage des parcelles, les états de surface des parcelles se distinguent déjà. La rugosité est variable suivant les traitements. Certaines parcelles présentent de grosses mottes en surface (>7cm), une structure polyédrique à subanguleuse (parcelles sodiques, 17, potassiques, 37), d'autres au contraire ont une structure de type grumeleuse, les mottes sont petites (<4cm) (parcelles chaux, scories, 26, 39, ...).

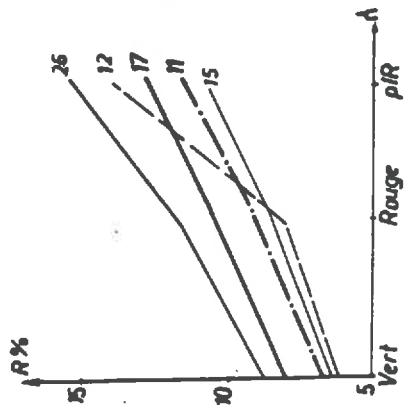
En ce qui concerne la couleur de surface, à part les deux parcelles fumier très sombres (10YR3/3), qui s'isolent de l'ensemble, les autres parcelles présentent des couleurs relativement homogènes (10YR 5/3) au stade F0.

Cette homogénéité se traduit dans les mesures radiométriques par la distribution "normale" que prennent les valeurs de réflectance le 17/03. La dispersion est plus importante dans le PIR que dans le visible. Fig. 62.

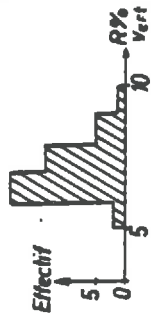
Cette distribution "s'étale" ensuite rapidement dès les premières pluies, lorsque la surface se transforme. Dès 9.7 mm d'eau (20/03), certaines parcelles instables (parcelle sodique 17) évoluent rapidement au stade F1. (Fig. 62.b).

A 28 mm d'eau, des signes de dispersion apparaissent, il y a flaquage sur les parcelles sodiques ou potassiques (17, 37) alors que sur d'autres parcelles (chaux ou fumier, 26, 12) il y a eu ressuyage. L'histogramme des réflectance devient bi puis trimodal. Fig. 62.c

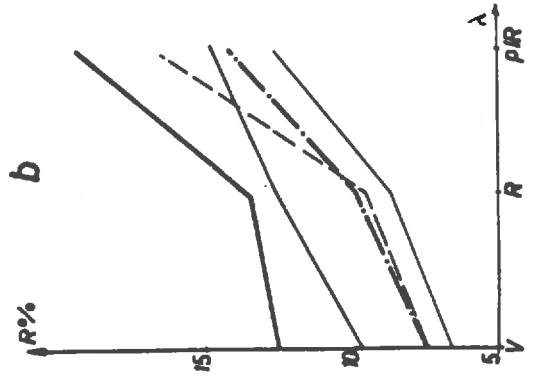
FO : 17 Mars 1987  
0 mm d'eau



	x	ec	mini	maxi
V	6,9	8,7	5,7	8,5
R	8,9	8,8	7,5	11,3
PIR	12	11,4	10,2	14,9



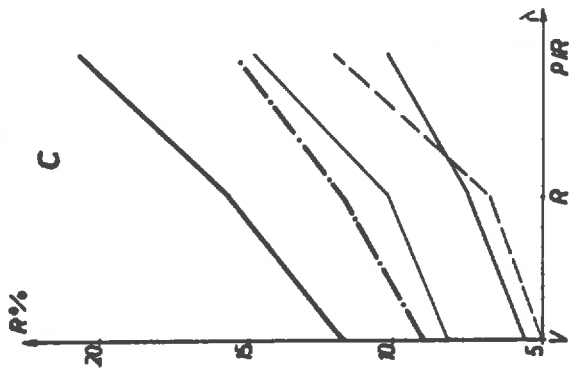
F1: 20 Mars 1987  
9.7 mm d'eau



	x	ec	mini	maxi
V	8,3	14	6,4	12,5
R	10,2	15,2	4,2	7,8
PIR	15	19,2	11,4	20



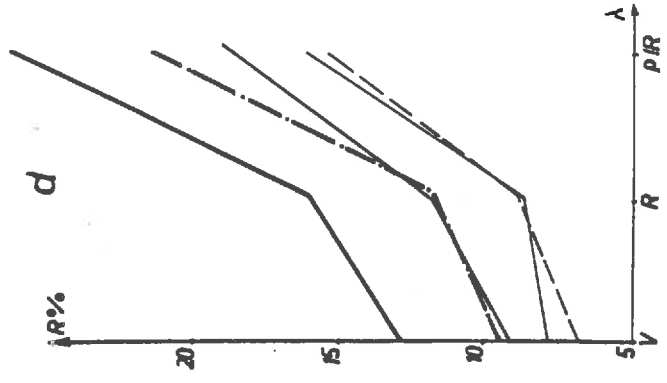
F1 - F2 :26 Mars 1987  
30 mm d'eau



	x	ec	mini	maxi
V	8,8	28,3	3,6	14,5
R	11,6	35,3	4,8	18,8
PIR	15,7	42,2	9,5	23,7



F2: 23 Juin 1987  
118 mm d'eau



	x	ec	mini	maxi
V	9,2	20	6,8	12,8
R	11,5	27	8,6	16,3
PIR	19,5	39,9	14,6	25,9

- 11 : parcelle témoin
  - - - 12 : parcelle fumier
  - 15 : parcelle azote
  - 17 : parcelle sodique
  - 26 : parcelle chaux
- x : moyenne de la réflectance des 42 parcelles  
 ec : écart-type des réflectances des 42 parcelles  
 mini : réflectance minimale  
 maxi : réflectance maximale

Fig.62. Evolution des réflectances des 42 parcelles de Versailles au cours des principales phases de dégradation



A 63 mm d'eau (15/04), ce sont les parcelles chaux(26) qui s'individualisent et passent en phase F2.

A 78mm,(25/05) quasiment toutes les parcelles sont passées en phase F2 sauf les deux parcelles fumier.

A 118 mm, toutes les parcelles sont en phase F2, les états de surface se différencient par leur rugosité et leur couleur. Fig.62.d.

- la parcelle sodique 17 a une surface lisse et claire
- la parcelle fumier 12 une surface bosselée et sombre

#### \* Résultats des Analyses en Composantes Principales

Ces résultats apparaissent aussi sur les ACP et classifications automatiques faites à partir des seules mesures de réflectances.

En effet, à chaque date de mesures, des ACP ont été faites en cumulant progressivement toutes les valeurs de réflectance.

\*On observe au stade F0, un regroupement des valeurs autour de l'axe 1 principal constitué par le visible (85% des individus). Fig.63.a.

Après 28mm d'eau, un éclatement s'est produit, l'axe 1 ne représente plus que 54% de la population totale, l'axe 2, 24%. Il semble que les différenciations autour de l'axe 1 se fassent essentiellement en fonction de la rugosité de surface.

Les ACP suivantes confirment cette partition jusqu'au 26/06 (118 mm d'eau) où toutes les parcelles sont au stade F2. A cette date (Fig.63.b) l'axe 1 principal (54%) représente l'état de rugosité ou la stabilité structurale, l'axe 2 (19%) une combinaison entre la couleur de surface et d'autres paramètres. La rugosité apparaît comme le critère dominant sur la réflectance par rapport aux autres facteurs comme la teneur en matière organique (parcelles fumier, 10,12, MO>10%...)

L'observation de ces graphiques conduit à faire plusieurs remarques :

- le comportement de parcelles à traitements identiques est variable suivant la situation spatiale. En effet, bien que les traitements appliqués concernent des couples de parcelles, chaque couple ne suit pas systématiquement la même évolution. Ainsi d'après les regroupements observés sur les ACP, toutes les parcelles témoin n'ont pas le même comportement. Pour la plupart, elles se comportent comme les parcelles à traitements azotés, c'est à dire ont une dégradation progressive dans le temps. Cependant, certaines s'isolent (9, 34) en se rapprochant soit des parcelles instables de type sodiques, soit des parcelles stables de type fumier.



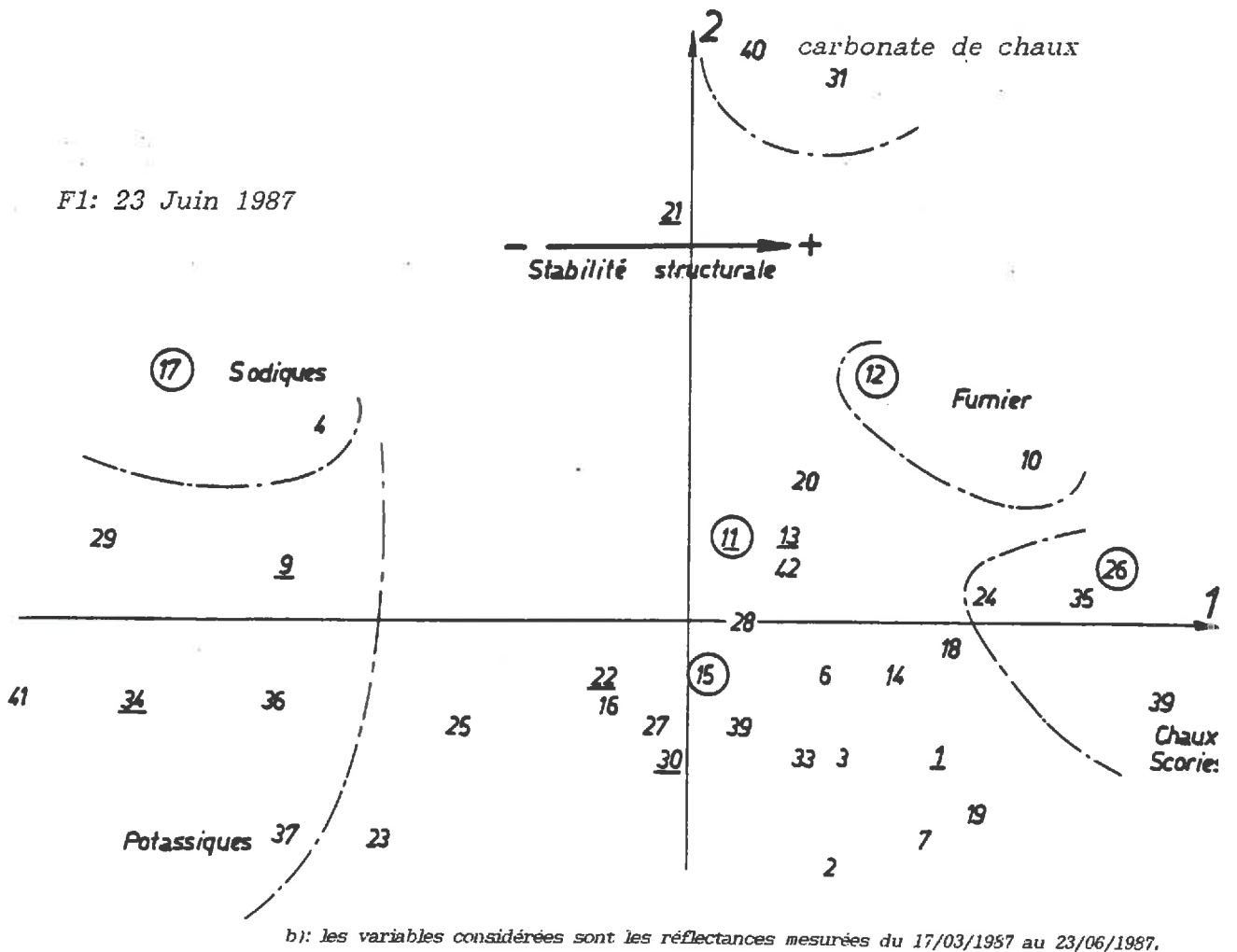
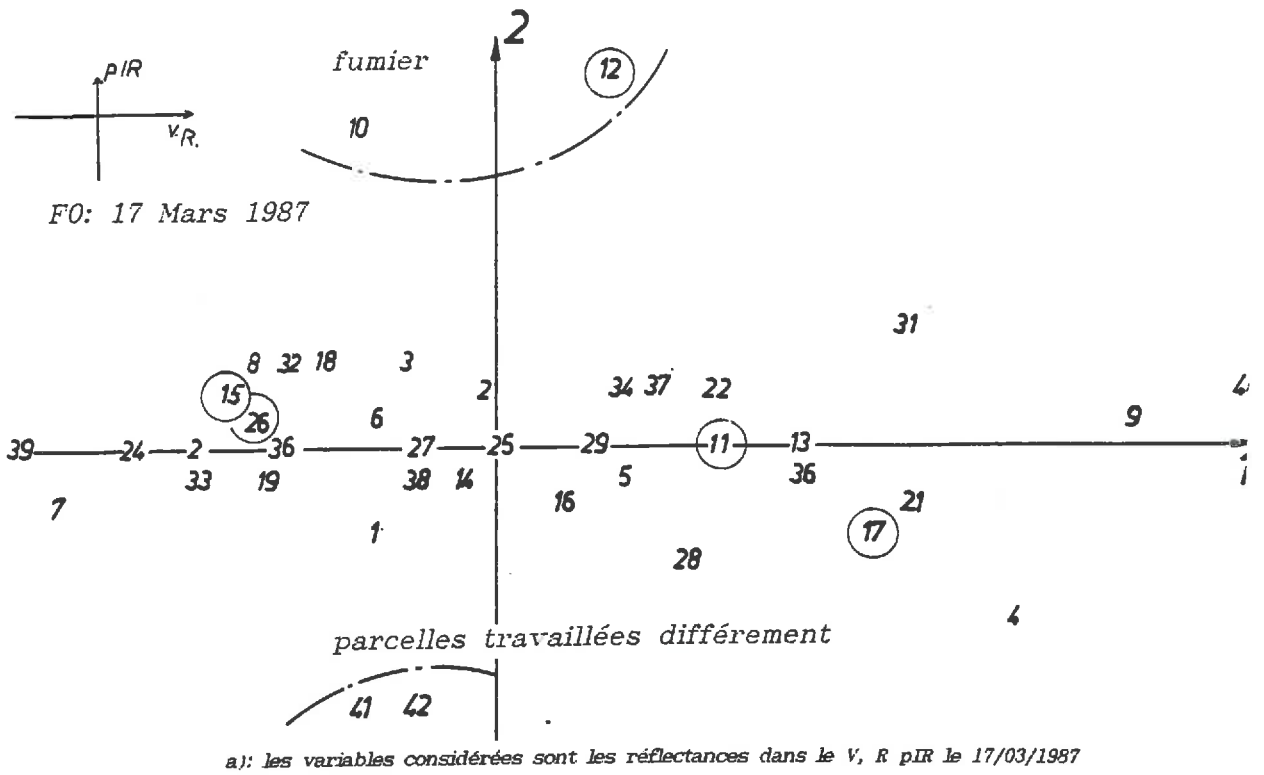
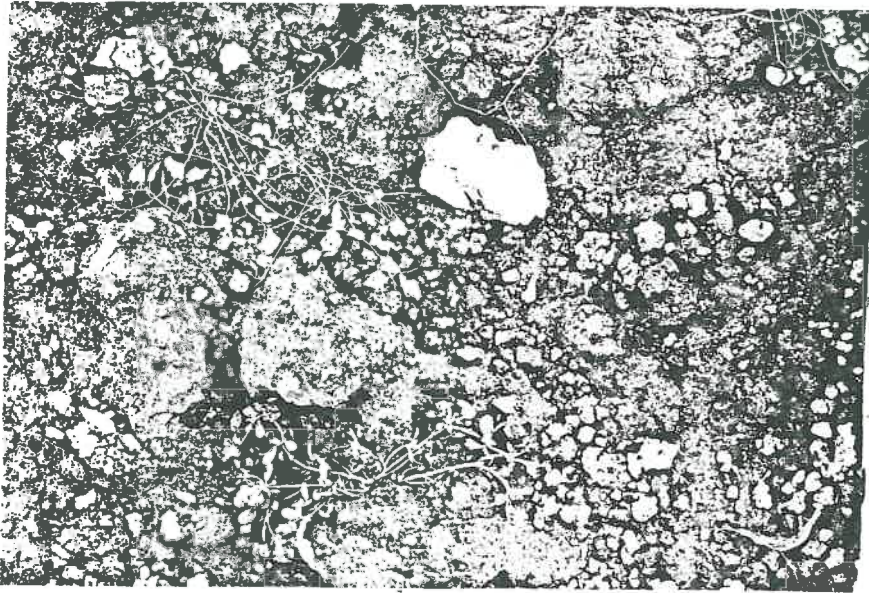


Fig.63. Résultats des ACP calculées à partir des réflectances dans les trois bandes spectrales (V, R, pIR)  
a : pour la phase F0, b : pour la phase F2.

- parcelles témoins
- parcelles étudiées plus particulièrement

ETATS DE SURFACE DE QUELQUES PARCELLES DE VERSAILLES AU  
STADE F2  
(5 novembre 1987)

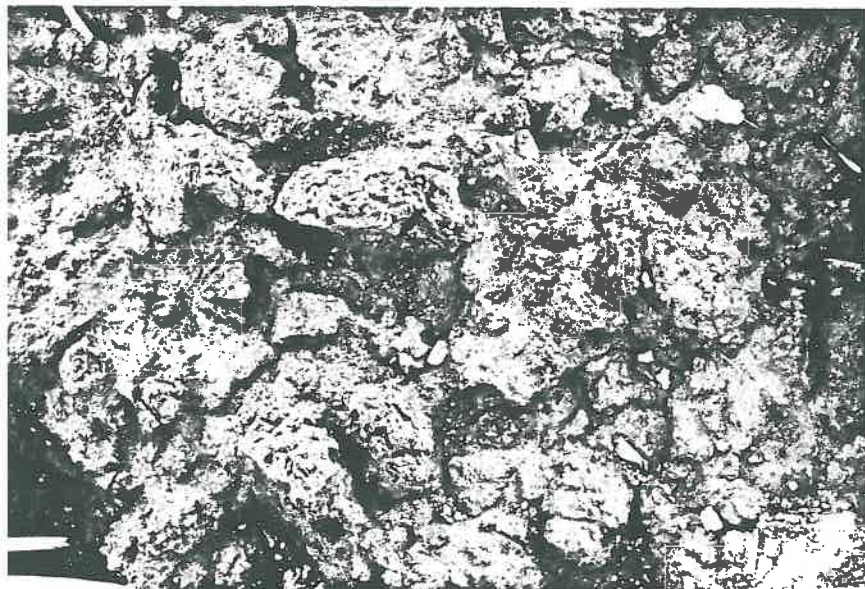
PL.1



parcelle fumier 12



parcelle sodique 17



parcelle chlorhydrate d'ammoniaque 15

Ceci peut s'expliquer par le travail initial de la terre différent pour chacune, le bêchage n'étant pas régulier et certaines parcelles pouvant avoir été plus affinées que d'autres.

- Par ailleurs, l'effet de proximité joue également. On a constaté ainsi que les parcelles orientées côté Est sont protégées par les serres et évoluent moins rapidement.

Le vent intervient également, on observe une sorte de gradient allant du nord-est au sud-ouest, les traitements peuvent "s'entrecroiser" (d'autant plus qu'à l'origine, il n'y avait pas de bordures en bois délimitant les emplacements). Donc il y a sans doute une influence du voisinage qui se fait du nord-est au sud-ouest.

b. Traitement de quelques cas particuliers, résultats du printemps 1988: du 20 Avril 88 au 7 Juin 1988

A la suite des observations de la campagne de mesures du printemps 87, le nombre des parcelles étudiées a été limité à 5. Ces parcelles ont été choisies d'après les groupes issus des analyses en composantes principales. Elles se distinguent par leur couleur, leur comportement physique particulier. Leurs caractéristiques sont indiquées dans le tableau ci dessous. Tab.27.

Tab.27. Principales caractéristiques des parcelles étudiées.

		couleur	MO	pH	arg	str
parcelle témoin	11	10YR4/4	6,6	5	10	=
parcelle fumier	12	10YR3/3	21	6,4	20	+
parcelle azote	15	10YR5/3	6,9	6	17	=
parcelle sodique	17	10YR7/4	6,2	5	20	-
parcelle chaux	26	10YR5/6	5,3	7,9	18	+

arg: teneur en argile

str : stabilité structurale, - : faible, = :moyennement stable, + : forte,

Ces 5 parcelles ont fait l'objet de mesures spectrales plus précises.

b.1. Etude de quelques échantillons, analyse au spectrophotomètre

Des échantillons des parcelles 12, 17 et 26 ont été passés au spectrophotomètre à l'état sec (pF6) et à l'état humide (pF1). On a choisi seulement ces trois parcelles car elles se distinguaient plus nettement par leur couleur et leur composition, les parcelles 11 et 15 étant relativement proches.



Cette analyse au laboratoire a permis de mesurer l'écart de réflectance pour un même état de rugosité (échantillon tamisé à 2mm) entre ces différentes.

On observe des variations d'humidité de 2 à 3% pour des mêmes potentiels entre les différents sols.Tab.28. Les couleurs, notamment les clartés Munsell changent également, la clarté de la parcelle 17 diminue de 4 unités de clarté lors de son hydratation, tandis que la clarté de la parcelle 12 diminue de 2 unités.

Tab.28. Variation des couleurs et humidités pondérales entre pF1 et pF6 des échantillons des parcelles 12 (fumier), 17 (sodique) et 26 (chaux).

	parcelle 12	parcelle 17	parcelle 26
PF1 humidité	22,17	26,55	24,8
couleur	10YR3/2	10YR3/3	10YR4/4
PF6 humidité	2,35	1,73	1,69
couleur	10YR5/3	10YR7/4	10YR7/4

La forme des courbes spectrales observées pour ces différentes parcelles correspond bien à nos observations faites dans le chapitre 2, à savoir que suivant la composition du sol, la forme des courbes dans le visible varie :

- on retrouve une courbe concave (a) pour la parcelle fumier12, ceci s'expliquant par sa teneur élevée en matière organique.

- les parcelles sodiques 17 et chaux 26 présentent une courbe plutôt convexe avec une légère absorption à 500nm (type b-d), ceci étant dû à la couleur claire de ces sols.

dans le pIR, les trois courbes ont la même forme convexe (classe1), avec des bandes d'absorption de l'eau plus marquées pour la parcelle 17.

Les variations de réflectance dans les bandes spectrales du Cimel entre les différentes parcelles sont de l'ordre de 8 à 10%.Tab.29. Ces écarts diminuent de moitié lorsque les surfaces sont humides.

Tab.29. Variation maximale de réflectance inter-parcelles pour les états humides et secs.

	dxs1	dxs2	dxs3
états secs	8	10	8
états humides	4	6	4

dxs1 : Réf.(parc.17) - Réfl.(12) dans le vert.

1, 2, 3: vert, rouge, pIR

Ces écarts de réflectance "inter-placettes" sont généralement inférieurs aux écarts "intra-placettes" dûs aux variations d'humidité.Tab.30. En effet, pour une même parcelle, les variations entre état sec et état humide augmentent du visible au pIR et sont plus importantes pour la parcelle sodique 17.Tab.30.

Tab.30. Variation de réflectance intra-parcelles entre les états humides (pF1) et secs (PF6).

	Dxs1	Dxs2	Dxs3
parcelle 12	14	18	20
parcelle 17	17	22	24
parcelle 26	15	20	29

Dxs1: RéFL.(parc.12 à l'état sec) - RéFL.(par.12 à l'état humide) dans le vert  
1, 2, 3: vert, rouge, pIR.

### b.2. Etude sur des placettes tamisées, mesures radiométriques sur le terrain

Sur le terrain avec le radiomètre, ces variations sont vérifiées en disposant sur chacune des parcelles étudiées, une placette (50/50cm) dont la surface est tamisée à 2mm.

Au stade F0, on compare les variations de réflectance entre ces placettes

	dx1	dx2	dx3
plac tamisée	3,8	5,2	6,2
plac. bêchée	5	8	12
éch labo (pF1)	4	6	4

dx<sub>i</sub> : intervalle de variation maximal entre les réflectances des placettes, i : 1, vert, 2, rouge, 3, proche infra-rouge

Sur le terrain, l'écart de réflectance entre placettes tamisées est relativement faible et de l'ordre de grandeur des variations observées sur les échantillons humides (pF1) au laboratoire.

La rugosité et les effets d'ombre interviennent dans ce cas et atténuent les variations de couleurs.

### b.3. Variation de la réflectance sur des placettes ombrées

On a mesuré la réflectance sur les 5 placettes (11,12, 15, 17, 26) lorsque leur surface est complètement ombrée (ombre provoquée artificiellement par un panneau)

et lorsqu'elles sont complètement éclairées à 14h, ce qui correspond à une variation du coefficient d'ombrage de 0.21 à 1. Ceci afin de voir si l'effet de l'ombre est perçu de la même façon suivant la couleur initiale de la surface.

La différence de réflectance est d'autant plus importante, que la surface est claire. (parcelle 17). A l'inverse plus la surface est sombre (parcelle 12), moins les écarts de réflectance entre surface éclairée et surface à l'ombre sont importants. Tab.31.

*Tab.31. Variation des réflectances intra- placettes entre les surfaces éclairées et ombrées.*

	Dxs1	Dxs2	Dxs3
parcelle 11	8	11,6	14,4
parcelle 12	3,4	5,2	9
parcelle 15	5	7,1	7,5
parcelle 17	7,7	10,9	13,2
parcelle 26	5,9	8,8	11,4

*Réfl.(par.12 éclairée) - Réfl.(par.12 ombrée) dans le vert = dx1*

**b.4. Variation de la réflectance lorsque les angles de visée du radiomètre changent**

Cette remarque nous a amené à étudier comment varient les écarts de réflectance entre ces deux parcelles claires (17) et sombres (12) lorsque les angles de visée augmentent.

Pour un même stade structural, la réflectance est mesurée à différents angles d'incidences suivant deux azimuts (N-S, E-O) sur les deux parcelles 12 et 17.

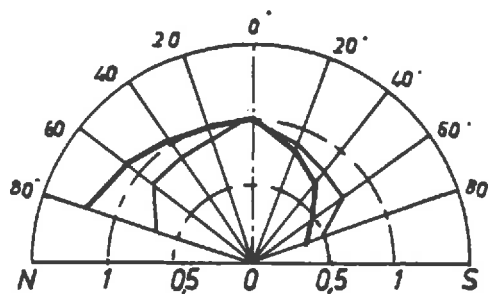
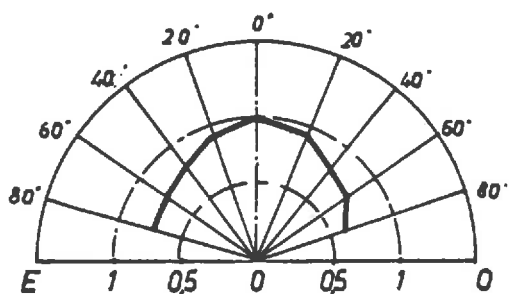
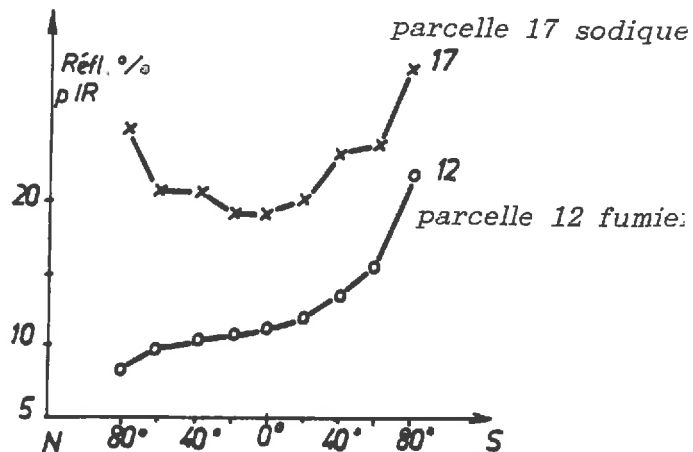
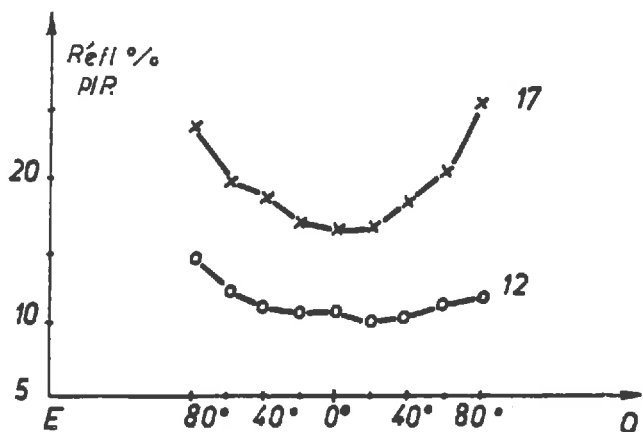
Les deux têtes d'éclairage et de luminance du Cimel sont fixées sur une poutre métallique placée à 2m de la surface. Seule la tête d'éclairage pivote autour d'un axe et effectue une rotation tous les 20°. Tab.32.

*Tab.32. Calcul des surfaces intervenant dans la mesure de réflectance suivant les variations d'angles de visée.*

<i>i</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a + b</i>	<i>c</i>	<i>D</i>
0°	0,10	0,10	0,21	0,10	0
20°	0,24	0,25	0,49	0,22	0,4
40°	0,32	0,41	0,73	0,27	1,3
60°	2,72	1,03	1,75	0,42	2,7

*se référer à la fig.45., chap.3 pour la représentation des paramètres a, b, c, D.*

Dans le plan perpendiculaire au plan solaire à 14h (E-O), l'écart de réflectance entre les parcelles 12 et 17 reste constant quel que soit l'angle de visée du radiomètre.(Fig.64.a). Il y a une parfaite symétrie de part et d'autre de la mesure à la verticale, les réflectances augmentent légèrement lorsque l'angle de visée augmente.



a : plan perpendiculaire au plan solaire    b : plan parallèle au plan solaire

Les mesures sont prises à 14h sur des états ressuyés au stade F2.

Fig.64. Variation de la réflectance de deux parcelles distinctes à différents angles de visée du radiomètre  
 a : dans le plan perpendiculaire au plan solaire  
 b : dans le plan parallèle au plan solaire.

Dans le plan parallèle au plan solaire à 14h, (N-S), les écarts de réflectances entre les parcelles augmentent avec l'angle de visée du radiomètre. (Fig.64.b). Plus la surface est rugueuse (parcelle 12), plus la réflectance diminue dans le plan opposé au rayonnement. Inversement, plus la surface est lisse, plus la réflectance est élevée dans cette même direction à cause de l'effet spéculaire. Ces deux parcelles ont donc un comportement opposé qui se différencie encore plus nettement par la réflectance lorsque l'angle d'observation augmente

#### b.5.Variation de la réflectance au cours de la dégradation structurale sur les placettes tamisées et bêchées

On étudie parallèlement l'évolution structurale des placettes tamisées et bêchées afin d'observer l'effet de la rugosité initiale sur la vitesse de dégradation.

En ce qui concerne les placettes bêchées, les courbes d'évolution de la réflectance se différencient suivant la vitesse de dégradation des placettes.Fig.65. La courbe de la parcelle sodique 17 est continuellement croissante, celle de la parcelle fumier 12, présente au contraire des parties où la réflectance augmente faiblement. Du fait de sa couleur sombre et de sa composition organique, la parcelle 12 a une réflectance toujours plus faible même au stade F2, par rapport aux autres placettes.

Par contre pour les placettes tamisées, les différences de réflectance entre parcelles sont moins marquées.(Fig.66). Les agrégats au stade initial sont fins (<2mm) aussi la dégradation structurale est plus rapide.

Dès 14 mm d'eau la placette 17 passe en phase F2.

A 44 mm d'eau toutes les placettes tamisées sont en phase F2 alors que les placettes bêchées des parcelles 12 et 26 sont encore au stade F1 et F1+.

L'écart le plus important entre placette tamisée et placette bêchée se note pour la parcelle fumier 12.(Fig.67.b). En effet, il semble que la structure en mottes, la cohésion du matériau soit la cause la plus importante de sa stabilité.

La différence est moins marquée pour la parcelle chaux 26, car le stade initial de la placette bêchée est peu différent de celui de la placette tamisée.(Fig.67.c).

Les variations de réflectance du stade F0 au stade F2 pour les placettes tamisées (20%) sont supérieures aux variations maximales inter-placettes tamisées (8%). Ce résultat n'est pas observé pour les placettes bêchées où les variations inter-placettes (notamment au stade F2, de l'ordre 12%) peuvent être supérieures aux variations de



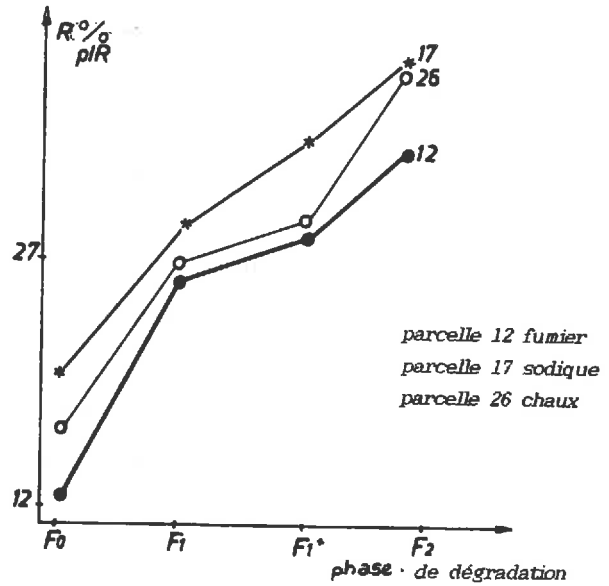
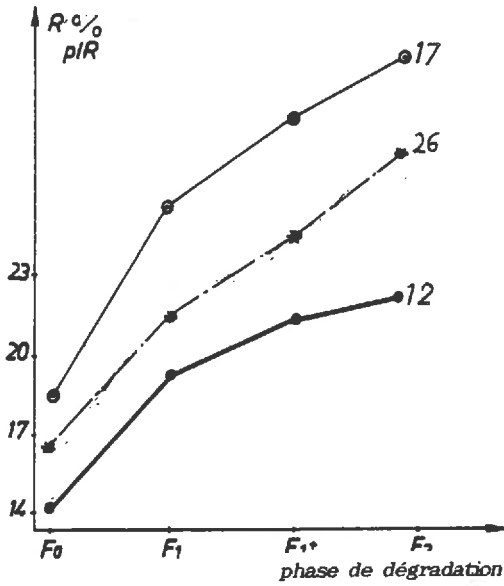


Fig. 65. Evolution des réflectances des parcelles des phases F0 à F2.

Fig. 66. Evolution des réflectances des parcelles tamisées des phases F0 à F2.

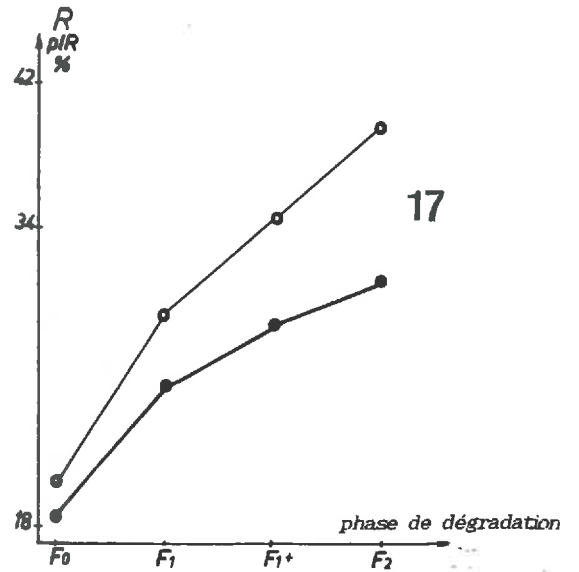
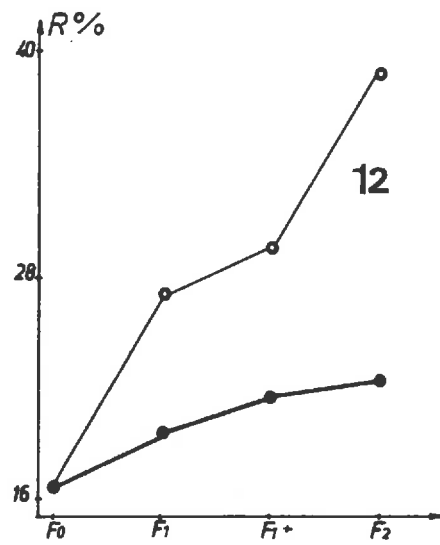
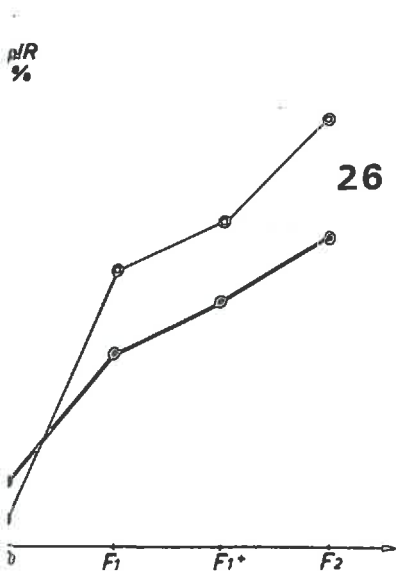


Fig. 67. Comparaison de l'évolution de la réflectance des placettes tamisées à 2mm et des mêmes placettes bêchées des phases F0 à F2.

réflectance entre F0 et F2 pour une même placette (exemple de la parcelle 12, où la différence de réflectance entre F0 et F2 est de 6%)

### Conclusion

On a observé sous conditions naturelles la dégradation structurale de différents types de sols. Les facteurs intrinsèques du sols (couleur, composition, rugosité initiale) ont varié et on a mesuré les écarts de réflectance pour un même stade structural entre les parcelles.

La réflectance différencie les 42 parcelles suivant leur comportement physique. On retrouve quatre groupes principaux :

- les parcelles fumier sombres et stables
- les parcelles chaux, et scories, ocres, stables
- les parcelles sodiques et potassiques, claires et instables
- les parcelles témoins et à traitements azotés, moyennement stables

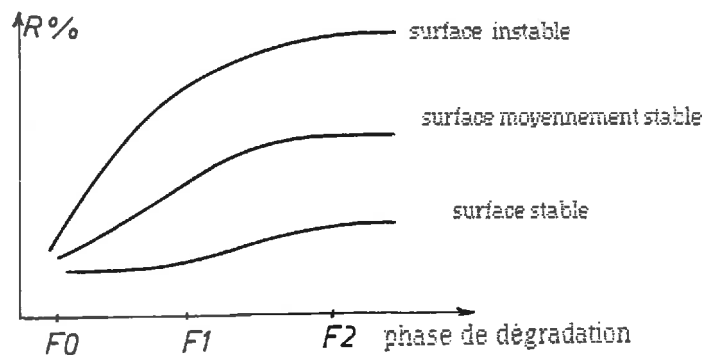
Les variations entre placettes augmentent du stade F0 au stade F2.

Les effets de l'ombre et de l'humidité sont plus sensibles sur les parcelles claires.

Bien que les paramètres initiaux ne soient pas les mêmes (type de sol, intensité des pluies, rugosité, humidité..), on peut apprécier les variations du modèle de référence de la réflectance en fonction des stades de BOIFFIN, vu précédemment sur la parcelle d'Avignon, lorsque des facteurs tels que la couleur, la matière organique ou la rugosité initiale interviennent.

Lorsque le sol contient plus de 8% de matière organique (parcelle fumier 12), ou présente une rugosité initiale grossière (parcelle bêchée ou placette de Grignon >2 cm) la dégradation est lente, la courbe d'évolution de la réflectance est à paliers.

Par contre pour les sol instables clairs (parcelle sodique 17 ou placette tamisée ou de rugosité initiale fine <5 mm), la courbe de réflectance est convexe et continuellement croissante. Ces différentes situations peuvent être résumées par le schéma suivant :



---

## **CHAPITRE 4**

### **ANALYSE SPATIALE DES ETATS DE SURFACE**

---

## **Extension des observations et mesures de surface à des parcelles agricoles, analyse spatiale des états de surface**

### 1. Intervention d'autres facteurs sur l'évolution structurale de la surface du sol

Dans le chapitre précédent, on a montré que les mesures faites sur des placettes et celles faites sur la parcelle entière sont bien corrélées ainsi que les mesures faites à 1m du sol et celles faites à 19m. Les transferts d'échelles aussi bien dans le sens horizontal que vertical ne semblent pas entraîner de perte d'information.

Cependant la situation d'Avignon était relativement simple, la parcelle d'expérimentation (0.1ha) ne présentait pas d'hétérogénéité..

Lorsque l'on passe à un niveau supérieur d'observation, de la placette à la parcelle agricole, d'autres facteurs interviennent sur l'évolution structurale de la surface :

- la géomorphologie: (pentes, talwegs..)
- les pratiques culturales (systèmes de cultures..)
- les aménagements divers
- la variabilité des sols

Les mêmes processus de désagrégation, sédimentation.. observés sur les parcelles expérimentales se produisent, mais ils sont plus ou moins accentués suivant l'intervention de ces derniers facteurs. Des marques d'érosion s'observent sur les parcelles.

L'extension de ces phénomènes peut provoquer dans certains cas des dégâts importants, ayant des conséquences sur l'environnement et sur les rendements agricoles.

Pour cette étude, nous avons choisi plusieurs sites particulièrement touchés par ces phénomènes d'érosion où la dégradation structurale est intense et a fait par ailleurs l'objet de nombreuses autres études sur ce sujet. Il s'agit de parcelles situées dans le Pays de Caux, le Soissonnais, le Loannais et l'Orléanais.

On veut étudier plus particulièrement :

- si les variations entraînées par les différentes pratiques culturales sont discernables par la radiométrie
- si la réflectance est sensible à un effet directionnel propre à certaines cultures
- ce qu'apportent les effets de variations topographiques suivant l'exposition de la pente

- et enfin quelles sont les corrélations des données radiométriques avec les données acquises par le satellite Spot.
- Peut-on distinguer les différentes marques d'érosion sur les images Spot?

## **A. Présentation des zones étudiées et expérimentation**

### 1. Présentation des sites

Deux secteurs ont été suivis plus particulièrement, en ce qui concerne les observations et mesures de surface. Des enquêtes agronomiques ont été menées parallèlement sur certaines parcelles. (M.EIMBECK, dans le Pays de Caux., et par J.MICHELIN dans le Soissonnais.)

Quelques sites ont été choisis dans l'Aisne (près de Laon et de Soissons) et dans l'Orléanais, des mesures ponctuelles sur des parcelles choisies aléatoirement ont été prises à une date donnée (parfois simultanément avec le passage du satellite Spot.), mais elles n'ont pas été répétées dans le temps.

#### 1.1. Le pays de Caux

Nous avons retenu deux bassins versants, étudiés depuis plusieurs années pour des suivis de l'érosion par des équipes de l'INRA.(BOIFFIN et al, 1986, 1988) Il s'agit des secteurs de Fongueusemare (8 km à l'est d'Etretat) et d'Epouville (10 km au NE du Havre).

Des parcelles ont été sélectionnées en sol nu (suffisamment grandes pour être distinguées par Spot) et sur lesquelles, seul le critère : système de culture varie.(lin, betterave, pois, pomme de terre).

Toutes ces parcelles sont situées sur des plateaux, la géomorphologie est peu marquée (quelques légers talwegs, pente <1%), les sols sont profonds limoneux (sols bruns lessivés), ils deviennent plus argileux à la rupture de pente, le substrat est crayeux. La couche en surface est très instable(1.8%, matière organique, 11% d'argile,pH 6-7, stabilité structurale 1.8). Il y a peu de variation de texture en surface.

La pluviométrie est importante de 900 à 1200 mm d'eau par an, mais généralement de faible à moyenne intensité.

## 1.2. Le Soissonnais

Le secteur choisi est celui de la commune de Chelles qui se situe dans l'Oise dans la petite région agricole du Soissonnais. (40 Km au NO de Soissons). A la suite d'un violent orage en 86, le village de Chelles s'est retrouvé noyé sous l'eau et la boue, à cause des phénomènes d'érosion importants. Des études sont menées par le laboratoire des sols de l'INAPG pour proposer des dispositifs de lutte contre l'érosion lors de la réorganisation du parcellaire pour le remembrement. (Y.PEYRE et al, 1989)

A la différence du Pays de Caux, plusieurs critères sont à prendre en compte, le système de culture mais aussi la géomorphologie (les pentes sont plus marquées), et l'hétérogénéité pédologique (sur les plateaux, quatre unités pédologiques se différencient, le phénomène de battance se manifeste aussi bien sur des sols calcaires que limoneux ou sableux).

La pluviométrie annuelle est de 700 mm d'eau; les intensités des pluies sont fortes au printemps.

\* Trois parcelles ont été suivies plus particulièrement, elles se différencient par leur type de sol, leur position topographique et leur système de culture.

Il s'agit :

- pour la 1ère parcelle sur plateau sans pente à texture de surface sableuse. Elle correspond à des sols sableux sur calcaire moyennement profonds (0.3, 0.6 m), (unité 6 de l'étude pédologique). Cette parcelle est semée en betterave.

- la 2nde parcelle étudiée, se situe sur sols limoneux profonds de plus de 1.2m, la texture de surface est limoneuse, (unité 1). Elle est cultivée aussi en betterave.

- la 3ième recoupe plusieurs unités pédologiques et prend en compte des variations topographiques plus marquées dont un talweg bien prononcé. On trouve des unités classées très battantes (L/ LA, LS/ L) et une unité limono-argileuse. Elle est cultivée en pomme de terre.

### 1.3. Quelques mesures ponctuelles dans l'Aisne et l'Orléanais

Plusieurs parcelles ont fait l'objet de mesures radiométriques et d'observations de surface le même jour, mais n'ont pas été suivies dans le temps. Certaines mesures ont été prises simultanément avec le passage du satellite Spot. Elles ont été choisies de façon à présenter une gamme variée de situations: pratiques culturales différentes (labour grossier, hersage, rouleau..), stades structuraux différents (certaines parcelles semées en betterave sont en phase F1, d'autres sont en phase F2, car semées plus tard..)

Des mesures en collaboration avec C. LE SOUDER ont été effectuées sur des parcelles sur lesquelles des traitements avec des conditionneurs ont été appliqués pour ralentir les phénomènes de dégradation. La même parcelle semée à la même date présente donc divers états de surface suivant les dates d'application et les concentrations de ces conditionneurs.

### 2. Mesures effectuées sur le terrain

Le fait de travailler sur plusieurs parcelles de grandes tailles, éloignées du laboratoire nous a obligé à alléger le protocole d'étude.

D'autres équipes s'occupent principalement du suivi des états de surface.(M.EIMBECK, J.MICHELIN)

\* 2 placettes au minimum sont suivies sur les parcelles selon le modèle de BOIFFIN.

Le stade initial est le semis. Des pluviographes sont installés sur chaque bassin versant.

\* La méthode "spray" (chapI, p29) a été utilisée pour estimer la rugosité de surface. 3 profils continus de 1m sont pris perpendiculairement au sens de la culture et 3 autres parallèlement à ceux-ci. Les profils sont numérisés avec un pas d'échantillonnage de 2 mm pour calculer l'indice de rugosité  $IR_1$ .

\*D'un point de vue radiométrique, des transects sont effectués le long des parcelles, parallèlement et perpendiculairement au sens du travail (30 points minimum), les mesures sont prises verticalement à 1m de la surface et au midi solaire avec un angle de visée de  $0^\circ$ .

3 mesures sont relevées également sur chacun des emplacements des placettes pour tester la représentativité des placettes vis à vis de la parcelle entière.

Les mesures dans le Pays de Caux ont commencé le 2 Avril 1987 et se sont terminées le 22 Juin 1987. (88 mm d'eau)

Celles dans le Soissonnais se sont déroulées sur deux saisons : du 20 Avril 1988 au 12 Juin 1988, et du 6 Novembre 88 au 14 Décembre 88.

### 3. Les données satellitaires

En ce qui concerne le Pays de Caux, seul le secteur d'Epouville est représenté. Deux images Spot ont été prises en mode multispectral pour cette étude :

- la première, le 3 décembre 1986, la seconde le 23 Avril 1987. Une seule image est exploitable, celle du mois d'Avril, la première, présentant un défaut lors de l'acquisition, a été renvoyée.

On dispose par ailleurs d'une image multispectrale Spot sur l'Aisne du 30 Avril 1986 et de l'image panchromatique voisine du 23 Avril 1988 sur l'Oise qui regroupe la zone étudiée dans le Soissonnais (Chelles) et des parcelles étudiées dans l'Aisne (Fère en Tardennois).

Cette dernière a été prise juste après une période de fortes pluies, certaines parcelles sont ressuyées, d'autres pas..les griffes et ravines d'érosion se marquent nettement.

Sur la région d'Orléans, deux scènes Spot multispectrales ont été prises le 1er Mai 1986 et le 30 Octobre 1986.

#### \*Les traitements effectués

Les traitements ont été effectués pour une partie au BRGM (Pays de Caux) et pour l'autre au centre INRA de Bioclimatologie de Grignon.

#### \*rappel

Quelques précisions sont nécessaires avant de comparer directement les données satellitaires aux données terrain.

il faut savoir que l'image que l'on visualise sur le Péricolor n'est pas superposable à une carte topographique de la région étudiée. Il y a souvent une légère déformation due aux angles de visée du capteur. Des corrections géométriques par points de calage peuvent être effectuées.



Les conditions d'éclairage et l'effet atmosphérique (aérosols) sont également à prendre en compte. Les caractéristiques purement techniques (calibrage des bandes spectrales) interviennent aussi sur la mesure.

Des modèles de correction ou recalage radiométrique existent (DINGUARD, 1986, TANRE et HERMAN, 1978)

Nous ne les avons pas utilisés ici, car la démarche est longue et relativement complexe. Ce qui signifie que pour la suite, on s'intéresse non pas aux valeurs absolues des mesures mais aux valeurs relatives, c'est à dire aux écarts entre les différents états.

L'image restituée sur écran est constituée de n pixels (256/256 pixels sur le péricolor 1000). Chaque pixel représente la surface élémentaire mesurée par le capteur (10m/10m pour les images panchromatiques, et 20/20m pour les images multispectrales, soit 1ha = 25 pixels). Les luminances mesurées par le capteur sont codées après traitements en niveaux numériques. A chaque niveau correspond une couleur que l'on peut visualiser sur l'écran. Des transformations de la dynamique des couleurs permettent d'augmenter les contrastes ou de seuiller les valeurs à un certain niveau.

Les traitements que nous avons effectués ont consisté essentiellement à des réarrangements en classes homogènes à partir du seuillage des histogrammes des trois canaux vert, rouge, proche infra-rouge, et à des classifications à partir des histogrammes bidimensionnels entre le rouge et le proche infra-rouge.

## **B. Observations et mesures de surface sur des parcelles agricoles (Pays de Caux, Soissonnais)**

### **1. Contraintes ou problèmes rencontrés**

Certaines parcelles n'ont pu être suivies complètement du stade F0 au stade F2 aussi bien en radiométrie que pour les mesures et observations de surface.

- les conditions climatiques ont été peu favorables (ciel couvert, humidité de surface importante) les réflectances correspondantes sont influencées trop fortement par les variations d'humidité, on ne détecte plus les variations de rugosité.

- certaines parcelles ont été retravaillées après le semis. Il y a eu interruption de l'évolution structurale, on est revenu au stade initial alors que la végétation a continué de croître. Le stade F2 a été atteint lorsque que le couvert végétal dépassait 30%, la végétation est alors trop dense pour effectuer des mesures radiométriques ou de mesures de rugosité caractérisant le sol.

## 2. Rôle des facteurs : topographie, pratiques culturales sur la vitesse de dégradation de la surface.

Les premières parcelles ont été semées le 1/04, il s'agit des parcelles de lin, les dernières sont celles de betteraves et de pomme de terre (24/04 et 07/05).

Les pratiques culturales sont différentes pour chacune des parcelles étudiées. Généralement, on compte deux ou trois passages avant le semis pour toutes ces cultures, et après le semis deux pour le lin, trois pour la betterave. L'état initial est souvent plus affiné pour le lin puis pour la betterave et enfin le maïs. Une enquête faite par des étudiants en 85 (GOETGHELUCK et al, 1985) montre que la surface couverte par les traces de roues est plus importante pour les parcelles maïs, betterave puis lin. Les emplacements des traces de roues sont des zones plus compactes où l'eau s'infiltré moins bien, l'excès d'eau s'y concentre et ruisselle s'il y a une pente, de ce fait certaines parcelles présentent des situations plus ou moins favorables au déclenchement de l'érosion. pl.2.photo.1

La rugosité de surface à l'état initial est donc variable. L'indice  $IR_1$  marque légèrement ces différences. Les variations d'indice de rugosité entre les transects parallèles et perpendiculaires au sens du travail du sol sont parfois supérieures aux variations inter-parcellaires. Tab.34.

Tab.34. Comparaison de l'indice  $IR_1$  pour différentes parcelles.

	$IR_1$	
	trans//	trans -
lin	1,24	1,25
betterave	1,17	1,26
pomme de terre	1,27	1,34
maïs	1,24	1,28

*trans//* : transect de rugosité orienté parallèlement au sens du travail.

*trans -* : transect de rugosité orienté perpendiculairement au sens du travail.

(les transects sont obtenus avec la méthode "spray" sur 1 m)

## 3. Les marques d'érosion observées sur le terrain

Le suivi de parcelles agricoles sur les différents sites retenus nous montre que plus le travail initial de la terre est affiné, plus la dégradation structurale de la surface est rapide. (vérification des résultats des expériences de Grignon). C'est le cas du lin, par exemple dans le Pays de Caux. Ici deux effets s'opposent :

1) le travail fin du sol qui favorise la désagrégation,



1



2



3



4



5

### Les différentes marques d'érosion observées sur le terrain

Photo.1. L'eau stagne plus longtemps à l'emplacement des traces de roues qui sont des zones plus compactées. (ex : champ de betterave dans le Pays de Caux)

Photo.2. Ravine d'érosion dans un champ de pomme de terre. La terre remuée par le labour est entraînée dans l'axe du talweg.(ex : Chelles dans l'Oise)

Photo.3. Croûte de battance. Dépôts clairs le long de l'axe du talweg. (ex: champ de pomme de terre dans l'Oise)

Photo.4. Griffes d'érosion et dépôts de limons fins clairs le long de l'axe de la griffe dans un champ semé en pois.(Pays de Caux).

Photo.5. Zone d'atterrissement limoneux, à la suite d'une rupture de pente. (à l'arrière plan, on



2) la densité importante du couvert végétal, due au semis serré, ainsi que sa grande vitesse de recouvrement qui entraîne un ralentissement de l'énergie cinétique des gouttes de pluies et par suite un ralentissement des phénomènes d'érosion.

La betterave ou le maïs sont à l'inverse, des cultures qui laissent une large part au sol nu pendant une période plus longue que le lin, la surface du sol est donc soumise plus longtemps à l'agressivité des pluies.

Durant notre période d'observation dans le Pays de Caux, (2 Avril 1987, 21 Mai 1987). Les marques d'érosion sur les deux bassins versants étudiés n'ont pas été spectaculaires. Un seul orage violent est survenu le 3 Mai peu de temps après les semis du lin, la surface de ces parcelles s'est partiellement dégradée et une croûte structurale continue s'est formée. Un certain nombre d'agriculteurs a été contraint de repasser sur le semis une crosskilette pour casser cette croûte, l'évolution structurale a donc été stoppée.

Les marques d'érosion observées sur le terrain résultent dans la plupart des cas du ruissellement des systèmes imperméables environnants. En effet, les parcelles voisines cultivées en céréales d'hiver et situées plus haut topographiquement présentent une surface complètement fermée (phase F2) et bien que le recouvrement végétal soit important, l'eau ne s'infiltré plus à la surface et ruisselle sur les parcelles voisines situées plus bas, encore en sols nus. Il se crée alors des griffes, des ravines qui entaillent plus ou moins profondément les parcelles. Quelquefois seul le lit de semence est attaqué, parfois toute la couche du sol labourée est entaillée. Ces marques en creux empruntent généralement les axes des talwegs ou les emplacements des traces de roues. pl.2.photo.2.

Dans le Soissonnais, la topographie accentue ces phénomènes car la pente est plus forte, le ruissellement s'intensifie, les pertes en terre sont importantes. Dès qu'il y a obstacle au ruissellement (changement de rugosité..) photo.3. ou que la pente devient moins forte, il y a dépôt des particules fines transportées. De larges zones d'atterrissement peuvent se former (pl.2.photo.4), elles apparaissent très claires en surface. Ces dépôts sont parfois lités. (pl.2.photos.5.6.)

Les variations de texture des horizons de surface dans le bassin versant de Chelles (Soissonnais) entraînent des comportements physiques différents. On observe que le pourcentage d'argile de l'unité 2 (26% A) ralentit légèrement la désagrégation des mottes. Après 70 mm d'eau, ces différences s'estompent, et toutes

les surfaces présentent une croûte continue, qui est litée dans le cas des sols linomeux (unité 1)

#### 4. Les mesures radiométriques

##### 4.1 Variations entraînées par les pratiques culturales au stade F0

La distribution des 30 mesures pour un transect quelconque est relativement homogène quelle que soit son orientation (les coefficients de variation sont généralement inférieurs à 10%). La dispersion est légèrement plus importante dans le pIR et pour les transects perpendiculaires au sens du travail.

Les pratiques culturales variées entraînent en effet, dès le stade initial, des rugosités différentes.

- un effet directionnel marqué pour certaines cultures (exemple de la pomme de terre) implique des variations d'ombre et de rugosité plus ou moins importantes suivant les positions relatives du soleil et du capteur.

- en effet pour les transects perpendiculaires, tantôt les mesures sont prises sur des inter-rangs (zones en dépression plus ombrées) tantôt sur les rangs de semis plus éclairés, les transects parallèles au sens du travail présentent moins d'hétérogénéités.

Cet effet de rang prend plus ou moins d'importance suivant la culture considérée et se traduit par des variations de réflectance qui sont plus marquées pour la pomme de terre où la structure en billons entraîne des variations d'ombre importantes. Les variations les plus faibles sont pour le lin. Ces différences de réflectance dues à cet effet de rang diminuent au cours de la dégradation, lorsque que la surface est moins rugueuse. Tab.35.

Tab. 35. Variation de la réflectance ( $dx$ ) pour les 3 bandes spectrales pour différentes parcelles.

	dxs1	dxs2	dxs3
lin	0,5	1,2	1,9
betterave	1,1	1,5	2,3
pomme de terre	1,5	3	5
maïs	0,5	1,5	2,3

les mesures sont prises dans le sens perpendiculaire du travail  
1, 2, 3 : v, r, pIR

##### 4.2. Variations dues à la topographie

A ces variations de réflectance dues aux effets directionnels s'ajoutent celles dues aux effets de pente. Le schéma proposé par ESCADAFAL (1989) permet de

mieux comprendre leur intervention sur les mesures radiométriques. Suivant la position du soleil et l'orientation de la pente, les surfaces à l'ombre varient et par suite la réflectance est modifiée, toutes choses étant égales par ailleurs (angle solaire, angle de visée du radiomètre..). Fig.68.

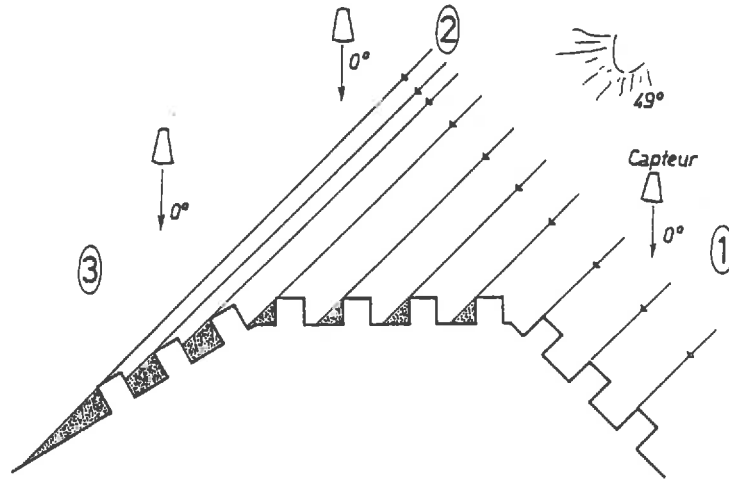


Fig.68. Effets de la pente sur la réflectance bidirectionnelle de surfaces rugueuses. (d'après Escadafal, 1989)

Ces situations sont comparables à celle d'Avignon, où les angles solaires et de visée du radiomètre ont varié, mais ici, c'est un phénomène progressif qui s'observe lorsque l'on se déplace dans l'espace.

Cet effet de pente a été observé dans le Soissonnais lorsque l'on a effectué des mesures sur des parcelles où la pente variait de 0 à 3% pour une élévation de l'angle solaire de 49°. Les variations du coefficient d'ombrage sont faibles à 14h pour une visée verticale du radiomètre. La réflectance varie de 1 à 2% du sommet au bas de pente. Tab.36.

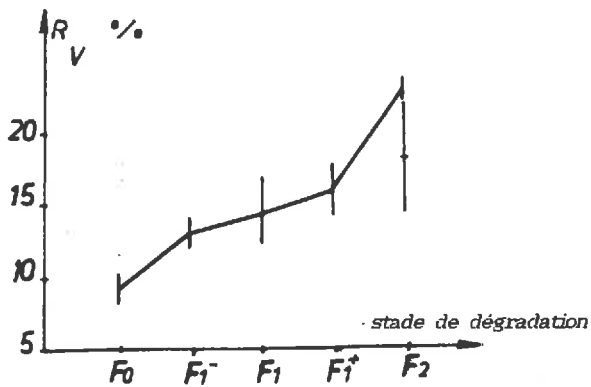
Tab. 36. Variation de la réflectance ( $x_s$ ) dans les 3 bandes spectrales suivant les 3 situations topographiques de la Fig.67.

	$C_o$	$x_{s1}$	$x_{s2}$	$x_{s3}$
Situation 1	0,2	8,4	10,7	15,8
Situation 2	0,22	7,9	9,7	14,2
Situation 3	0,24	7,5	9,5	13,1

*coefficient d'ombrage calculé à 14 h pour un angle de visée de 0°.*

#### 4.3. Evolution des parcelles dans le temps, suivi par la réflectance

Au stade F0, pour une même parcelle, les variations entraînées par les effets directionnels ou de pente sont faibles sur la réflectance (<2%) et inférieures aux variations entre les différents stades F0 et F2 (>10%). Fig.69.



chaque point représente la réflectance moyenne de 30 mesures radiométriques prises à 1m du sol suivant une direction perpendiculaire au sens du travail  
 F1-, F1+: parcelle traitée avec un conditionneur

Fig.69. Variation de la réflectance des phases F0 à F2 pour une parcelle semée en betterave sur plateau limoneux.

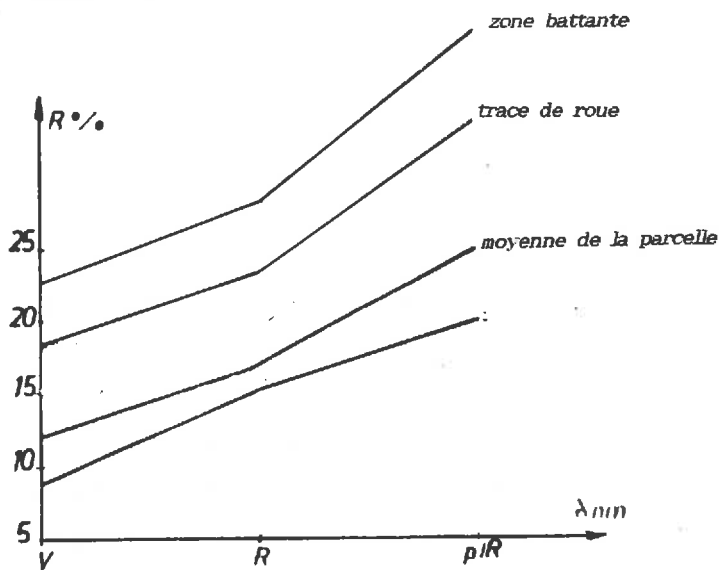


Fig.70 . Réflectances de quelques états de surface rencontrés sur les parcelles agricoles .

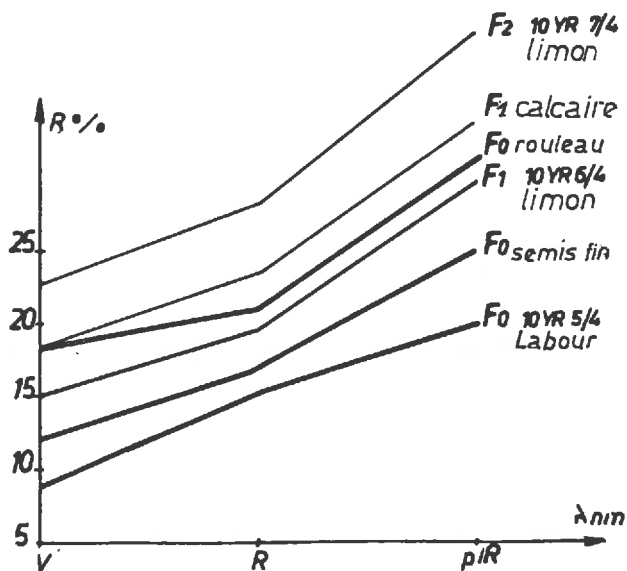


Fig.71. Variation des réflectances de parcelles agricoles suivant les pratiques culturales et le type de sol à différents stades structuraux.

La radiométrie permet de distinguer les variations de dégradation provoquées par l'apport d'un conditionneur, les zones d'atterrissement très claires des zones de concentrations des eaux, les traces de roues (rigoles..) du reste de la parcelle.Fig.70.

Par contre lorsque les parcelles sont différentes

- d'un point de vue travail du sol initial (labour, hersage, rouleau..)
- d'un point de vue pédologique (surface calcaire caillouteuse, limoneuse ou sableuse..)

Il peut y avoir des confusion entre les différents stades, car la réflectance d'une parcelle calcaire au stade F0 présente les mêmes valeurs qu'une parcelle limoneuse battante, la surface de ces deux parcelles est très claires.Fig.71.

On verra dans la partie B comment différencier ces divers états de surface.

## 5. Corrélation avec les images Spot

### 5.1. Etude canal par canal

On sélectionne sur l'image, des parcelles sur lesquelles des mesures radiométriques ont été prises simultanément avec le passage du satellite Spot. L'histogramme des valeurs est examiné pour chaque bande spectrale (moyenne,dispersion..). Cela nécessite que les parcelles soient choisies suffisamment homogènes ou que les différents états de surface répertoriés soient identifiables sur l'image.

Les luminances les plus élevées correspondent aux zones battantes (F2) et ou aux zones calcaires (F0, F1,F2), les luminances les plus faibles aux zones les plus humides, ou rugueuses.Pl.3.photo. 1.

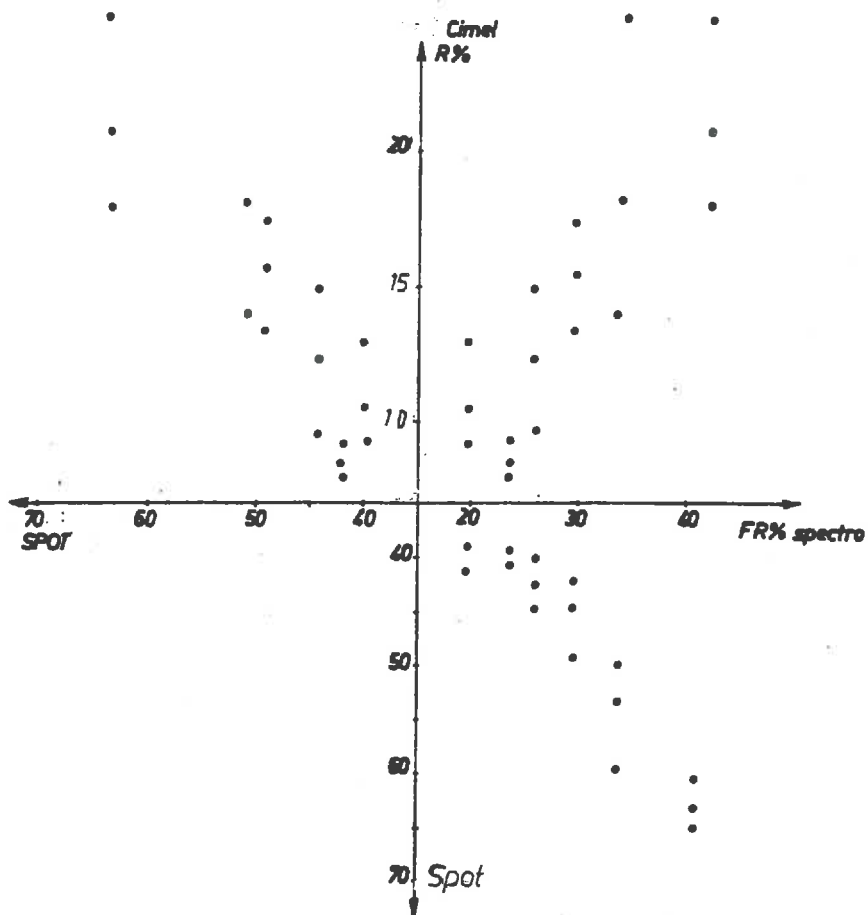
Il y a une bonne corrélation entre les mesures radiométriques et les niveaux relevés sur l'image. Ces corrélations sont vérifiées pour les différents niveaux d'investigation du sol (spectrophotomètre, radiomètre et spot) sur les états de surface variés (calcaire, sableux, limoneux..) sur une parcelle hétérogène (Orléans).(COURAULT et al, 1988<sub>1</sub>) Fig.72.

### 5.2. Combinaison de deux canaux, Les droites des sols.

En croisant à présent les informations obtenues à partir de deux bandes spectrales, on effectue un histogramme bidimensionnel de l'image, la combinaison la plus utilisée



niveau numérique relevé sur les images Spot sur Péricolor dans le pIR  
réflectance pIR% mesuré avec le radiomètre  
facteur de réflectance mesuré avec le spectrophotomètre (Fr.% à 750 nm)



Les différentes mesures ont été prises sur les mêmes états de surface sur une parcelle hétérogène, exemple d'Orléans.

Fig.72. Corrélation entre les différents niveaux d'investigation en télédétection. (spectrophotométrie, radiométrie, imagerie satellitaire).

est le rapport  $R/pIR$  qui différencie les sols de la végétation. (KAUTH et THOMAS, 1976, HUETE et al, 1984, CALOZ et al, 1988)

En effet les sols s'organisent suivant un faisceau de droites, la plus grande variabilité se fait en fonction de la couleur ou plus exactement de la clarté qui conditionne l'amplitude de ce faisceau. Les dispersions des points à l'intérieur de ce faisceau sont dues à la pureté.

Cette variabilité en fonction de la couleur peut s'expliquer si l'on reprend les graphiques.72.a et b qui relient les coordonnées colorimétriques R et G (ou B) à la couleur Munsell. La teinte varie peu suivant ces deux axes, par contre la clarté et la pureté varient dans deux directions opposées. Le diagramme (B, R) montre une plus grande dispersion pour les puretés. Fig.73.b.

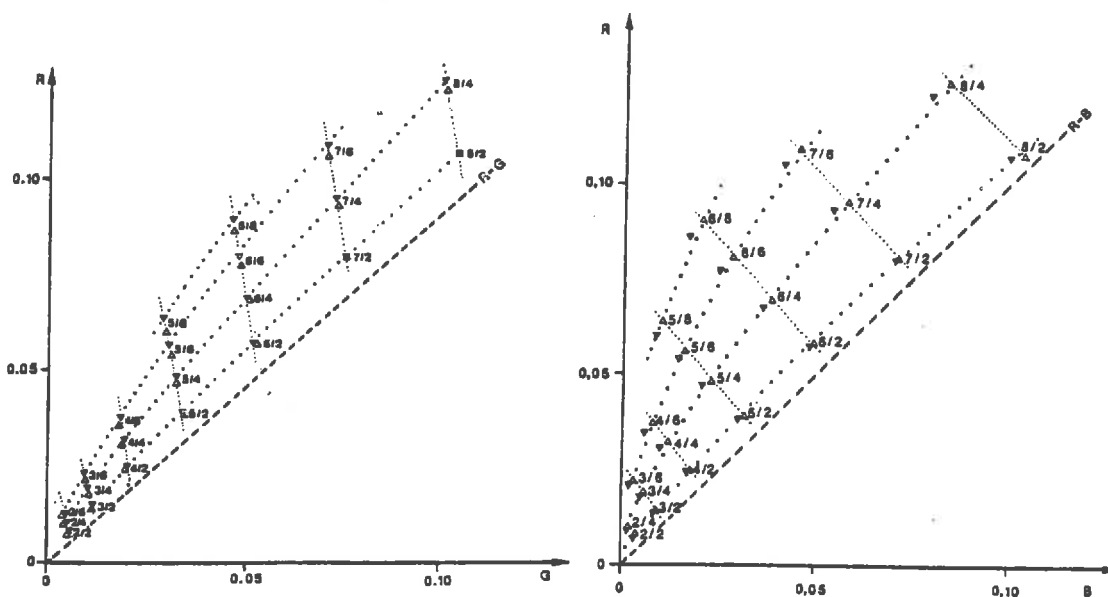
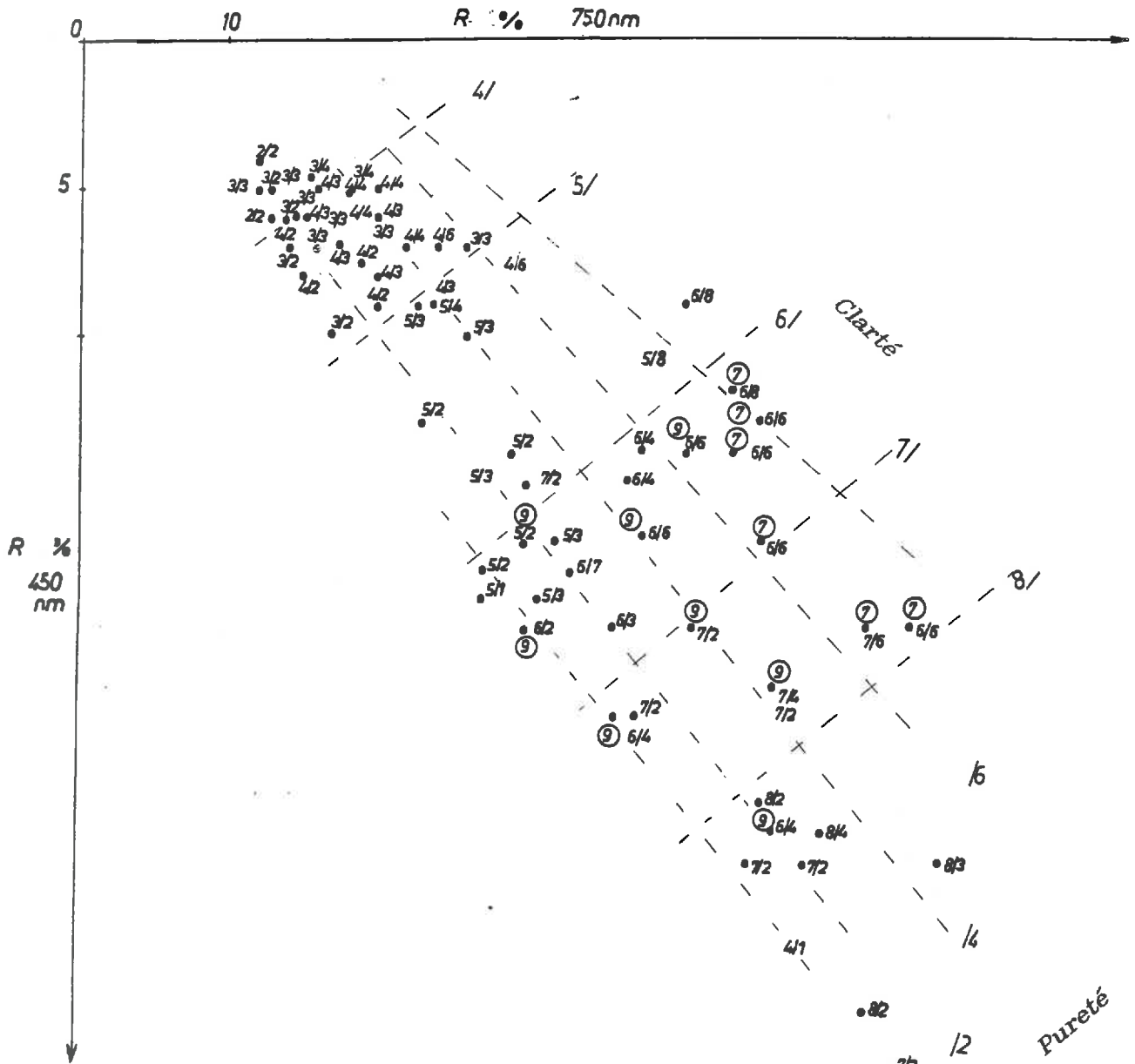


Fig.73. Projection des couleurs Munsell de deux teintes (● 5YR et ○ 7,5YR) sur le plan RG (a) et RB (b) de l'espace CIE (Escadafal, 1989).

ESCADAFAL (1989) a montré les corrélations entre les coefficients RGB et les réflectances dans le visible. Par suite, on comprend mieux la répartition des points sur les droites des sols.

Ces relations ont été vérifiées à partir de nos diverses expérimentations à différents niveaux, au laboratoire ou sur le terrain, où certains paramètres varient préférentiellement.



Les échantillons sont séchés à l'air et tamisés.

(tous les points non entourés se trouvent sur la planche de teinte 10YR, les autres correspondent aux codes suivants 7: 7.5 YR, 9: 2.5 Y )

2/, 4/, 6/...: clarté Munsell

/2/, /3/, /4...: pureté Munsell

Fig.74 . Distribution des 84 échantillons de sols et de leur couleur dans le plan des réflectances à 450 nm et à 750 nm.

*a. Résultats obtenus au laboratoire*

a.1. Variation des rapports de réflectance et corrélation avec la clarté

Les rapports suivants ont été étudiés : 650/750, 550/750, 450/750, 450/550 nm, sur les 84 échantillons, pris à l'état sec (pF6), afin d'observer quel est le rapport qui discrimine le mieux les sols suivant leurs principales caractéristiques (couleur,..). Ces rapports ont été choisis car les longueurs d'onde se rapprochent des valeurs moyennes des bandes spectrales de Spot ou des longueurs d'ondes associées aux coefficients colorimétriques. Tab.37.

Tab. 37. Valeurs des coefficients de corrélation pour les différents rapports de réflectance.

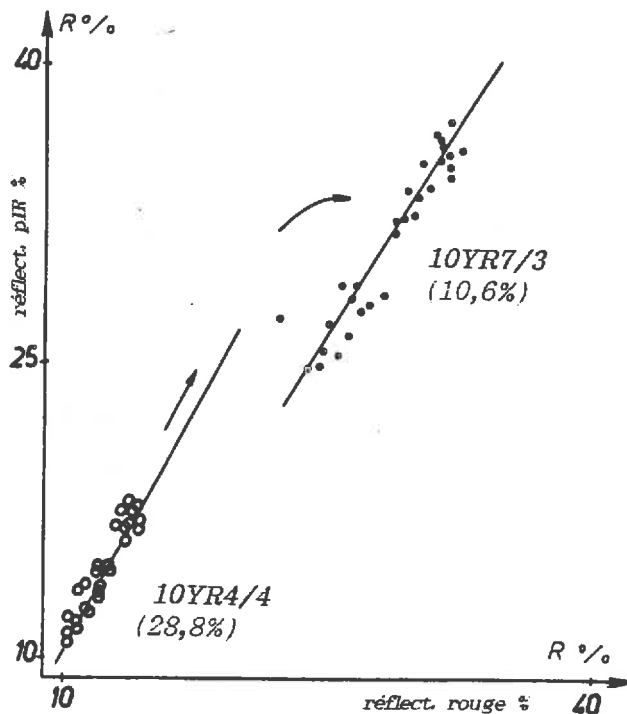
rappports	r
réfl. 450 / 550	0,96
réfl. 450 / 750	0,88
réfl. 550 / 750	0,94
réfl. 650 / 750	0,94

La dispersion est la plus forte pour le rapport 450/750. (ESCADAFAL, 1989). On observe les mêmes répartitions des points que sur les figures 73 a et b, les sols s'alignent suivant leur couleur (Fig.74.), des clartés croissantes perpendiculairement à la diagonale et des puretés croissantes parallèlement à cette même droite. La teinte varie peu sur nos échantillons.

a.2. Variation du rapport de réflectances 450/750nm en fonction de l'humidité:(pF1, pF6)

Lors du passage des échantillons humides à secs, il y a une translation des réflectances le long de l'axe de la droite des sols, les échantillons deviennent plus clairs, on observe en plus de cette translation une légère rotation par rapport à cet axe, vers des puretés plus faibles. Fig.75. Ceci confirme les observations faites à propos des relations entre la couleur et l'humidité (chap.2, Fig.33.), à savoir que lorsque l'on hydrate un échantillon de sol, la clarté est le paramètre le plus modifié, mais la pureté change également, les valeurs diminuent, il y a souvent plus de valeurs de l'ordre de 2.

La composition intervient également sur ces transferts de points, les échantillons organiques (2,59) varient peu, à l'inverse les échantillons argileux clairs (12,33) subissent des déplacements plus importants.

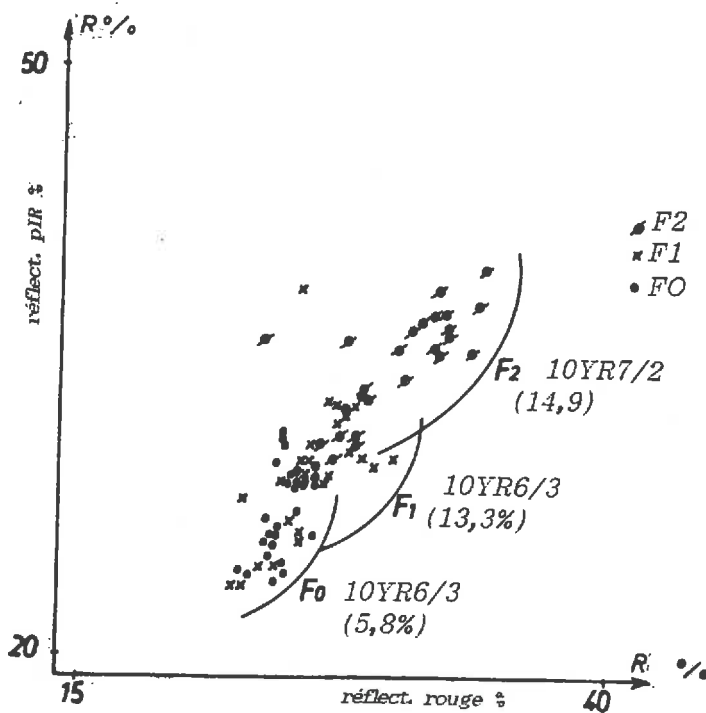


On considère les réflectances mesurées avec le radiomètre à 1m du sol sur la même surface F1+ états ressuyés, et humides) à 14h.

(i%) humidité volumique moyenne de la surface

- état humide :  $Réf_{(pIR)} = 1,64 * Réf_{(R)} - 56,58$   $r = 0,98$
- état ressuyé :  $Réf_{(pIR)} = 1,33 * Réf_{(R)} - 65,38$   $r = 0,94$

Fig.76. Variation des réflectances dans le plan R/pIR en fonction de l'humidité.



- F0:  $Réf_{(pIR)} = 1,46 * Réf_{(R)} - 89,45$   $r = 0,54$
- F1:  $Réf_{(pIR)} = 1,02 * Réf_{(R)} + 24,79$   $r = 0,57$
- F2:  $Réf_{(pIR)} = 0,84 * Réf_{(R)} + 0,93$   $r = 0,77$

Fig.78. Variation des réflectances dans le plan R/pIR en fonction de la rugosité à 14h sur des états ressuyés.

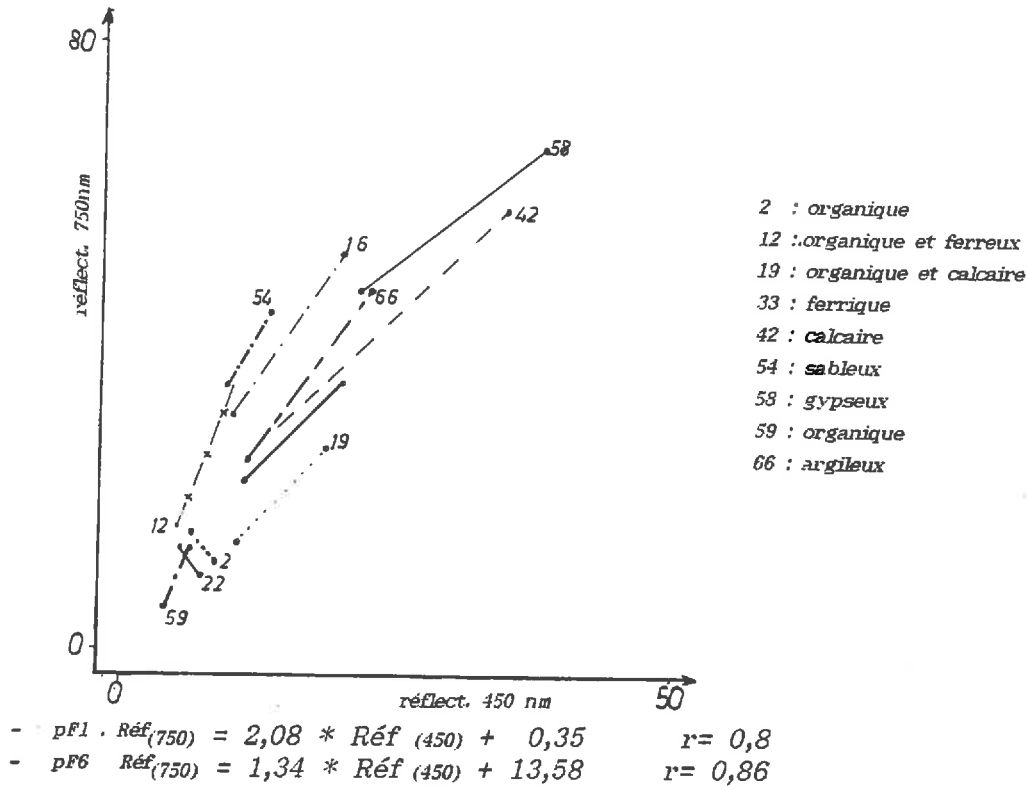


Fig.75. Variation des réflectances à 450 nm et à 750nm en fonction de l'humidité à différents pF.

**b.Résultats obtenus sur le terrain**

Des résultats semblables sont obtenus à partir des mesures radiométriques effectuées sur la parcelle d'Avignon.

Le rapport R/ pIR est obtenu à partir des réflectances mesurées avec le Cimel à 1m ou 19m de la surface du sol (soit 30 mesures pour un état de rugosité donné)

**b.1. Variation du rapport R/pIR en fonction de l'humidité (pour un même état de rugosité)**

On observe un décalage très net entre les mesures faites sur une surface ressuyée et celles faites sur la même surface humide. De même que pour les observations faites au laboratoire, il y a une translation des réflectances suivant l'axe de la droite suivie d'une rotation vers l'axe du rouge lors de l'assèchement du sol. La dispersion des points pour les états humides est plus faible que pour les états ressuyés, en effet tout est sombre, les variations de clarté sont moins importantes. Ceci est vrai quel que soit le stade de rugosité.Fig.76.

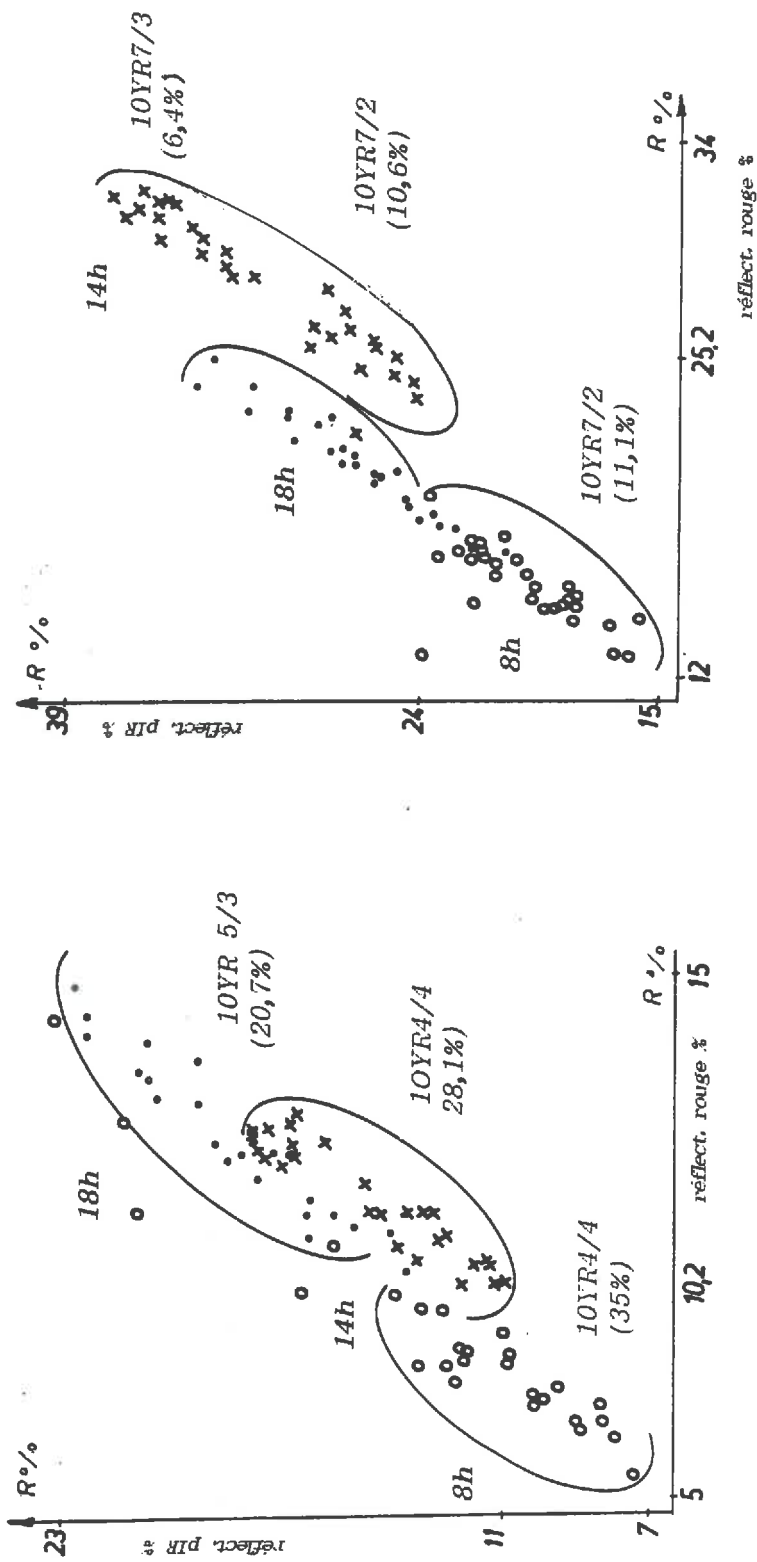


Fig.77. Variation du rapport R/pIR en fonction de la hauteur du soleil sur des états humides a) et ressuyés b) pour un même état de rugosité, F1+.

**Etats humides**

8h : Réf(pIR) = 1,58 \* Réf(R) - 17,95 r = 0,96  
 14h : Réf(pIR) = 1,64 \* Réf(R) - 56,58 r = 0,98  
 18h : Réf(pIR) = 1,23 \* Réf(R) + 10,63 r = 0,94

**Etats ressuyés**

8h : Réf(pIR) = 1,01 \* Réf(R) + 42,58 r = 0,67  
 14h : Réf(pIR) = 1,33 \* Réf(R) - 65,38 r = 0,94  
 18h : Réf(pIR) = 1,4 \* Réf(R) - 25,8 r = 0,97

### b.2. Variation du rapport R/pIR en fonction de la hauteur du soleil (pour un même état de rugosité)

Suivant l'état d'humidité, les réflectances augmentent parallèlement le long des droites des sols, de 8h à 18h pour les états humides et de 8H, 18h et 14h pour les états ressuyés. (léger décalage pour les mesures à 14h) Fig.77.

L'humidité semble plus importante dans ce cas que l'effet du rayonnement solaire incident.

### b.3. Variation du rapport R/pIR en fonction de la rugosité

Le facteur rugosité semble moins évident à différencier que l'humidité sur la droite des sols. En effet les réflectances des différents stades de rugosité observés s'entrecroisent. Cependant les principaux ensembles peuvent se distinguer. Ils s'ordonnent le long des droites des sols, des rugosités les plus fortes aux plus faibles. Fig.78. La rugosité et la couleur semblent dominer sur l'humidité pour expliquer la répartition des points.

En supposant les distributions normales et en considérant la moyenne, cette différenciation est plus nette.

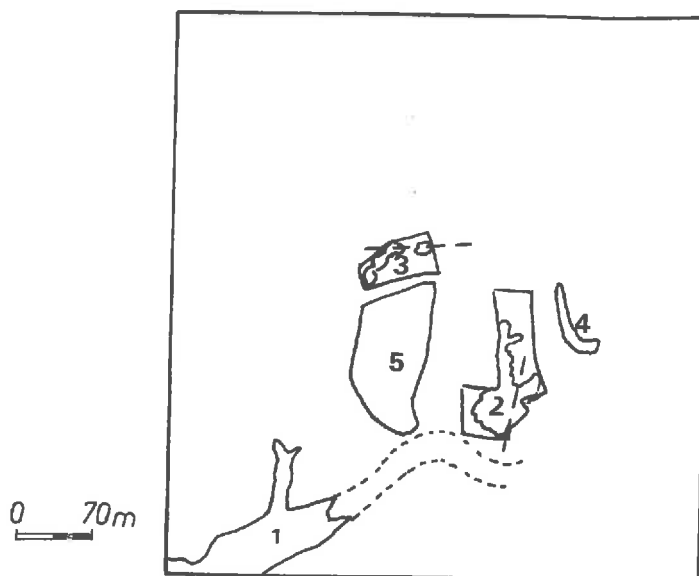
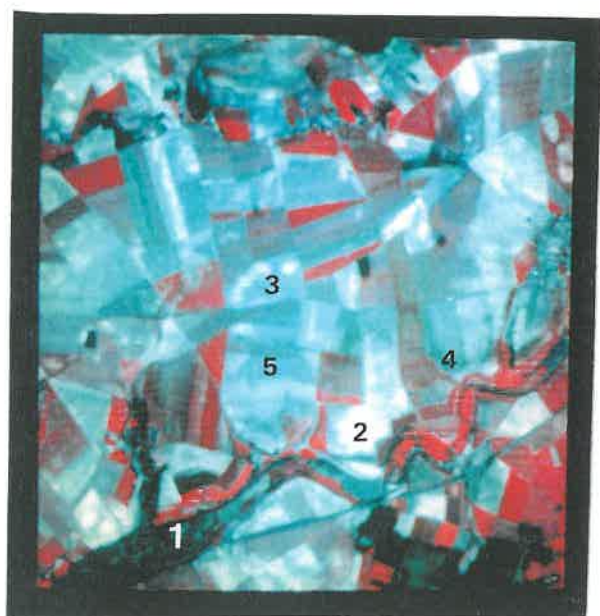
## Conclusion

Ce travail a montré que la combinaison des réflectances entre deux bandes spectrales ne regroupe pas les sols suivant une seule droite, mais qu'il existe au contraire un faisceau de droites, plus dispersé dans le cas du rapport de réflectances 450/750 nm (B/R) et qui s'explique essentiellement par la variabilité de la couleur des sols.

Cette répartition des points suivant leurs clartés et puretés Munsell a été vérifiée à la fois sur des échantillons mesurés au laboratoire et sur le terrain par des mesures radiométriques. On a observé également l'effet de l'humidité, de la hauteur angulaire solaire et de la rugosité sur la distribution de ces points. Les principales modifications sont des translations le long de l'axe du faisceau et des rotations près l'axe du rouge.

Ces diverses relations permettent de mieux utiliser les histogrammes bidimensionnels obtenus à partir des images Spot et d'effectuer des partitions ayant une signification physique. (fonction de la clarté, de l'humidité..)

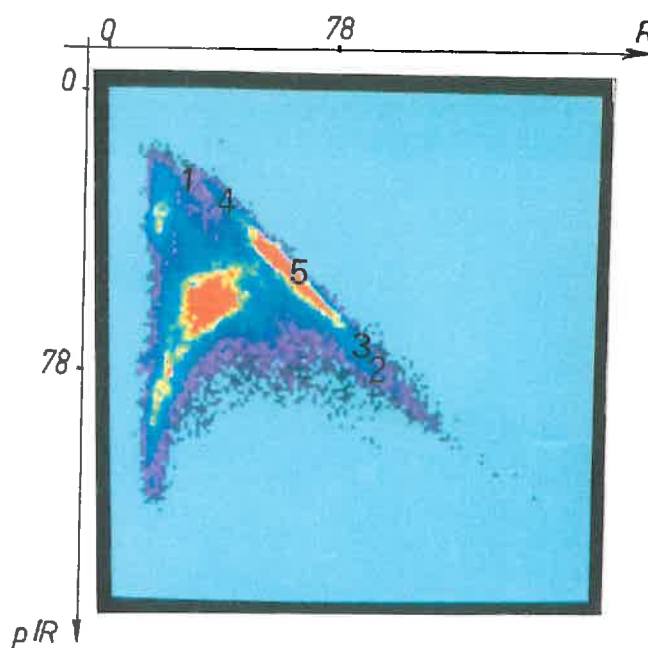
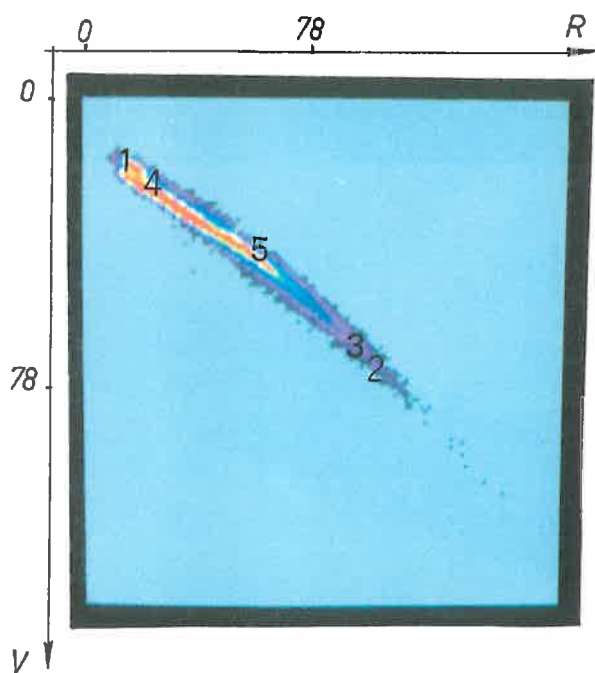




Composition colorée du secteur de Fère en Tardennois (Aisne) obtenue à partir de l'image Spot du 23 Avril 1986.

Les zones marquées sont celles étudiées plus particulièrement sur l'histogramme bidimensionnel, elles se différencient par leur état de surface :

- 1: zone marécageuse, hydromorphe et organique
- 2: zone limoneuse battante (sols limoneux profonds sur plateaux)
- 3: zone calcaire (sols peu épais sur substrat calcaire)
- 4: zone argileuse humide (sols limono-argileux de pente)
- 5: zone limoneuse non battante



Histogrammes bidimensionnels entre les canaux Vert et Rouge (a) et entre les canaux Rouge et proche infra-rouge (b), de l'image entière de l'Aisne du 23 Avril 1986 et localisation des zones étudiées

*c. Résultats obtenus sur les images satellitaires (secteurs d'Orléans, et de l'Aisne)*

Deux secteurs d'étude (5km/ 5km) ont été choisis pour illustrer ces résultats. Il s'agit de la zone de Bellegarde dans le Loiret au Nord Est d'Orléans sur laquelle on dispose de plusieurs images dont une au mois de Mai 1986 et de la zone de Fère en Tardennois dans l'Aisne au sud-est de Soissons (image du 26 Avril 1986).

Un certain nombre de sites tests sur lesquels on possède des informations de terrain (radiométrie et observations de surface) vont servir à tracer les droites des sols. Ces zones sont isolées sur l'image afin de calculer les paramètres statistiques correspondants. Les sites ont été choisis bien différents, argileux humides, limoneux non battants, limoneux battants, et calcaires. Pl.3.photo.3.

Les réflectances de ces diverses zones se distinguent bien sur la droite des sols, à part deux unités, les zones battantes et les zones calcaires qui se confondent, car elles sont toutes les deux très claires et très réfléchissantes dans le rouge et le proche infra-rouge.

Ces caractérisations basées uniquement sur le "contenu radiométrique" des zones étudiées ne sont pas suffisantes pour différencier ces états de surface. Il faut donc chercher d'autres méthodes d'analyses pour compléter ces études.

L'analyse diachronique des images peut être une première solution.

La battance étant un caractère conjoncturel, on peut espérer pouvoir différencier ces états de surface en comparant ces zones à deux dates différentes. On s'intéresse donc à l'analyse spatiale des états de surface et à leur évolution dans le temps.

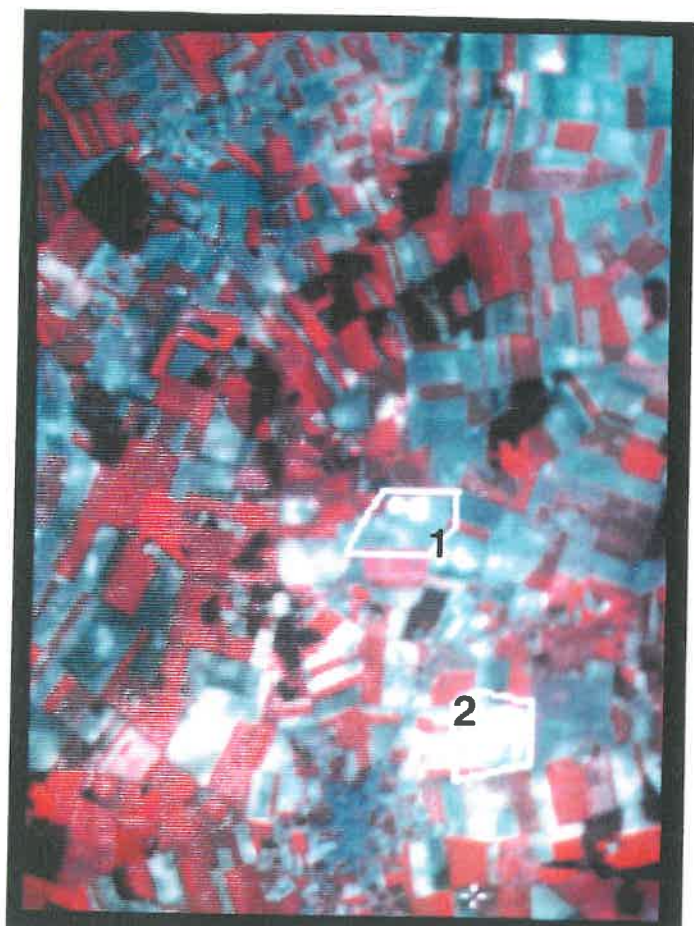
### **C. Analyse spatiale, évolution dans le temps et dans l'espace des états de surface**

#### **1. Etude diachronique**

Les deux secteurs étudiés sont comparés à deux dates différentes

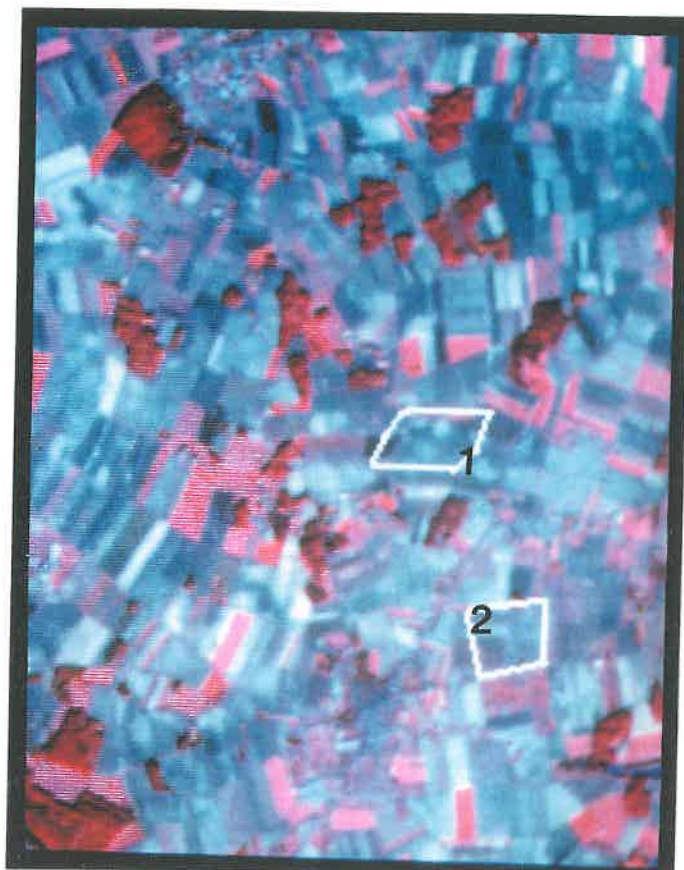
- pour la région d'Orléans, il y a deux images multispectrales Spot : le 1er Mai 1986 et le 30 octobre 1986
- pour la région de Fère, on dispose d'une image multispectrale du 23 Avril 1986 et d'une image panchromatique du 30 Avril 1988.





(a) du 1er Mai 1986

0 70m



(b) du 30 Octobre 1986,

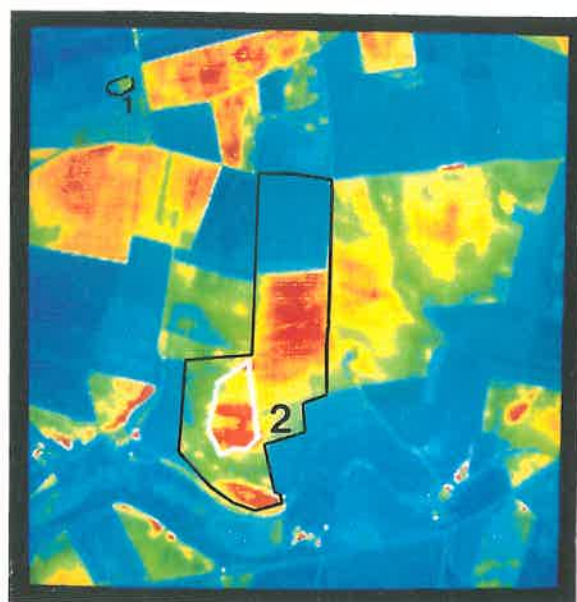
Compositions colorées des images Spot : (a) du 1er Mai 1986 et (b) du 30 Octobre 1986, du secteur de "la Thibaudière" près d'Orléans.

parcelle 1: parcelle caillouteuse calcaire, parcelle 2 : parcelle limoneuse battante



Agrandissement du secteur de Fère en Tardennois à partir de l'image Spot du 23 Avril 1986 dans le canal infra-rouge. (bande spectrale:0.79-0.9  $\mu\text{m}$ , résolution: 20m)

70m



Agrandissement du secteur de Fère en Tardennois à partir de l'image panchromatique Spot du 30 Avril 1988. (bande spectrale : 0.5-0.7  $\mu\text{m}$ , résolution: 10m)

0 36m

Pour le premier secteur (Orléans), les deux unités calcaires et battantes se différencient bien, les deux images ayant été prises à des saisons contrastées (printemps, automne), les taches calcaires sont relativement stables dans le temps et gardent toujours des réflectances élevées, alors que les zones battantes ont disparu. La parcelle en octobre a été labourée, elle se trouve en phase F0, la réflectance est faible. Pl.4.photos.1.2

Pour le second secteur (Fère) les deux images ont été prises à la même saison, le phénomène de battance se retrouve d'une année sur l'autre sur la même parcelle. Quelques caractères ont cependant changé, certaines parcelles en sols nus en 86 sont cultivées en céréales d'hiver en 88, par suite, le couvert végétal masque une partie des caractères de la surface du sol, c'est le cas de la parcelle calcaire. On peut discerner cependant les taches calcaires qui éclaircissent légèrement la parcelle déjà levée. La zone limoneuse battante a changé de forme, mais conserve des réflectances élevées semblables à la réflectance des zones calcaires. On retrouve une zone claire, mais d'intensité variable, très hétérogène. Pl.4.photos.3.4.

Ces dernières remarques nous amènent à nous intéresser à la forme de ces états de surface.

On s'intéresse à l'organisation dans l'espace des états de surface, et ceci à deux niveaux d'investigation :

- sur le terrain à partir de photographies numérisées
- sur les images Spot

## 2. ANALYSE SPATIALE DES ETATS DE SURFACE

De l'observation des images satellitaires et des remarques précédentes concernant l'étude diachronique, il ressort que certains paramètres peuvent être confondus comme la battance et le calcaire. Les luminances élevées correspondent aussi bien aux zones lisses et claires (F2) qu' à des zones caillouteuses calcaires (F0, F1). De même, certains facteurs comme l'humidité sont quelquefois dominants sur la rugosité, ou du moins, atténuent fortement son effet d'où des confusions entre des surfaces humides peu rugueuses et des surfaces plus sèches mais rugueuses.

L'analyse diachronique d'images peut permettre dans certains cas de différencier ces états (exemple d'Orléans), mais parfois, les mêmes phénomènes se retrouvent sur deux images prises à des dates différentes (exemple de Fère). Il apparaît donc

nécessaire de compléter cette étude par l'analyse spatiale des états de surface, ce qui conduit à s'intéresser à l'analyse des formes et à l'hétérogénéité de ces unités.

L'approche présentée est basée sur les méthodes développées par ROGALA (1982) et MOMAL (1988). Elle prend en compte les limites des unités définies, leur extension spatiale (**contenant**) afin de compléter l'analyse concernant les caractéristiques propres de ces différentes zones (**contenu**).

Les mêmes traitements sont fait sur Péricolor sur les images Spot et sur les photographies numérisées des états de surface.

Des traitements automatiques spécifiques aux traitement d'images existent pour caractériser les différentes formes rencontrées sur l'image, isoler des zones homogènes... Ces traitements s'appliquent généralement sur des images binarisées (chaque niveau numérique est codé entre 0 ou 1 sur 1bit). Différentes techniques (érosion, dilatation, filtre de Sobel, Laplacien..) peuvent être utilisées pour augmenter les contrastes entre les diverse unités, extraire les contours..Le principe consiste dans la plupart des cas à balayer l'image avec une fenêtre constituée de 3 pixels sur 3 et à affecter au pixel central une valeur en fonction des pixels voisins, pondérés chacun par des coefficient variables. (ROGALA, 1982, MERING et DEBAINE, 1988, COSTERS et CHERMANT, 1985)

Ne disposant pas de ces possibilités sur le matériel utilisé, nous présentons juste quelques approches effectuées "manuellement" sur des petites zones des images étudiées.

### **2.1. Perception des limites. Notions de contrastes et d'hétérogénéités**

Lorsque l'on observe les plages calcaires et battantes, on note une première différence quant à la perception des limites.

En effet, le contraste des plages calcaires vis à vis des plages voisines est important, quelle que soit la bande spectrale considérée. Les limites sont faciles à placer, alors que pour les plages battantes, il y a un passage progressif, les contours sont mal définis, les plages sont hétérogènes. Cette notion de contraste peut être illustrée lorsque l'on compare deux transects traversant de part et d'autre ces unités. Fig.79.



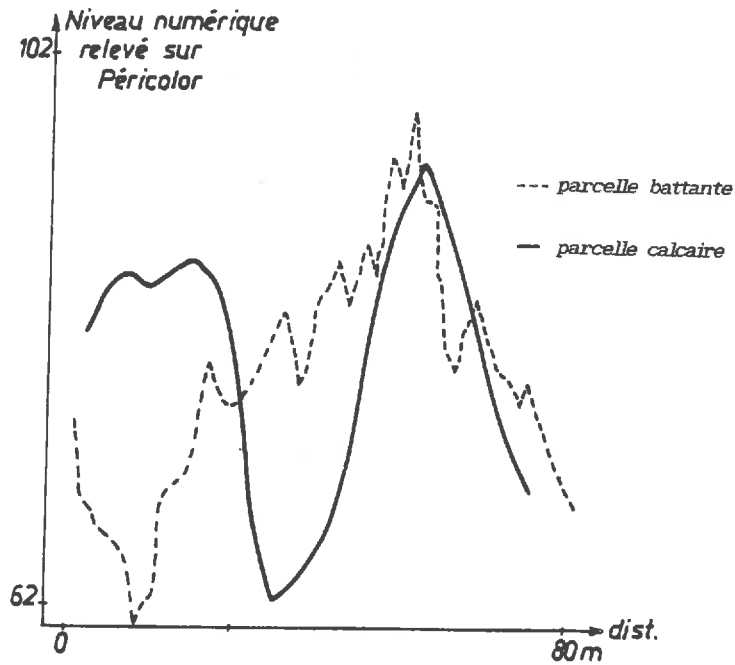


Fig.79. Comparaison des transects des parcelles calcaires et battantes à partir de l'image Spot (exemple de la zone de Fère, avril 86, cf pl.3)

\*Sur les photographies numérisées, on rencontre le même problème pour limiter la surface des croûtes structurales.

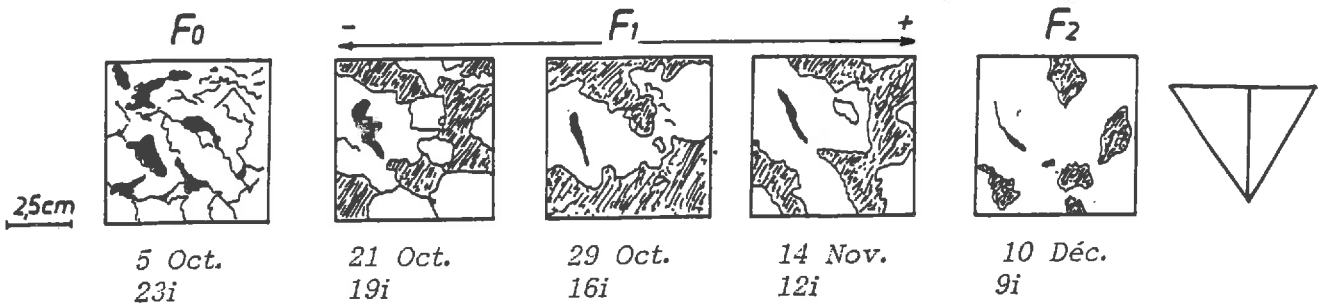
Pour placer une limite, il faut se fixer des seuils : par exemple lorsqu'il y a une différence de plus de 3 niveaux numériques entre deux pixels voisins, ou suivant l'intensité et le contraste du grisé..

Des unités peuvent être ainsi définies.

### Notion d'hétérogénéité

Différents ensembles sont isolés, parfois cependant, les limites ne sont pas fermées. Par exemple, si la limite choisie est de la largeur d'un pixel (ex : cas des sols fissurés).

Pour quantifier cette hétérogénéité, une première approche consiste à compter le nombre d'intersections entre les limites d'une zone de l'image et 4 segments de droite disposés en forme de triangle (ROGALA, 1982). Cette disposition est faite de façon à ne pas privilégier d'orientation préférentielle. On compare ce nombre pour les différents stades de dégradation du sol. Plus le sol devient lisse (F2), plus il est homogène et plus ce nombre diminue. Fig.80.



(Détail d'une photo prise à 1m verticalement à la surface du sol).

$x_i$  : nombre d'intersection des limites des unités définies sur la photo avec les lignes du triangle.

Fig.80. Evolution des formes à la surface d'une placette.

Une autre approche consiste à considérer une fenêtre de  $n$  pixels sur  $n$ , dont la taille est variable. On compte le nombre de pixels de même niveau (ou appartenant à la même classe) ou le nombre de limites à l'intérieur de cette fenêtre, et ce nombre est relié à la taille de la fenêtre. Fig.81.

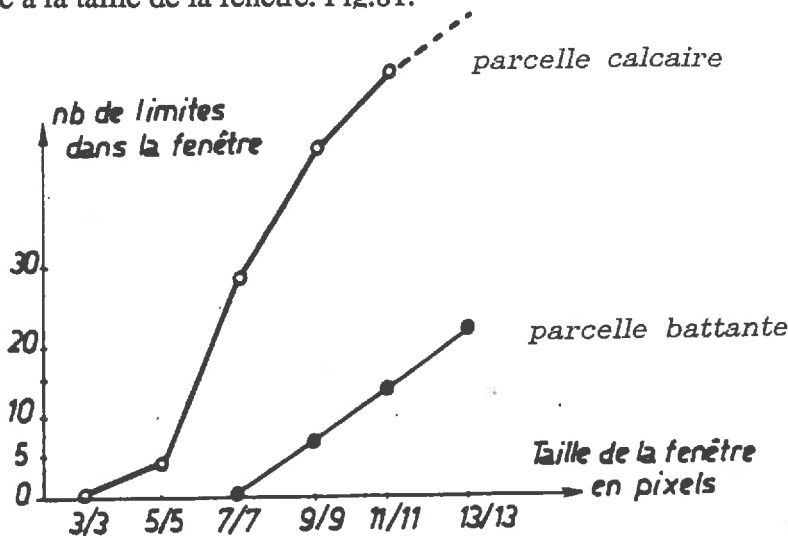


Fig.81. Comparaison de l'hétérogénéité à l'intérieur d'une fenêtre de taille variable des parcelles calcaires et battantes. (Exemple d'Orléans, mai 86)

Le nombre de limites des plages calcaires augmente rapidement avec la taille de la fenêtre. Ces unités sont en effet généralement petites bien contractées par rapport à leur entourage. Par contre les plages battantes sont plus larges et étendues, le passage à d'autres unités est progressif.

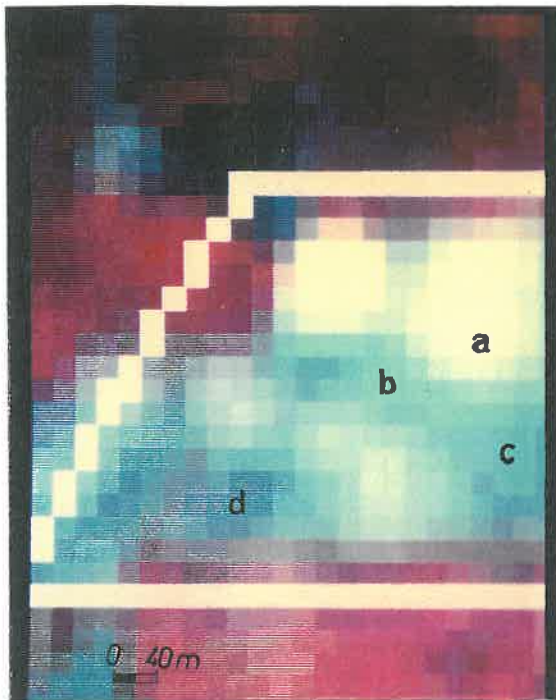
## 2.2. Quantification des formes

Les plages étant délimitées, il est possible de les caractériser par des paramètres quantitatifs exprimant les variations de formes de ces unités. Ceci fait appel aux traitements de morphologie mathématique.

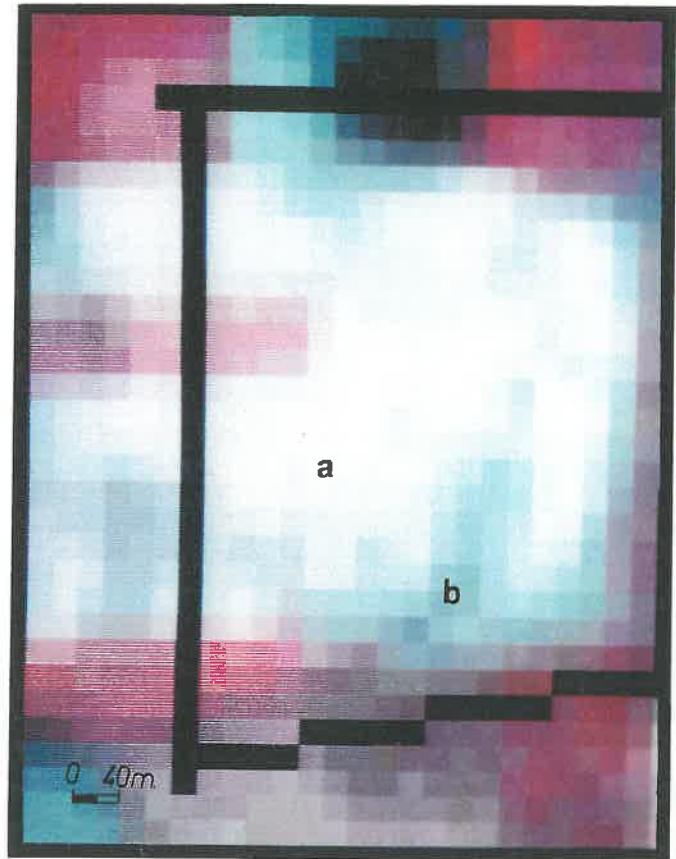
Différents paramètres sont ainsi proposés (Diamètre de Feret, élongation, enroulement..)

# ANALYSE DES FORMES DES UNITES DEFINIES SUR LES IMAGES SPOT

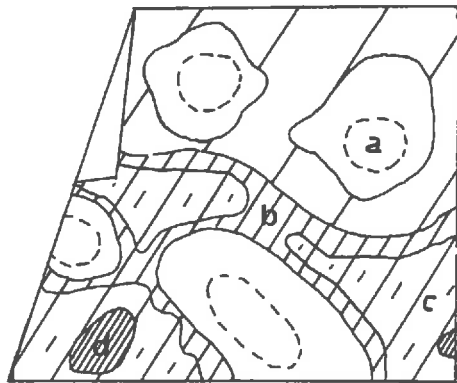
PL.5



Agrandissement de la parcelle calcaire à partir de la composition colorée de l'image Spot du 1er Mai 1986.(8ha)

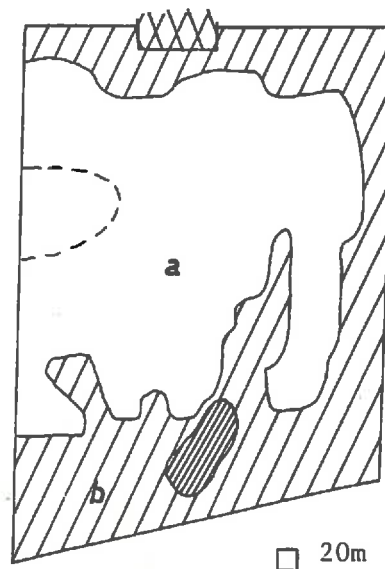


Agrandissement de la parcelle limono-sableuse à partir de la composition colorée de l'image Spot du 1er Mai 1986.(9ha)



Délimitation des différentes unités sur la parcelle calcaire

- a: sols caillouteux calcaires peu épais
- b: sols argilo-calcaires de pente
- c: colluvions sableuses humides
- d: zones hydromorphes



Délimitation des différentes unités sur la parcelle limono-sableuse

- a: glaçage limono-sableux, surface lisse
- b: zones argilo-sableuses humides



L'approche la plus simple est celle qui considère la surface et le périmètre de ces plages. (GIRARD et GIRARD, 1989).

Ces deux paramètres sont calculés en considérant que :

- la surface  $S$  correspond au nombre de pixels de la plage
- le périmètre  $P$ , au nombre de côtés de pixels assemblés aux nombres de côtés de part et d'autre duquel il n'y a pas la même plage. (FEENY, 1988).

Suivant l'image étudiée, le côté de pixel n'a pas la même dimension :

- pour les photos numérisées, un pixel 1.3 mm
- pour les images Spot un pixel 10m en panchromatique (PA), 20 m en multispectral (XS)

Ces paramètres sont calculés pour les plages calcaires d'Orléans et de Fère en Tardennois, aux différentes dates d'acquisition. (Fig.82). Sont situés également sur cette figure, les plages correspondant aux ravines d'érosion, zones de concentration des eaux de forme allongée (image panchromatique). La terminologie de V.FEENY.1988 a été conservée pour caractériser ces formes : compact, compact allongé, allongé.

Les plages calcaires apparaissent "compactes" souvent petites; elles se distinguent nettement des plages battantes de formes "digitées ou compactes allongées" de taille moyenne. Pl.6.phot.3.

Les rigoles se situent dans les formes "allongées" de grande taille et plus proches des zones battantes. Plan.phot.10. et Fig.82.

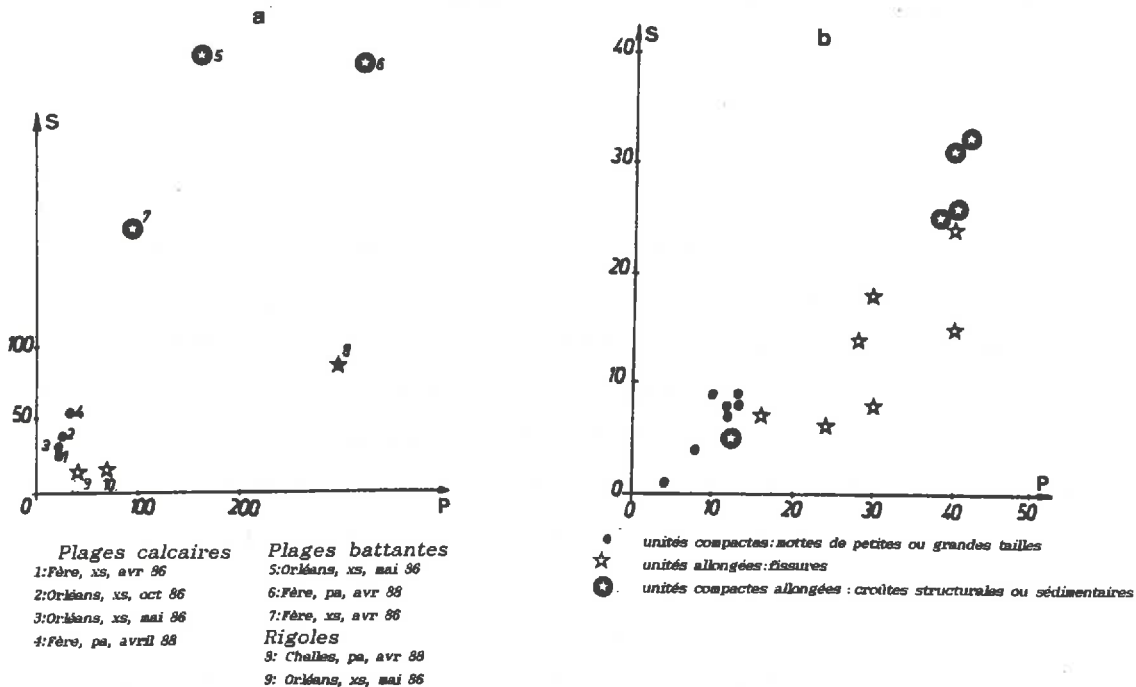


Fig.82. Répartition des différentes zones isolées sur les images en fonction de leur surface et périmètre :  
a: à partir de plusieurs images Spot.  
b: à partir des photographies prises verticalement à 1 m, des différents états de surface et numérisés sur Péricolor.

\* Ces paramètres sont calculés de la même façon, pour les différentes unités rencontrées sur les photographies des états de surface.

- au stade F0, on trouve principalement des formes compactes (petites ou grosses mottes) pl.6.photo.1.

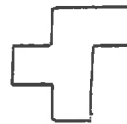
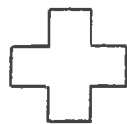
- au stade F1, des formes compactes allongées du même type que les plages battantes correspondent aux croûtes structurales. Il y a toujours des formes compactes mais de taille moyenne à grosse

- enfin au stade F2, c'est l'apparition de formes allongées correspondant aux fissures (identiques aux ravines sur Spot), les formes compactes allongées sont plus grandes (croûtes sédimentaires). Pl.6. photo.2.3.

#### Remarques

Cette dernière approche permet de différencier les grands types de formes et de les ordonner suivant leur taille; mais ces caractérisations sont encore insuffisantes. En effet, elles ne tiennent pas compte de l'orientation de la plage, ce qui peut avoir une signification importante (ex : des fissures horizontales ou verticales sur une lame mince n'ont pas le même rôle pour l'écoulement de l'eau dans le sol).

Par ailleurs, à l'intérieur d'une même classe, deux formes différentes peuvent se confondre par leurs paramètres S et P, un exemple en est donné par la figure ci dessous



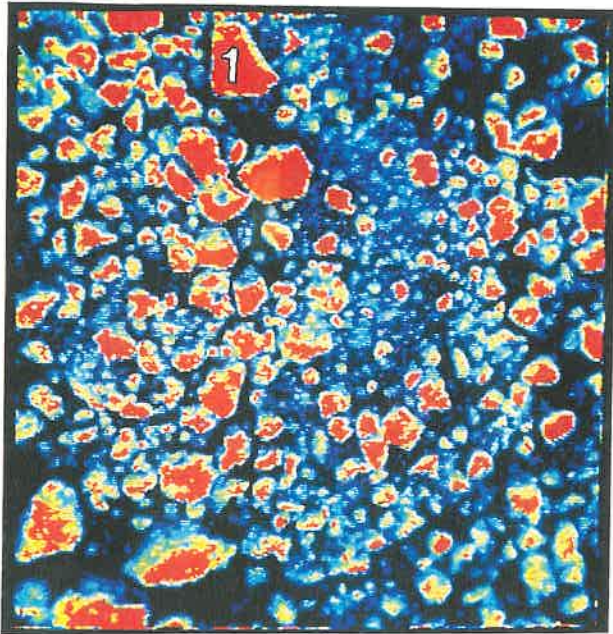
S= 5  
P= 12

Cette approche demande donc d'être complétée par d'autres analyses plus précises: approches des formes par ellipses (MOMAL, 1988) .

Il serait notamment intéressant en ce qui concerne l'identification des formes d'érosion sur les images, de mêler aux informations sur le contenu et le contenant des plages, des informations sur la topographie, ou les humidité des surface..On prend alors en compte le caractère multifactoriel de l'érosion..Ceci revient à utiliser des bases de données de diverses origines (système d'information géographique) afin d'élaborer des cartes thématiques de susceptibilité à l'érosion que l'on peut facilement suivre dans le temps grâce à la répétitivité des images Spot et à leur faible résolution. C'est ainsi que certains auteurs (PERRAS et al, 1988) utilisent les images satellitaires pour

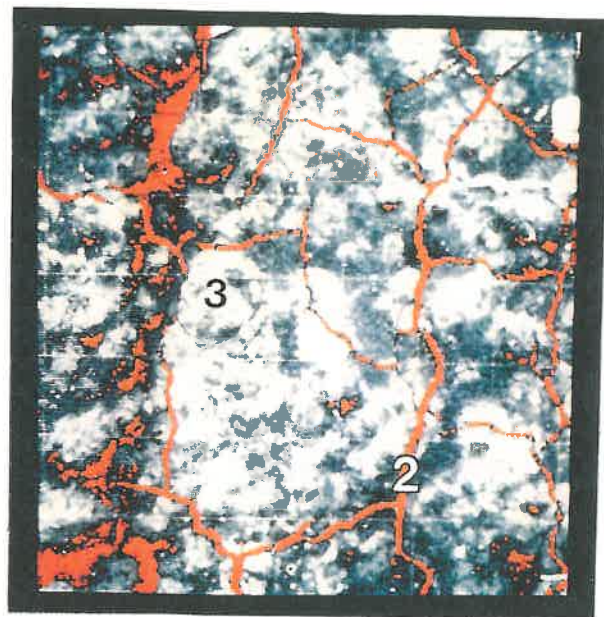
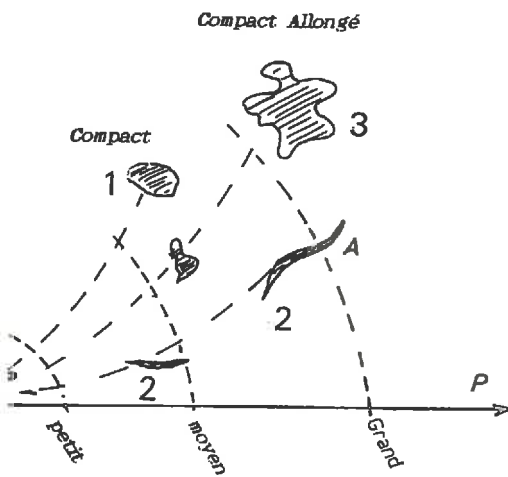
**CLASSEMENT DES FORMES DES UNITES DEFINIES SUR LES IMAGES SPOT ET SUR LES PHOTOGRAPHIES DES ETATS DE SURFACE EN FONCTION DES PARAMETRES S ET P.**

PL. 6



**Photo.1.** Photographie numérisée sur Péricolor de l'état de surface F1 de la parcelle d'Avignon. (Les formes dominantes apparaissent en rouge, il s'agit des mottes et agrégats de taille variable) le traitement effectué consiste en un réarrangement des classes de couleurs en fonction de l'histogramme de l'image de façon à avoir le maximum de contraste)

0 5cm



**Photo.2.** Photographie numérisée sur Péricolor de l'état de surface F2+ de la parcelle d'Avignon. (Les fissures apparaissent en rouge, le reste de la surface est constitué d'une croûte sédimentaire épaisse légèrement bosselée) même traitement que précédemment

0 5cm



**Photo.3.** Agrandissement du secteur de Chelles (Oise) à partir de l'image panchromatique du 30 Avril 1988. (La végétation apparaît en vert et noir, les marques d'érosion et zones calcaires sont en rouge, le sol nu en gris).

0 36m

évaluer le facteur C dans l'équation universelle de Wischmeier (1958, USLE) et combinent différentes bases de données pour élaborer ainsi des cartes thématiques...

#### Conclusion du chapitre 4

Dans ce chapitre, on a montré que la transposition des mesures effectuées sur des parcelles expérimentales à des parcelles agricoles n'entraîne pas de perte d'information.

On observe une bonne corrélation entre les différents niveaux d'investigation de la surface utilisés.

Les variations de réflectance entraînées par les effets de rangs ou de pente pour une même parcelle sont inférieures aux variations de réflectances observées de F0 à F2.

Par contre, des confusions peuvent être faites entre des parcelles cultivées différemment, ou de composition de surface variable: ainsi des plages calcaires et battantes à deux stades de dégradation différente peuvent se confondre, car elles présentent des réflectances élevées dans les trois bandes spectrales étudiées.

Lorsque il y a combinaison des informations des deux bandes spectrales rouge et proche infra-rouge, les sols s'organisent suivant un faisceau de droites dont la dispersion s'explique essentiellement en fonction de la couleur. L'effet de l'humidité ou de la rugosité peut se distinguer sur ces droites.

L'analyse diachronique d'images peut permettre, dans certains cas, de distinguer les plages calcaires des plages battantes puisque ces dernières sont le résultat d'un phénomène conjoncturel, qui évolue au cours du temps, à l'inverse des plages calcaires qui sont des formes stables.

Une caractérisation des formes par des mesures d'hétérogénéité et de recherche de paramètres a été présentée dans la dernière partie. elle concerne aussi bien les unités définies sur les images Spot que celles définies sur les photographies des états de surface.

Les différentes unités sont ainsi classées suivant trois grands types de formes :

- Les formes compactes de petite taille correspondent à la fois aux plages calcaires sur les images Spot, et aux mottes et agrégats des états de surface au stade F0 sur les photographies numérisées.
- Les formes compactes allongées de taille moyenne à grande caractérisent les plages battantes, et les croûtes structurales ou sédimentaires des phases F1 et F2



- Les formes allongées correspondent aux rigoles et zones de concentrations des eaux, ainsi qu'aux fissures qu'on rencontre parfois au stade F2.

En couplant ces deux types d'approches :

- la première sur le contenu radiométrique des plages

- la seconde sur la forme et l'hétérogénéité des plages,

il est possible de caractériser de façon assez précise les différents états de surface sur les images Spot.

---

**BILAN DE L'ETUDE**

---

## BILAN DE L'ETUDE

Les phénomènes d'érosion et de dégradation structurale se manifestent à plusieurs niveaux : de la motte de terre, à la région entière en passant par la parcelle et le bassin versant.

La télédétection est un moyen qui permet d'appréhender ces phénomènes pour ces différentes situations.

Pour cette étude, on s'est basé sur le modèle de BOIFFIN (1984) qui décompose la dégradation structurale de la surface du sol, par les pluies, suivant deux phases F1 et F2. Le stade initial F0 est fragmentaire rugueux.

- La phase F1 correspond à la fermeture de la surface et l'apparition d'une croûte structurale,

- La phase F2 débute à partir du moment où il y a flaquage, des croûtes sédimentaires se forment.

Dans un premier temps, on a cherché à caractériser ces différentes phases par la réflectance. Cette étude revient donc à analyser la relation rugosité- réflectance.

Puis dans un second temps, on a analysé les formes de ces différents états de surface sur le terrain et à partir d'images Spot.

L'étude bibliographique a montré que la réflectance du sol est une mesure physique qui résulte de la combinaison de plusieurs facteurs. Pour interpréter cette mesure, il faut connaître les paramètres significatifs qui interviennent pour le sol.

Ce travail a été entrepris à trois niveaux d'investigation du sol :

### CONSTITUANTS ET REFLECTANCE

Une première partie a consisté à établir des relations entre les paramètres caractérisant les états de surface (couleur, constituants, rugosité, humidité..) et le signal mesuré (réflectance) principalement dans le domaine spectral du visible et du proche infra-rouge.

Cette étude s'est faite au laboratoire à partir d'échantillons de sols variés. On a mesuré la réflexion diffuse de quelques  $\text{cm}^2$  de sols tamisé de 400 à 2000 nm au spectrophotomètre.

Il a été ainsi mis en évidence que *la forme des courbes spectrales dans le visible est en relation avec les principales caractéristiques du sol :*

- concave pour les sols organiques et sombres,
- convexe pour les sols clairs calcaires ou gypseux..

Des modèles exponentiels permettent de relier:

- la matière organique et la réflectance à 650 nm
- le fer total et la réflectance à 900 nm
- l'humidité et la réflectance à 1950 nm

A partir de ces relations, on peut fixer des seuils où ces facteurs sont dominants sur la réflectance :

- lorsque la teneur en matière organique est supérieure à 8%, la réflectance est faible sur tout le spectre du visible (<20%), quel que soit le stade de rugosité ou d'humidité.

On a mis en évidence des domaines où ces facteurs jouent un rôle secondaire sur la réflectance. Ces conditions sont les suivantes:

- teneur en matière organique <1.5%,
- teneur en fer total <5%,
- teneur en calcaire total <40%.

Des modèles ont été utilisés (DIMITRI) pour trier les échantillons suivant leur composition en fonction de leurs réponses spectrales. Les regroupements effectués montrent que les constituants ne sont pas les seuls facteurs explicatifs, la couleur intervient également de façon importante.

## LA COULEUR ET LA REFLECTANCE

En ce qui concerne le domaine du visible, on a montré l'importance de la couleur, ses relations avec l'humidité et les principaux constituants en font une variable prépondérante pour les sols.

En se basant sur les lois de la colorimétrie, on a montré qu'il est possible de calculer les couleurs Munsell d'échantillons de sols à partir des courbes de réflectance obtenues au laboratoire. La mise en évidence de la fréquence négligeable du métamérisme dans les sols a permis d'élaborer un modèle qui permet de prévoir les réponses spectrales des sols à partir de leur couleur Munsell.

La couleur est donc une information utilisable pour estimer le comportement spectral de sols dans le domaine du visible.

## EFFET DE LA RUGOSITE

La seconde partie de ce travail s'est intéressée essentiellement à mesurer l'effet d'un seul paramètre, la rugosité, sur la réflectance.

Sur des sites expérimentaux différents, on a suivi dans le temps, la dégradation structurale de la surface, sous pluies naturelles et sous pluies contrôlées.

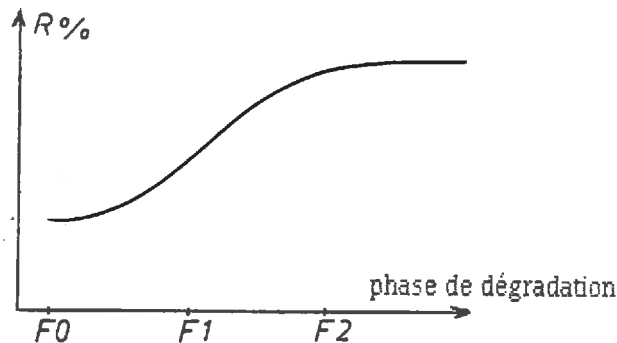


Pour ce travail, les résolutions spatiale et spectrale ont changé. On mesure sur quelques  $\text{cm}^2$  à  $\text{m}^2$  de sol non perturbé, la réflectance bidirectionnelle avec un radiomètre de terrain, dans les trois bandes spectrales du satellite Spot : le vert, le rouge et le proche infra-rouge.

Des observations de surface (modèle de BOIFFIN) et des mesures précises d'humidité et de rugosité sont comparées aux mesures radiométriques prises systématiquement sur chaque état, après les pluies.

Il existe une relation entre le stade de formation des croûtes de battance et la réflectance. Plus la rugosité diminue, plus la réflectance augmente pour atteindre un certain palier lorsque la surface est lisse.

Un modèle de référence entre la rugosité (qui correspond à un stade de dégradation de la surface) et la réflectance a été ainsi défini pour un sol donné relativement homogène et sous des conditions bien définies d'humidité et d'éclairement.



Des conditions standards de mesures ont été définies : midi solaire, angle de visée de  $0^\circ$ , état de surface ressuyé, pour lesquelles on a démontré que l'on peut différencier les phases de BOIFFIN par la réflectance. Les phases F0 et F2 se distinguent nettement, par contre la phase F1 de transition est moins marquée.

La forme de cette courbe d'évolution au cours du temps dépend essentiellement de deux facteurs (dans le cas le plus simple)

- les variations d'humidité des états de surface
- les variations d'ombre, dépendant elles-mêmes des conditions géométriques d'éclairement et d'observation.

Ces remarques ont permis de modéliser cette relation par une régression multiple faisant intervenir ces deux facteurs.

On a observé les fluctuations de ce modèle de référence lorsque :

- les facteurs extrinsèques (position du soleil, angle de visée du radiomètre) et les facteurs intrinsèques (couleur, composition, rugosité initiale) varient.

On montre que les conditions optimales pour différencier le mieux les stades structuraux sont celles où les variations d'ombre sont maximales (angle solaire le plus bas et angles de visée élevés, 8h, 40°). Cependant, ce sont des conditions rarement observées avec les données satellitaires sur les régions étudiées.

En ce qui concerne les variations des facteurs intrinsèques :

- on constate que, au delà d'un certain seuil d'humidité, différent pour chaque type de sol, on ne distingue plus les variations de rugosité.

La forme de la courbe du modèle de référence est modifiée suivant la composition du sol.

- Elle est continuellement croissante pour les sols qui sont soit clairs, soit instables, soit de rugosité initiale fine.

- par contre elle présente des pentes plus faibles, parfois des paliers, pour les sols organiques sombres, ou de rugosité initiale grossière.

Ces variations de comportement suivant la composition du sol ont pour conséquence que des réflectances élevées peuvent correspondre aussi bien à des stades de dégradation avancés : F2 pour un sol limoneux qu'à des stades encore rugueux peu dégradés : F0 ou F1 pour des sols clairs ou calcaires.

## **INTERET DES IMAGES SATELLITAIRES**

Dans la troisième partie, on a vérifié les relations établies sur les sites expérimentaux sur des images satellitaires multispectrales et panchromatiques.

Des études menées sur des parcelles agricoles ont permis de démontrer qu'il existe une bonne corrélation entre les différents niveaux d'investigation.: spectrophotométrie, radiométrie, imagerie satellitaire. Il y a cohérence entre les mesures effectuées par spectrométrie sur 1cm<sup>2</sup>, par radiométrie sur 1m<sup>2</sup> et les mesures relevées sur les images sur 100 m<sup>2</sup>.

Des mesures faites sur des placettes d'observation (50cm/50cm) ont été comparées à celles faites sur la parcelle entière (0.1ha). Les transferts d'échelles aussi bien dans le sens "horizontal" (extension géographique) que "vertical" (mesures à 1m et 19 m d'altitude de la surface) n'entraînent pas de perte d'informations dans la mesure où les zones étudiées sont relativement homogènes.

La résolution de Spot est suffisante pour distinguer les hétérogénéités intra-parcellaires et les différentes marques d'érosion (ravines, zones d'atterrissement..).

## **DROITES DES SOLS**

On a notamment montré qu'il n'existe non pas une seule droite des sol suivant le plan défini par les réflectances du canal rouge et celles du canal proche infra-rouge, mais un faisceau de droites.

La dispersion des points dans ce plan, s'explique surtout par la couleur MUNSSELL:  
- les valeurs de clarté sont croissantes parallèlement à l'axe du faisceau et des valeurs de pureté sont croissantes perpendiculairement à ce 1er axe.

Les effets de l'humidité, des conditions d'éclairement et de la rugosité modifient la distribution des sols dans ce plan.

- L'humidité entraîne une translation des points qui se fait parallèlement à l'axe du faisceau (augmentation des valeurs de clarté lorsque les sols s'assèchent) et une légère rotation due à l'augmentation des valeurs "2" de pureté.

Cependant même si la distribution des sols suivant leurs réflectances dans le rouge et le proche infra-rouge est intéressante pour distinguer les principales caractéristiques des sols, certains états de surface peuvent être confondus, en particulier les plages battantes et calcaires qui sont très claires et présentent des réflectances élevées dans les trois bandes spectrales étudiées.

## **LES FORMES DES ETATS DE SURFACE**

Ceci nous a amené à nous intéresser à l'organisation spatiale de ces divers états de surface et d'analyser leurs formes et l'évolution de ces formes dans le temps.

La battance étant un caractère conjoncturel, une première approche par une étude diachronique d'images peut permettre dans certains cas, la différenciation des plages battantes et calcaires. Ceci est possible si l'on possède deux images prises à des périodes bien contrastées dans l'année où les phénomènes de battance sont nuls ou au contraire très développés.

Une seconde approche consiste à s'intéresser aux formes de ces unités et à leurs organisations spatiales dans le paysage ou sur les images. Pour ce faire, il faut les situer par rapport à leur voisinage (contraste, hétérogénéité de la plage...).

L'hétérogénéité de ces plages a été caractérisée en comptant le nombre de limites dans une fenêtre de taille déterminée.

- Les unités calcaires apparaissent bien contrastées, à l'opposé des zones battantes hétérogènes dont les limites sont difficiles à placer.

Une classification des différentes formes rencontrées a été effectuée en fonction des paramètres: Surface et Périmètre. Les formes existantes ont été reportées aussi bien sur les images Spot que sur les photographies de terrain numérisées.

Ces caractérisations montrent des analogies entre les unités définies sur ces deux types d'images.

- Les formes compactes correspondent à la fois aux plages calcaires.(Elles sont généralement de petites tailles), et aux mottes et agrégats que l'on peut distinguer au stade F0 sur les photos numérisées.

- Les formes compactes-allongées de tailles moyennes à grandes caractérisent les plages battantes sur les images Spot mais aussi les croûtes structurales et sédimentaires des phases F1 et F2.

- Les formes allongées de grandes tailles correspondent aux ravines d'érosion ou aux zones de concentration des eaux, ainsi qu'aux fissures qui apparaissent au stade F2.

Ces dernières analyses relatives aux formes et limites des plages (contenant vient compléter l'analyse du "contenu" radiométrique de ces plages.

Une telle démarche de synthèse, groupant à la fois les réponses spectrales et les formes, apporte une nouveauté pour l'interprétation des données de télédétection. Il est possible de préciser la nature des hétérogénéités intra-parcellaires (marques d'érosion) à condition que celles-ci soient d'une taille suffisante supérieures ou égales à la résolution du satellite.

## Conclusion Générale

Cette étude s'intéresse aux phénomènes d'érosion et de dégradation structurale de la surface du sol sous l'action des pluies.

Ces notions sont abordées en analysant le sol par différentes méthodes :

- des observations macroscopiques suivant le modèle de BOIFFIN (1984)
- des mesures en télédétection.

Si l'on veut comparer ces deux approches, on s'aperçoit que différents facteurs interviennent sur la réponse spectrale des sols. Afin d'isoler le facteur rugosité des autres paramètres tels que l'humidité, les constituants minéralogiques.., on a étudié plus finement au laboratoire le rôle des variables qui interviennent sur le signal, et on a défini leur domaine d'influence minimal ou maximal sur la réflectance. Les constituants, en particulier la matière organique, le fer et le calcaire ont fait l'objet d'analyses plus précises. Le rôle prépondérant de la couleur a été démontré sur la réflectance des sols dans le domaine du visible et ses relations avec l'humidité..

Ces conditions étant bien définies, on a montré qu'il existe une relation entre le stade de formation des croûtes de battance et la réflectance. La réflectance augmente lorsque la rugosité diminue. Les variations de ce modèle sont fonction de la composition et de la rugosité initiale du sol, c'est à dire de la sensibilité du sol à la dégradation structurale.

Ces variations de comportement suivant la composition du sol ont pour conséquence que des réflectances élevées peuvent correspondre aussi bien à des stades de dégradation avancés (F2 pour un sol limoneux) qu'à des stades F0 ou F1 pour des sols clairs calcaires.

Les conditions optimales pour différencier les principales phases de dégradation par la réflectance sont celles où l'humidité de surface est minimale et les conditions d'ombrage maximales.

L'illustration de ces résultats s'observe sur les images Spot où l'on distingue les zones battantes des zones rugueuses qui viennent d'être labourées. En effet, il y a une bonne corrélation entre les différents niveaux d'investigation du sol : spectrométrie, radiométrie, images satellitaires.

La télédétection apparaît donc bien utilisable lorsque la résolution des images est fine et lorsque que la répétitivité dans le temps est suffisante pour suivre l'évolution de ces états de surface et des phénomènes d'érosion dans le temps et dans l'espace. Les résultats avec Spot sont satisfaisants.

Plusieurs pistes de recherches peuvent être proposées à la suite de ce travail.

1) *au niveau du laboratoire*

il serait intéressant de compléter les séries de sols étudiés, notamment en essayant d'avoir une gamme complète et régulière pour les constituants choisis.(calcaire, argile..).

- valider le modèle DIMITRI sur des échantillons dont on ne connaît pas les caractéristiques, afin de vérifier la fiabilité du classement obtenu.

Par ailleurs, on a observé que la résolution spectrale fine, obtenue avec le spectrophotomètre, notamment dans le domaine du visible apporte des informations utiles sur la couleur et la composition des sols. Il serait intéressant de posséder des bandes spectrales plus rapprochées et plus nombreuses dans ce domaine sur les satellites, en particulier une bande spectrale dans le bleu.

Dans le proche infra-rouge et le moyen infra-rouge, certains éléments ont des bandes d'absorption spécifiques : fer, 860nm; eau, 1450-1950 nm; gypse, 1150-1750nm... Seul le satellite Thématic-Mapper offre des bandes spectrales dans ces domaines mais elles ne sont pas centrées sur ces longueurs d'ondes et pas assez fines. Une solution intermédiaire serait peut-être des radiomètres à hautes résolutions sur avion.

2) *au niveau terrain*

L'étape des mesures radiométriques sur le terrain est nécessaire pour la vérification et la validation des traitements que l'on effectue sur les images satellitaires. Elle demande préalablement une caractérisation précise des états de surface en relation avec les objectifs fixés pour l'étude.

Une approche de caractérisation de la surface qui semble intéressante à développer, est celle qui essaie de paramétrer les éléments ou les changements morphologiques de la surface à partir du traitement d'images de photographies prises verticalement à 1m du sol puis numérisées sur Péricolor. Ce sont des méthodes d'analyses rapides qui ne perturbent pas l'état structural et qui sont compatibles avec les mêmes surfaces mesurées par le radiomètre.

Il serait intéressant d'associer à chaque état de surface un coefficient de sensibilité à l'érosion ou un coefficient de ruissellement à partir de ces observations. Les autres variables utiles pour la caractérisation des états de surface étant : la couleur, l'humidité, le coefficient d'ombrage.

### *3) au niveau des images satellitaires*

L'étape suivante de ce travail est une extrapolation des mesures et traitements faits sur une ou plusieurs parcelles, à des bassins versants puis à toute une région agricole. (on effectue un transfert d'échelle de 1/1000 à 1/25000 ou 1/5000).

- un des premiers points à vérifier est l'extrapolation les relations obtenues avec les droites des sols et la réalisation de classifications des états de surface, sur toute une région agricole.

Les cartes de la répartition des états de surface, ainsi obtenues peuvent être ensuite comparées à divers documents et en particulier aux cartes pédologiques..

- le second point à privilégier pour suivre la dynamique des états de surface dans le temps est l'analyse diachronique d'images.

L'utilisation de système d'informations géographiques peut être envisagé, en faisant appel à différentes bases de données : cartes topographiques, hydrologiques, images diachroniques.. afin d'élaborer des cartes d'érodibilité des sols.

Grâce à la répétitivité des images, ces cartes peuvent être renouvelables et s'intégrer dans des modèles hydrologiques ou écologiques..

Les états de surface apparaissent donc ici au centre de plusieurs disciplines : pédologie, hydrologie, morphologie. Leur caractérisation permet de mieux comprendre le fonctionnement de certains systèmes. La télédétection est un moyen d'obtenir des mesures précises et répétées de ces états de surface sur de grandes étendues.



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLMARAS R-R., LARSON W-E., 1966. Total porosity and random roughness of the interrow zone as influence by tillage. USDA conser. Res. Rep., pp 7- 72.
- ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. Annales agronomiques, tome 15
- BARRON V., 1984. Influence of Aluminium substitution on the color of synthetic hematites. Clays and minerals, vol 32, n°2, pp 157 - 158.
- BECKER F., BILLINGSLEY., GOLDBERG M. et al, 1980. Principes physiques et mathématiques de télédétection. Notes de cours d'été de physique spatiale. CNES, Toulouse, 653 p.
- BERTUZZI P., CAUSSIGNAC J-M., 1987. Measuring in situ soil surface roughness using a laser profilometer. Int. Coll." signatures d'objets en télédétection". INRA, n°4, ESASP287, Aussois, pp 19-24.
- BERTUZZI P., RAUWS G., COURAULT D., 1989. Testing Roughness inces to estimate soil surface roughness changes due to rainfall. ( soumis à soil and tillage res.)
- BLACK C-A, 1965. Methods of soil analysis. Chemicals and microbiological properties. série Agronomy n °9, pp 973-1427.
- BOIFFIN J. 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse de docteur ingénieur de l'INAPG, Paris, 320p + annexes.
- BOIFFIN J., SEBILLOTE, 1976. Climat, stabilité structurale et battance. Essai d'analyse d'un comportement du sol au champ. Ann. Agro.27, 3, pp295-395.
- BOIFFIN J., BRESSON L-M., 1987. Dynamique de la formation des croûtes superficielles. Apports de l'analyse micromorphologique des sols. Coll.de micromorpho., Paris, pp 395-400.
- BOIFFIN J., MONNIER G., 1986. Workshop on erosion assessment for the EEC. Methods and models. Int. Symp. on Ass.<sup>t</sup> of soil surface sealing and crusting, Belgium ghent.
- BOIFFIN J., PAPY F., PEYRE Y., 1986. Systèmes de production, systèmes de cultures et risques d'érosion dans le Pays de Caux. rapport INAPG, INRA, 154p + annexes.
- BOIFFIN J., PAPY F., EIMBECK M., 1988. Influence des systèmes de cultures sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. Analyse des conditions de déclenchement de l'érosion. Agronomie, vol 8, n°8, pp 666-673.



- BOWERS S-A., HANKS RJ. 1965. Reflection of radiant energy from soils. Soil Sc., vol 100, pp 130-138.
- BOWERS S-A., SMITH S-J., 1972. Spectrophotometric determination of soil water content. Soil Sc. Soc. Am. proc. vol 36, pp 978-980.
- BRUNEAU P., 1988. Etude du microrelief et de la porosité des couches superficielles d'un sol limoneux battant en vue de l'étude de la genèse du ruissellement. DEA de pédologie, INRA, Rennes, 51p + annexes.
- BROUSSARD P., 1986. Potentialité d'étude de la battance par télédétection. DAA INAPG, INRA Avignon, 80p.
- BURWELL R-E., LARSON W-E., 1963. Infiltration influence by tillage induced random roughness and pore space. Soil Sci. Am. Proc., 33, pp 449-452.
- BUTTNER G., CSILLAG F., 1987. Comparative study of crop and soil mapping using multitemporal and multispectral Spot and Landsat data. Coll Spot1, CNES, Paris, pp99-106.
- CALOZ R., ABEDNEGO B., COLLET C., 1988. The normalization of soil brightness index for the study of changes in soil conditions. Int. coll. "signatures spectrales d'objets en télédétection", ESA SP 287, Aussois, pp 363-366.
- CERVELLE B., CHOROWICZ J., RUDANT JP, TAMAIN G., ALEM E-M., 1988. Caractérisation des roches par spectroradiométrie à haute résolution spectrale visible et infra-rouge proche. Int. coll. " signatures spectrales en télédétection". ESA SP 287., pp 319-322.
- CHEN Y., TARCHITZKY J., BROWER J., BANIN A., 1980. Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. Soil Sci, 130, pp 49-55.
- CIERNIEWSKI J., 1983. Influence des structures de sols motteux sur la réponse spectrale des sols. 2ème coll. int. " signatures spectrales d'objets en télédétection. INRA, Bordeaux, pp 141-148.
- CIERNIEWSKI J., 1985. Relation between soil moisture tension and spectral reflectance of different soils in the visible and near infrared range. 3ème coll. int. "signatures spectrales d'objets en télédétection". ESA SP 247, Les Arcs, pp 429-432.
- CIERNIEWSKI J., 1988. A model of soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near infrared range. Remote sens. Environ. 23, pp 97-115.
- CIPRA J., FRANZMEIER D-P., BAUER M-E., BOYD R-K., 1980. Comparison of multispectral measurements from non vegetated soils using Landsat digital data and spectroradiometer. Soil Sc. Soc. Am. J., vol 44, pp 80- 84.

- CLOAREC L., 1985. Relations entre stabilité structurale et battance. DAA INAPG, Grignon, 53p.
- COLLINET J., VALENTIN C., 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Cahier de l'Orstom, série pédologique, vol 17, n°4, pp 238-328.
- CONDIT HR., 1970. The spectral reflectance of American soils. Photogramm. Eng. Rem. Sens. vol 34, 9, pp 955-960.
- COSTERS M., CHERMANT J-L., 1985. Précis d'analyse d'images. CNRS, 519p.
- COULSON K-L., 1966. Effects of reflection properties of natural surfaces in aerial reconnaissance. Appl. Optics, vol 5, n°6, pp 905-910.
- COURAULT D., 1986. Modélisation du comportement spectral de la surface du sol. Etude intra-parcellaire. DEA de Pédologie, INAPG, 102p.
- COURAULT D., GIRARD M-C., ESCADAFAL R., 1988<sub>1</sub>. Modélisation de la couleur des sols par télédétection. Int coll.. " signatures spectrales d'objets en télédétection". ESA SP 287, Aussois, pp 357- 362.
- COURAULT D., GIRARD M-C., 1988<sub>2</sub>. Relationships between the soils composition and their spectral signatures. 5th Sympo. ISSS of Working Group Rem. Sens., Budapest, pp 178-185.
- COURAULT D., GIRARD M-C., 1988<sub>3</sub>. Analyse des sols à l'échelle de la parcelle en télédétection. Coll. int. Spot1, CNES,, Paris, pp 333-340.
- COURAULT D. GIRARD M-C., 1988<sub>4</sub>. Analyse des hétérogénéités intraparcellaires des sols par télédétection. Sciences du sol, vol 26, n°1, pp 1-12.
- DESMET A., EEVENS H., GOMBEER R., 1988. Influence of some soil factors on the reflectance of bare soils. Pédologie, vol 38, n°3, pp 227-247.
- DINGUARD, 1986. Etalonnage absolu et interbande. Spot 1. Premiers résultats en vol. Toulouse, déc, pp 71-78.
- EPIPHANIO J-C-N., VITORELLO I., 1984. Inter relationships between view angles and surface moisture and roughness conditions in fields measured radiometer reflectance of an oxisol. 2ème coll. int. "signatures spectrales d'objets en télédétection". coll INRA, Bordeaux, pp
- ESCADAFAL R., 1981<sub>1</sub>. L'étude de la surface du sol dans les régions arides (sud-tunisien). Recherches méthodologiques. ES n° 187, Orstom, 60p+ annexes.

- ESCADAFAL R., 1981<sub>2</sub>. Etude expérimentale de la dynamique superficielle d'un sol aride. Résultats des campagnes de mesures sous pluies simulées. Orstom, 63p.
- ESCADAFAL R., 1989<sub>2</sub>. Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection. Thèse de Pédologie de Paris 6, 317p.
- ESCADAFAL R., GIRARD M-C., COURAULT D., 1988. La couleur des sols: appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. Agronomie, vol 8, n°2, pp 147-154.
- ESCADAFAL R. GIRARD M-C., COURAULT D., 1989<sub>1</sub>. Munsell soil color and soil reflectance in the visible and spectral bands of Landsat data (MSS and TM). accepté à Remote sens. Environ.
- FEENY V., 1988. Méthodes d'analyse des unités cartographiques. Application au transfert d'échelle. exemple pris sur les cartes de l'Aisne. DEA de Pédologie, INAPG, 57p.
- FRELICH J-R., JENSEN E-H., GIFFORD R-O., 1973. Effect of crust rigidity and osmotic potential on emergency grasses species. Agronomy J., pp 26- 29.
- GAUSMAN H-W., LEAMER R-W., NORIEGA J-R, RODREGEZ R-R., WIEGAND C-L., 1977. Field-measured spectroradiometric reflectances of disked and non disked soil with and without wheat straw. Soil Sc. Soc. Am. J., vol 41, pp 733- 796.
- GERBERMANN A-H., NEHER D-D., 1979. Reflectance of varying mixtures of clay soil and sand. Photogramm. Eng.Rem.Sens., vol 45, n°8, pp 1145-1151.
- GIRARD M-C., 1983<sub>1</sub>. Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne. thèse de doctorat d'état de Paris 7., Sols n°12, 490p.
- GIRARD M-C., 1983<sub>2</sub>. Télédétection de la surface du sol. coll. INRA, N°32, pp 177-193.
- GIRARD M-C., GIRARD C-M., 1977. Télédétection de la surface du sol. AISS, 1er colloque "Pédologie et télédétection", Rome, pp 55-64.
- GIRARD M-C., BIALOUSZ S., 1989. Caractéristiques spectrales des sols en fonction de leurs propriétés. 3ème coll. int. "pédologie et télédétection". AISS, Varsovie 1981.
- GIRARD M-C., GIRARD C-M., 1989. La télédétection appliquée aux zones tempérées et intertropicales à l'étude de la biosphère. Masson, 260 p.

- GOETGHELUCK F., LAIRIS V., THIOLLIERE B., 1985. Système de production, système de culture et risques d'érosion dans le Pays de Caux. DAA INAPG, 96p+ annexes.
- GUYOT G., 1984. Variabilité angulaire et spatiale des données spectrales dans le visible et dans le proche infra-rouge. 2ème coll. int. " signatures spectrales d'objets en télédétection". INRA, pp 27- 42.
- GUYOT G., 1988. Les mesures radiométriques de terrain. actes de la semaine de Monetier les Bains, INRA t 1, pp 65- 91.
- GUYOT G., HANOCQ J-F., BUIS J-P., SAINT G., 1984. Mise au point d'un radiomètre de simulation Spot. II coll int "signatures spectrales d'objets en télédétection". n°23, pp 233-242.
- HENIN S., 1976. Cours de physique du sol. Orstom, editest, Paris.
- HENIN S.,GRAS R., MONNIER G.,1969. Le profil cultural ( 2ème édition). Masson., 332p.
- HUANG C., WHITE I., THWAITE E-G., BENDELI A., 1988. A non contact laser system for measuring soil surface topography. Soil Sc. Soc.Am.Proc., 52, pp 350-355.
- HUETE A-R., POST D-F., JACKSON R-D., 1984. Soil spectral effects on four space vegetation discrimination. Rem. Sens.Environ., 15 pp 155-165.
- HUNT G-R., SALISBURY G-W, 1971. Visible and near infra(red spectra of minerals. I. silicates minerals. II. Carbonates. Modern Geology, vol 2, pp 23-30, pp 283- 300.
- JOHN P., PETERSON, BARETT F., ROBINSON, 1979. Predictability of change in soil reflectance on wetting. machine Processing of Rem. Sensed data. Purdue University USA, pp 264-274.
- KARMANOV I-I;, 1970. Study of soils from the spectral composition of reflected radiation. Soviet soil Science, 2, pp 226-238.
- KARMANOVA L-A., 1981. Effect of various iron compounds on the spectral reflectance and color of soils. Soviet Soil Science, 5, pp 53-60.
- KAUTH E-J., THOMAS G-S., 1976. The tasseled cap A.graphical description of the spectral temporal development of agricultural crops by computer classification of Landsat MSS Data Proc. Symp Mach.proc. Rem.Sens. Data Lars Purdue IEE, cat 76,ch1103, IMPRSD.
- KEMP R-A., 1985. The cause of redness in some buried and non buried soils in eastern England. J. Soil Science, 36, pp 329-334.

- KIMES D-S., NEWCOM W-W, TUCKER C-J, ZONNEVELD I-S., 1985. Directional reflectance factor distribution for cover types in northern Africa. *Rem. sens. environn.*, 18, pp 1- 19.
- KING C., 1979. Contribution à l'utilisation des micro-ondes de l'étude des sols. Thèse de docteur ingénieur, INAPG, 122p+ annexes.
- KING C., 1985. Etude des sols et des formations superficielles par télédétection. Thèse INRA- BRGM, 211p.
- KING C., LEFEBVRE D'HELLEN COURT T., 1982. La réflectance des sols en place, étude de l'influence de certaines caractéristiques propres à la surface du sol nu. *Int. Symp. ISPRS, comm 7, GDTA.*, p305.
- KING D., 1987. Modélisation de l'approche cartographique du comportement des sols. *sciences du Sol*, vol 25, n°2, pp 107-121.
- KUIPERS H., 1957. A reliefmeter for soil cultivation studies. *Neth. J. Agric. Sci.*, 5, pp 255-262.
- KRISHNA MURTI G-S-R. SATYANARANA, 1971. Influence of chemical characteristics in the development of soil colour. *geoderma*, vol 5, n°3, pp 243- 248.
- LE BISSONNAIS Y., 1988. Analyses des mécanismes de désagrégation et de la mobilité des particules sous l'action des pluies. Thèse de Sciences de la terre, Orléans, 221p.
- LE SOUDER C., 1987. Effet d'un conditionneur minéral sur la battance des sols cultivés. DAA de sciences du sol, INRA Versailles, 86p+ann.
- LINDBERG J-D., SNYDER D-G., 1972. Diffuse reflectance spectra of several clay minerals. *Am. mineralog.*, Vol 57, pp 485- 493.
- LINDEN D-R., VAN DOREN J-R., 1986. Parameters for characterizing tillage induced soil surface roughness. *soil Sci. Am. J.*, 50, pp 1550- 1565.
- LOUHALA S., CERVELLE B., CHOROWICZ, RUDANT JP, SCANVIC JY, 1988. Intérêt de la radiométrie à haute résolution spectrale pour la cartographie en région méditerranéenne. *Int. coll, "signatures spectrales en télédétection". ESA SP 287, Aussois*, pp 311- 314.
- LOZET J., MATHIEU C., 1986. Dictionnaire de sciences du Sol. Lavoisiers, 269p.
- MATHEWS H-L., CUNNINGHAM R-L., PETERSEN G-W., 1973. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. *Soil Sc. Soc. am. proc.*, vol 37, pp 421-425.

- MELVILLE M-D, ATKINSON G., 1985. Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space. *J. Soil Sci.*, vol 36, pp 495-512.
- MERING C., DEBAINE F., 1988. Analysis of satellite image applied to archeological research in north-west India. Delimitation of linear networks. (présenté à la 9ème conf. on Rem. Sens., Bangkok, nov 1988.)
- MITCHELL J-K., JONES B., 1978. Micro-relief surface depression storage changes during rainfall events and their application to rain fall -run off models. *Water resources bulletin*, vol 14, n°4, pp 777- 802.
- MOMAL F. 1988. Structuration et exploitation numérique des informations géographiques. Application à la cartographie pédologique. Thèse de docteur ingénieur de Géologie appliquée, INAPG, CERN. 161p
- MONNIER C., STENGEL P., GUERIF J, 1981. Recherches de critères sur la fertilité physique du sol et de son évolution en fonction du système de cultures. CR, séminaire, CEE, Agrimed, ( Italie), pp 32- 52.
- MORGAN R.P.C, 1985. Soil degradation and soil erosion in the loamy belt of northern Europe. *Soil Erosion*. ed CHISCI & MORGAN, Balkema. pp 165 - 172.
- MULDERS M-A., 1987. Remote Sensing in soil science. *Development in soil science*, Elsevier, vol15, amsterdam, 378p.
- OBUKHOV A-I., ORLOV D-S., 1964. Spectral reflectivity of the major soils groups and possibility of using diffuse reflection in soils investigation. *soviet soil Sci.*, vol 2, pp 174- 184.
- OHTA N., WYSZECKI G., 1977. Location of the nodes of metamerism color stimuli. *Color Res. Appl.*, 2, pp183-186.
- ONSTAD C-A., 1984. Depressional storage on tilled soil surface. *Trans. AM. Soc. Agric. Eng.*, 27, pp729-732.
- ORLOV D-S. 1966. Quantitative pattern of light reflection by soil. Influence of particule size on reflectivity. traduit de Nauchnyye Doklady vysshey Shkoly. *Biologicheskiye Nauki.*, pp 206- 210.
- PAUL S., ALOUGES A., BONNEVAL H., PONTIER L., 1982. Dictionnaire de télédétection aérospatiale. masson, Paris, 256p.
- PERRAS S., BARIL D., PESANT A., BONN F., 1988. Distinction des zones à haut risque d'érosion hydrique à l'aide d'images Spot. *Int.coll. "Signatures spectrales d'objets en télédétection"*, ESA SP 287, Aussois, pp 393-397.
- PEYRE Y., 1982. L'érosion par l'eau. *Techniques agricoles*, 1385, 9, 16p.



- PEYRE Y., MICHELIN J., FOURNIER B., 1989. Analyse de l'érosion hydrique. Rapport ADEPRINA, laboratoire des sols, INAPG, 115p.
- PLANET W-G., 1970. some comments on reflectance measurements of wet soils: Rem. Sens. Environn., 1, pp 127- 129.
- PLEURET C., 1988. Infiltration et réorganisations superficielles sous pluies simulées. Cas des sols ferallitiques du Togo. DEA de pédologie, Paris 7, Orstom, 79p.
- PROST R., KING C., LEFEBVRE D'HELLEN COURT, 1983. Propriétés de réflexion diffuse de pâtes de Kaolinite en fonction de leur teneur en eau. Clay minerals, vol 18, pp 193- 204.
- REMY J-CL., MARIN-LAFLECHE A., 1974. L'analyse de terre. Réalisation d'un programme d'interprétation automatique. Ann. Agron., 25, 4, pp 607-732.
- RICHARDSON A-J, WIEGAND C-L., GAUSSMAN H-W, 1975. Plant, soil and shadow reflectance components of row crops. photogramm. eng. rem. sens., vol 16, n°11, pp 1401- 1407.
- RICHARDSON A-J., WIEGAND C-L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. Photogramm. Eng. Rem. sens., vol 18, n°12, pp 1541-1552.
- ROMKENS M-J-M., WANG J-Y., 1986. Effet of tillage on surface roughness. trans. Am. Soc. Agric. Eng., 29, pp 429-433.
- ROMKENS M-J-M., WANG J-Y., DARDEN R.W., 1988. A laser microreliefmeter. Trans. Am.Soc. Agric. Eng. 31. 408-413.
- ROGALA J-P. 1982. Approche numérique de l'espace agricole. Analyse de l'hétérogénéité et de la structure des unités cartographiques. thèse de docteur ingénieur de Géologie appliquée, ENSA de Rennes, 224 p.
- SHIELDS L-A, PAUL R-J, ST ARNAUD R-J., HEAD W-K., 1968. Spectrophotometric measurement of soil color and its relationship to moisture and organic matter. Can J. soil sci., vol 48, pp 271- 280.
- SKIDMORE E-L., DICKERSON J-D., SCHIMMELPFENNIG H., 1975. Evaluating surface soil water content by measuring reflectance. Soil Sci. Soc Am. Proc., vol 39, pp 239- 242.
- STONER E-R., BAUMGARDNER M-F. 1981. Characteristic variations in reflectance of soils. Soil Sci. Soc. Am. J., vol 45, pp 1161- 1165.
- STONER E-R., BAUMGARDNER M-F., BIEHL L-L., ROBINSON B-F., 1979. Atlas of reflectance properties. Lars tech. Report 111579, Purdue university., 75p.

- TANRE D., HERMAN M., 1978. Correction de l'effet atmosphérique pour les données de télédétection. Proc.int. conf. on earth observation from space and managt of planetary resources, Toulouse, 6, 11, pp 355-360.
- THOMAS A-W., WELCH R., JORDAN T-R., 1986. Quantification concentrate flow erosion on cropland with aerial photogrammetry. J. of Soil and Water conservation, vol 41, n°4, pp 249- 252.
- TORRENT J., SCHWERTMANN U., FECHTER H., ALFEREZ F., 1983. Quantitative relationships soil color and hematite content. Soil Sci., vol 136; n°6, pp 354-358.
- TORRENT J., SCHWERTMANN U., SCHULZE D-G., 1980. Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. Geoderma, vol 23, pp 191- 208.
- TRAUBE L., 1985. Analyses radiométriques et caractérisation des differences de l'état de surface. DEA de pédologie, INAPG, 121p.
- VALENTIN C., 1981. Organisations pelliculaires de quelques sols de régions sub-désertiques. Thèse de Pédologie de Paris 7. 229p+ annexes.
- WISCHMEIER W-H., SMITH D.D., 1958. Rainfall energy and its relationships to soil loss. Trans. Am. Geophys. Un., 39, pp 285-474.
- WISCHMEIER W-H., SMITH D.D., 1965. Predicting rainfall and its relationship to soil losses from cropland east of Rocky Mountains. Agric. Handbook, 282, USDA.
- WYSESCKI G. STILES W-S., 1982. Color science concept and methods quantitative date and formulae. Wiley, New York, 2ème édition.
- WITONO H., 1988. Couplage de mesures hyperfréquences en bandes C et de modèles de transferts d'eau et de chaleur pour l'estimation du bilan hydrique sur sol nu. Thèse de docteur ingénieur de l'ENSA de Rennes. 265p
- ZOBECK T-M., ONSTAD C-A., 1987. Tillage and rainfall effects on random roughness: a review. Soil and tillage research, vol 9, pp 1- 20.



---

## ANNEXES

annexe.1. Fiche descriptive des états de surface de J.BOIFFIN (1984)

annexe.2. Matrice de corrélation entre les constituants principaux des sols et les réflectances de 380 à 2000 nm.

annexe.3. Valeurs moyennes des principaux paramètres mesurés sur le terrain (Avignon)

---

DATE	
HEURE	
Dmin calibre (cm)	
recouvr. (%)	
DESAGREGATION Tf	
MOTTES raccords	
ind. départ	
DISPERSION type	
abond.	
situat.	
CROUTE struct. (%)	
sedim. (%)	
NOTES au verso (n°)	

Note	Aspect le plus fréquent des raccords
0	Surplomb intact, mottes posées, discontinuité totale entre la motte et son environnement
1	Surplomb non altéré, motte posée, continuité de la pellicule superficielle
2	Début d'altération des surplombs, angles des raccords aigus mais raccords commencent à apparaître nettement
3	Surplombs moyennement à très altérés... environ 50 % des angles sont obtus
4	Raccords très prononcés, majorité d'angles obtus, les mottes ressemblent à des microbuttes

ASPECT	Tous fragments parfaitement distincts	Fragments soudés mais contours encore reconnaissables	Fragments soudés sans de signes de dispersion	Fragments soudés, contours disparus, pas de signes de dispersion	Continuité totale avec signes de "dispersion"
	Soudure de T4i	Soudure de T4i et T4g	Continuité totale de T4i	Continuité totale de T4i et T4g	Croûtes de l'épave Apparition importante d'angles et de sautes de niveau et de sautes de niveau plus fins
Note	0	2	3	4	6

annexe 2. Matrice de corrélation obtenue entre les réflectances des 84 échantillons et les principaux constituants.

MATRICE DE CORRELATIONS TOTALES

	380	400	450	500	550	600	650	700	750	800	860	900	1000	1100	1350	1400	1450	1550	1650	1750	1850	1950	2050	CAC03	FERT0	MORGA		
CAC03	0.620	0.620	0.550	0.505	0.416	0.335	0.330	0.343	0.352	0.379	0.146	0.445	0.433	0.427	0.418	0.454	0.380	0.379	0.368	0.369	0.360	0.334	0.301	1.0000				
FERT0	-0.394	-0.395	-0.417	-0.421	-0.430	-0.404	-0.431	-0.452	-0.499	-0.555	-0.284	-0.622	-0.664	-0.688	-0.726	-0.728	-0.739	-0.746	-0.744	-0.750	-0.757	-0.700	-0.743	0.246	1.0000			
MORGA	-0.184	-0.184	-0.240	-0.278	-0.339	-0.394	-0.398	-0.398	-0.381	-0.358	-0.233	-0.305	-0.275	-0.259	-0.222	-0.188	-0.211	-0.214	-0.212	-0.208	-0.197	-0.188	-0.198	0.088	-0.119	1.0000		

Annexe.3. Valeurs moyennes et coefficients de variation de principaux paramètres mesurés sur le terrain.

date	heure	STADE	ec	cum	humoy	humec	x1tmoy	x1tec	x2tmoy	x2tec	x3tmoy	x3tec	x1gmoy	x1gec	x2gmoy	x2gec	x3gmoy	x3gec
2007	14	F0s	0	6	3	0.058	0.021	207.16	5.80	244.	8.55	270.10	23.68	15.64	19.64	0.99	23.42	0.59
2007	18	F0s	0	6	3	0.058	0.021	165.40	25.90	202.	32.16	257.33	42.00	11.99	16.29	0.16	24.79	0.20
2207	8	F1h	30	3	2	0.316	0.014	67.68	13.54	86.	18.28	115.84	32.05	3.51	5.90	0.78	10.47	0.26
2207	14	F1h	30	5	4	0.267	0.031	115.23	22.21	148.	27.33	171.10	37.38	7.70	11.89	0.52	15.11	0.24
2207	18	F1h	30	6	3	0.201	0.025	129.71	36.88	171.	46.59	216.41	64.66	8.90	13.72	0.15	18.91	0.28
2407	8	F1s	30	4	3	0.149	0.041	148.67	16.34	177.	16.81	212.80	15.49	5.08	8.75	0.43	13.87	0.82
2407	14	F1s	30	6	3	0.131	0.020	208.00	19.90	249.	22.70	266.00	24.30	17.41	20.11	0.63	24.79	0.93
2407	18	F1s	30	7	3	0.111	0.024	154.26	18.44	193.	21.01	239.80	30.35	11.42	14.77	0.22	19.59	0.07
2607	8	F1+h	64	4	4	0.353	0.021	72.48	13.17	86.	24.06	121.28	39.86	3.84	7.52	0.36	29.47	0.35
2607	14	F1+h	64	4	4	0.281	0.017	98.10	11.20	125.	14.90	148.80	25.20	8.41	11.83	0.67	10.82	0.24
2607	18	F1+h	64	5	3	0.207	0.030	104.07	13.37	138.	18.40	180.60	24.74	7.21	10.36	0.15	14.46	0.28
2907	8	F1+s	64	7	2	0.117	0.013	142.40	13.90	161.	16.32	203.70	24.13	9.40	13.51	0.43	13.00	0.82
2907	14	F1+s	64	7	2	0.106	0.030	238.60	20.15	282.	29.10	308.70	40.70	19.71	23.55	0.11	21.95	0.62
2907	18	F1+s	64	7	3	0.064	0.019	174.18	17.11	211.	20.44	274.50	30.03	11.88	19.12	0.36	29.47	0.35
0208	8	F2h	96	3	2	0.407	0.017	90.60	14.28	112.	18.26	159.56	24.65	7.78	10.87	0.67	22.58	0.93
0208	14	F2h	96	3	3	0.363	0.020	106.82	14.04	129.	16.70	172.10	27.78	9.94	12.27	0.63	17.00	0.07
0208	18	F2h	96	5	3	0.313	0.030	98.60	12.00	126.	14.30	161.30	17.70	2.45	4.42	0.15	17.83	0.46
0508	8	F2s	96	7	2	0.169	0.016	127.30	24.70	146.	29.80	176.30	27.80	10.23	15.55	0.22	8.65	0.72
0508	14	F2s	96	7	3	0.150	0.013	243.03	31.93	287.	43.43	333.16	62.85	20.53	26.28	0.38	18.30	0.71
0508	18	F2s	96	7	3	0.142	0.019	200.96	29.96	251.	28.59	316.66	33.97	13.20	15.69	0.02	30.80	0.10
1008	8	F2+h	133			0.434	0.041	92.30	17.70	113.	25.30	160.11	39.50	5.65	8.87	0.56	23.38	1.16
1008	14	F2+h	133			0.368	0.022	112.62	8.70	141.	12.45	178.00	14.62	7.42	11.23	0.63	14.98	0.07
1008	18	F2+h	133			0.250	0.000	94.77	15.70	119.	20.14	139.00	31.90	5.84	9.40	0.15	16.58	0.46
1608	8	F2+s	133			0.149	0.000	176.60	15.30	201.	19.50	245.80	25.90	12.93	16.11	0.22	13.13	0.72
1608	14	F2+s	133			0.109	0.000	250.90	21.80	295.	25.20	341.00	29.70	19.45	23.84	0.38	22.54	0.71
1608	18	F2+s	133			0.130	0.000	195.70	18.04	236.	30.10	282.90	30.50	14.59	19.01	0.02	31.08	0.10

moy : valeur moyenne,

ec : écart-type

xig : réflectance mesurée à partir de la grue à 19 m de la surface (30 points)

xit : réflectance mesurée à 1m du sol (30 points)

hum : humidité volumique moyenne (10 points)

cum : pluies cumulées en mm

## Liste des Figures

Fig.1. Principaux facteurs influençant la dégradation structurale de la surface du sol. (d'après Y.PEYRE, 1980).	20
Fig.2. Variation de l'infiltrabilité de la couche superficielle en fonction des pluies cumulées. (BOIFFIN, 1984).	24
Fig.3. Variation des principaux paramètres définis par BOIFFIN, observés sur une placette de 35 cm/ 50 cm.	24
Fig.4. Exemple de transect obtenu avec un rugosimètre, et paramètres utiles pour le calcul d'indices.	26
Fig.5. Histogramme des pentes (d'après C.KING, 1979)	26
Fig.6. Variation de l'indice D (dimension fractale), en fonction des stades de dégradation définis suivant la terminologie de BOIFFIN. (d'après BERTUZZI, 1989).	26
Fig.7. Exemple d'analyse de Fourier sur un transect de rugosité (d'après P.BROUSSARD, 1985).	30
Fig.8. Variation des surfaces ombrées suivant l'angle d'observation.	32
Fig.9. Géométrie d'une surface artificielle ombrée, pour le calcul des coefficient RF et SCm. (d'après CIERNIEWSKI, 1988).	33
Fig.10. Principe d'acquisition des données de rugosité suivant le système Clémentina. (d'après C.KING, 1979).	34
Fig.11. Description géométrique de la réflexion sur une surface élémentaire.	38
Fig.12. Variation de la réflectance du sol à différents angles de visée du radiomètre. (d'après Guyot, 1983). Indicatrices de réflectance	38
Fig.13. Variation de la réflexion suivant la rugosité de la surface.	39
Fig.14. Relation entre la taille des particules et la réflectance à 1000nm.(Bowers, 1965).	43
Fig.15. Courbes de réflectance de sols organiques a) et peu organiques b), où l'humidité et la rugosité varient. (d'après GIRARD M-C, BIALOUSZ, 1977)	44
Fig.16. Comparaison de la luminance d'une surface éclairée et de la même surface ombrée, à la même heure de la journée. (Yost, Wenderoth, 1969)	45
Fig.17. Variation du coefficient de rétrodiffusion en fonction de l'angle d'incidence sur des surfaces de rugosité différentes. (d'après Ulaby et al, 1971).	46
Fig. 18. Variation du facteur de réflectance en fonction du coefficient d'ombrage SCm. (CIERNIEWSKI, 1988)	47
Fig.19. Distributions des principaux constituants et des coordonnées Munsell des 84 échantillons.	58
Fig.20. Principales phases que subit l'échantillon de sol.	62

Fig.21. Principales formes de courbes spectrales rencontrées dans le visible a) et dans le proche infra-rouge b).	65
Fig.22. Intégrales des principales courbes dans le visible.	67
Fig.23. Projection des 84 échantillons suivant les 2 premiers axes de l'analyse factorielle de correspondance faite entre les constituants et les réflectances dans le visible	71
Fig.24. Relation entre la matière organique et la réflectance à 650 nm , et regroupement en fonction des formes de courbes dans le visible a) et des clartés Munsell des échantillons b).	74
Fig.25. Relation entre le fer total et la réflectance à 900 nm. Regroupement des points en fonction des formes de courbes dans le visible a) et des clartés Munsell des échantillons b).	74
Fig.26. Relation entre le calcaire et la réflectance à 450 nm .	74
Fig.27. Répartition des 84 échantillons suivant le codes de chacune des variables SK, RF et SO.	79
Fig.28. Répartition des différentes teneurs en calcaire, matière organique et fer total des 84 échantillons suivant le code des variables choisies pour DIMITRI.	79
Fig.29. Résultat des tris effectués successivement par rapport à la référence calcaire(42) et à la référence organique(59).	80
Fig .30. Résultat du tri effectué à partir des trois références prises simultanément .	82
Fig.31. L'espace des couleurs Munsell et ses coordonnées cylindriques.	84
Fig.32. Relation entre la clarté Munsell et les constituants : le calcaire a) et la matière organique b) .	86
Fig.33.Distribution des valeurs de clarté , pureté et teinte des échantillons à l'état humide et à l'état sec.	86
Fig.34. Déplacement des valeurs de clarté et de pureté de quelques échantillons lors du passage sec à humide sur une même planche Munsell.	87
Fig.35. Relation entre l'humidité pondérale de quelques échantillons à différents pF et la clarté Munsell correspondante à chaque état.	88
Fig.36. Comparaison des courbes spectrales modélisées et des courbes spectrales mesurées avec le spectrophotomètre de quelques échantillons.(Escadafal, 1989)	91
Fig.37. Courbes de deshydratation obtenues sur quelques échantillons de couleur et de composition variées.	93
Fig.38. Relation entre le pourcentage d' argile et l'humidité pondérale de quelques échantillons à différents pF.	92
Fig.39. Relation entre la teneur en matière organique et l'humidité pondérale de quelques échantillons à différents pF.	92
Fig.40. Variation des écarts de réflectances entre les états secs et humides de 400 à 700 nm de quelques échantillons de couleurs et de compositions diverses.	95

Fig.41. Relation entre l'humidité pondérale des échantillons à différents pF et la réflectance à 1950 nm .	94
Fig.42. Relation entre la réflectance à 1950 nm des échantillons secs (pF6) et la différence des réflectances à 1950 nm entre les échantillons secs (pF6) et humides (pF1).	94
Fig.43. Effet de l'humidité sur les relations établies entre la matière organique et la réflectance à 650 nm a) et entre la clarté et la réflectance à 550 nm b).	96
Fig.44. Dispositif expérimental de la parcelle d'Avignon.	102
Fig.45. Evaluation des surfaces intervenant dans la mesure de réflectance suivant les variations d'angles de visée.	108
Fig.46. Positions relatives du soleil et du radiomètre pour les différentes mesures effectuées.	110
Fig.47. Variation des valeurs d'humidité volumique du 20/07 au 16/08/88 pour les différentes phases de BOIFFIN à 8h, 14h, 18h.	114
Fig.48. Différentes situations d'éclairement et d'observation d'un profil théorique.	117
Fig.49. Histogrammes des niveaux numériques des photographies des états de surface numérisées .	119
Fig.50. Différents essais de modélisation en trois dimensions de la surface à partir des profils relevés avec le rugosimètre dans deux directions perpendiculaires.	119
Fig.51. Variation de la réflectance mesurée à partir de la grue suivant trois critères de rugosité différents du 20/07 au 16/08/88 sur les états ressuyés à 14h pour un angle de visée de 0°.	124
Fig.52. Variation des réflectances prises au sol à 1m de hauteur du stade F0 au stade F2+ sur des états ressuyés à 14h à 0°.	124
Fig.53. Variation de la réflectance des stades F0 à F2+ sur des états ressuyés et humides.	126
Fig.54. Variation de la réflectance dans le proche infra-rouge en fonction de l'humidité volumique moyenne des états de surface rencontrés du 20/07/88 au 16/08/88 à 8h , 14h et 18h.	126
Fig.55. Variation de la réflectance du stade F0 à F2+ suivant les conditions d'éclairement à 8h, 14h et 18h sur des états ressuyés.	128
Fig.56. Variation de la réflectance (pIR) en fonction du coefficient d'ombrage calculé à 8h 14h et 18h, pour des angles de visée du radiomètre de 0°.	128
Fig.57. Variation de la réflectance (pIR) à 14h sur des états ressuyés des stades F0 à F2 aux différents angles de visée du radiomètre (0°, 15°, 23°, 40°) dans le plan perpendiculaire aux rayons solaires a) et dans le plan parallèle aux rayons solaires b).	130
Fig.58. Variation de la réflectance des stades F0 à F2+ lorsque les conditions d'éclairement (8h, 14h, 18h) et les conditions d'observation (0°, 15, 23, 40°) changent.	131



Fig.59. Variation de la réflectance suivant la taille initiale des agrégats et évolution de ces variations au cours de la dégradation structurale.	137
Fig.60. Evolution de la réflectance au cours du temps de quelques placettes de granulométrie différente .	138
Fig.61. Dispositif expérimental des 42 parcelles de Versailles.	140
Fig.62. Evolution de la réflectance de quelques parcelles de Versailles au cours de leur dégradation structurale.	144
Fig.63. Résultats des ACP calculées à partir des réflectances dans les trois bandes spectrales (V, R, pIR) pour les stades F0 , (a) et F2 , (b).	146
Fig.64. Comparaison des réflectances des parcelles 12 et 17 à différents angles de visée du radiomètre et suivant deux azimuths, N-S, et E-O.	153
Fig.65. Evolution de la réflectance des placettes bêchées de F0 à F2	155
Fig.66. Evolution de la réflectance des placettes tamisées de F0 à F2.	155
Fig.67. Comparaison de l'évolution de la réflectance des placettes tamisées à 2mm et des placettes bêchées des stades F0 à F2.	155
Fig.68. Effet de la pente sur la réflectance bidirectionnelle de surfaces rugueuses.(ESCADAFAL, 1989)	171
Fig.69. Variation de la réflectance des stades F0 à F2 pour une parcelle semée en betterave sur plateau limoneux.	172
Fig.70. Réflectances de quelques états de surface rencontrés sur les parcelles agricoles .	172
Fig.71. Variation de réflectance de parcelles agricoles travaillées différemment ou de nature pédologique diverse pour différents stades structuraux.	172
Fig.72. Corrélation entre les différents niveaux d'investigation de la surface du sol (exemple d'Orléans)	174
Fig.73. Projection des couleurs Munsell de deux teintes sur le plan RG (a) et RB (b) de l'espace CIE.(ESCADAFAL, 1989)	175
Fig.74. Distribution des 84 échantillons de sols et de leur couleur suivant le rapport des réflectances à 450nm et à 750 nm.	176
Fig.75. Variation du rapport de réflectances 450/750nm en fonction de l'humidité.(spectro)	179
Fig.76. Variation du rapport R/pIR en fonction de l'humidité.(Cimel)	178
Fig.77. Variation du rapport R/pIR en fonction de la hauteur du soleil sur des états humides a) et ressuyés b) pour un même état de rugosité.(Cimel)	180
Fig.78. Variation du rapport R/pIR en fonction de la rugosité à 14h sur des états ressuyés.(Cimel)	178
Fig.79. Comparaison des transects des parcelles calcaires et battantes obtenus sur des images Spot.	191
Fig.80. Evolution des formes à la surface d'une placette.	192



**Fig.81. Comparaison de l'hétérogénéité à l'intérieur d'une fenêtre de taille variable, des parcelles calcaires et battantes.** 192

**Fig.82. Répartition des différentes unités délimitées sur Spot a) et sur les photographies des états de surface numérisés b) en fonction des paramètres S et P** 195

## TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	7
RESUME	9
INTRODUCTION GENERALE	13
<b>Chapitre 1 : Dégradation structurale de la surface du sol et télédétection</b>	17
I . Dégradation structurale de la surface du sol	19
<u>A. Définition et conséquences agronomiques</u>	19
1. Notion de structure et de stabilité structurale	21
2. Principaux facteurs et phénomène de battance	21
3. Conséquences agronomiques , phénomène d'érosion	22
<u>B.Etude des mécanismes et description</u>	23
1. Le modèle de Boiffin	23
2. Les mécanismes	23
3.Les méthodes de description	25
3.1. L'approche qualitative	
3.2. L'approche quantitative	
Conclusion de la partie I	34
II. Comportement spectral des sols: quelques rappels des principes en télédétection	36
<u>A. Les principales mesures utilisées</u>	36
<u>B. Les facteurs de variations des mesures spectrales</u>	38
1. Les facteurs extrinsèques	38
2. Les facteurs intrinsèques	39
2.1. Notion de rugosité, le critère de Rayleigh	
2.2. le phénomène d'absorption	
2.3. Rôle des facteurs intrinsèques du sol	
<u>C. Relation rugosité- réflectance</u>	41
1. Relations établies à partir de mesures faites au laboratoire	41
2. Relations établies à partir de mesures sur le terrain	43
3. Approche quantitative, proposition de modèles	45
Conclusion de la partie II	
Conclusion du chapitre 1	49
<b>Chapitre 2: Effet des facteurs intrinsèques du sol sur la réflectance (étude faite sur des échantillons au laboratoire)</b>	53
<u>A.Expérimentation</u>	55
1. Présentation des échantillons de sols étudié	55
2. Mesure du facteur de réflectance, spectrophotométrie	59
2.1. Principe de l'appareil	
2.2. Expérimentation	
2.3 Dispositif mis en place pour l'étude d'échantillons humides	
2.4 . Tests de vérification	

2.5 .Contraintes de l'expérience	
2.6. traitements des courbes de réflexion obtenues	
discussion	63
<b>B. Résultats: Etude des relations réflectance- constituants- couleur- humidité</b>	<b>64</b>
1.Analyse des principales formes de courbes spectrales rencontrées	64
1.1. Rappel bibliographique	
1.2. Différentes formes de courbes rencontrées	
1.3. Essai de modélisation des formes de courbes spectrales dans le visible	
Conclusion	70
2. Relations réflectance - constituants ( regressions modélisations)	72
2.1. traitements statistiques	
2.2. relation entre la réflectance à 650 nm et la matière organique	
2.3. relation entre la réflectance à 900 nm et le fer total	
2.4. relation entre la réflectance à 400 nm et le calcaire	
Conclusion	76
3. Application du modèle DIMITRI	77
3.1. Principe du modèle	
3.2. choix des variables	
3.3. choix des références	
3.4. classement effectué	
a) tri effectué à partir d'une seule référence	
b) tri effectué à partir de 3 références	
Conclusion	83
4. Importance de la variable couleur sur la réponse spectrale des sols	84
4.1. Intérêt pour les sols et principe de la charte Munsell	
4.2. Relation avec les constituants	
4.3. Variation de la couleur en fonction de l'humidité	
4.4. Relations avec les propriétés spectrales, modélisation	
a) rappel des éléments de colorimétrie	
b) calcul de la couleur d'après les courbes spectrales	
c) inversion du modèle	
Conclusion	91
5. Rôle de l'humidité sur la réflectance	91
5.1. Comportement des sols étudiés à différents stades d'humidité	
5.2. Effet de l'humidité sur la réflectance	
a) Effet de l'humidité sur la réflectance aux bandes d'absorption de l'eau	
b) Effet de l'humidité sur la réflectance dans le domaine du visible	
conclusion	
conclusion du chapitre 2	97

<b>Chapitre 3: Suivi de la dégradation structurale de la surface du sol par la réflectance (Etudes faites sur des sites expérimentaux)</b>	99
. Rappel des objectifs	
<b>I. Suivi de la dégradation structurale de la surface du sol sous pluies simulées. Variation des facteurs extrinsèques, (Expérience d'Avignon)</b>	103
<u>A. Description du dispositif expérimental</u>	103
1. Caractérisation de la parcelle et préparation	103
2. Les appareils et techniques utilisés	105
2.1 La rampe d'irrigation	
2.2. Le rugosimètre Laser	
2.3. Les photographies de surface, numérisation et traitement d'images	
3. Les mesures spectrales	107
3.1. le radiomètre Cimel, principe	
3.2. mesures au sol	
3.3. mesures faites à partir de la grue	
<u>B. Résultats: Quantification des phases de BOIFFIN: Elaboration d'un modèle de référence</u>	113
1. Caractérisation des différents états de surface par des méthodes classiques.	113
1.1. Les phases de Boiffin	
1.2. les mesures d'humidité de surface	
1.3. Les indices de rugosité	
Conclusion	120
2. Caractérisation des états de surface par la réflectance	121
2.1. Vérifications préliminaires	
a. Homogénéisation des mesures radiométriques	
b. Corrélation réflectance grue/réflectance terrain	
c. Représentativité des placettes d'observation par rapport à la parcelle	
d. Extrapolation des valeurs manquantes	
2.2. Variation de la réflectance au cours de la dégradation structurale	
a. 1er cas simple: Position du modèle de référence, 14h, 0°, états ressuyés	
b. Influence de l'humidité sur le modèle de référence, 14h, 0°, états ressuyés et humides	
c. Variation des conditions d'éclairement, 0°, états ressuyés	
d. Variation des angles et azimuths de visée, 14h, états ressuyés	
e. Variation des angles de visée et d'incidence, états ressuyés	
Conclusion	133
<b>II. Suivi de la dégradation structurale de la surface sous pluies naturelles. Variations des facteurs intrinsèques. (Expériences de Grignon et de Versailles)</b>	135
1. Variation de la rugosité initiale, expérience des placettes artificielles de Grignon	135
1.1. Effet de la taille des agrégats sur la réflectance	
1.2. Evolution de la réflectance au cours de la dégradation de la surface	
Conclusion	141
2. Variation de la couleur et de la composition, Expérience des 42 parcelles	141
2.1. Présentation du site	

2.2. Les diverses expérimentations de 1987 à 1988	
a. Les mesures du printemps 1987	
b. Traitement de quelques cas particuliers, résultat du printemps 1988	
b.1. Etude de quelques échantillons ,analyse au spectrophotomètre	
b.2. Etude de placettes tamisées, mesures radiométriques	
b.3. Variation de la réflectance sur des les placettes ombrées	
b.4. Variation de la réflectance lorsque les angles de visée changent	
b.5. Variation de la réflectance au cours de la dégradation structurale sur des placettes tamisées et bêchées	
Conclusion	156
<b>CHAPITRE 4: Extension des observations et mesures de surface à des parcelles agricoles, analyse spatiale des états de surface</b>	157
<u>A. Présentation des sites étudiés et expérimentation</u>	160
1. Présentation des sites	160
1.1. Le Pays de Caux	
1.2. Le Soissonnais	
1.3. Mesures ponctuelles dans l'Aisne et l'Orléanais	
2. Mesures effectuées sur le terrain	162
3. Les données satellitaires	163
<u>B. Résultats: Observations et mesures de surface sur des parcelles agricoles</u>	164
1. Contraintes et problèmes rencontrés	164
2. Rôle des facteurs topographie et pratiques culturales sur la vitesse de dégradation structurale de la surface	165
3. Les marques d'érosion observées sur le terrain	165
4. Les mesures radiométriques	170
4.1. Variations entraînées par les pratiques culturales au stade F0	
4.2. Variations dues à la topographie (effet de pente)	
4.3. Evolution des parcelles dans le temps, suivi par la réflectance	
5. Corrélation avec les images Spot	173
5.1. Etude canal par canal	
5.2. Combinaison de deux canaux, les droites des sols	
a. résultats obtenus au laboratoire	
a.1. Variation des rapports de réflectance et corrélation avec la clarté	
a.2. Variation du rapport de réflectance 450/750 en fonction de l'humidité	
b. résultats obtenus sur le terrain	
b.1. Variation du rapport R/pIR en fonction de l'humidité	
b.2. Variation du rapport R/pIR en fonction des hauteurs solaires	
b.3. Variation du rapport R/pIR en fonction de la rugosité	
c. résultats obtenus sur les images Spot	
Conclusion	181
<u>C. Analyse spatiale évolution dans le temps et dans l'espace des états de surface</u>	185
1. Etude diachronique d'images Spot	185
2. Analyse spatiale des états de surface	189
2.1. perception des limites, notion de contraste et d'hétérogénéité	
2.2. Quantification des formes	
Conclusion	199

<b>Bilan de l'étude</b>	201
<b>Conclusion générale</b>	209
<b>Références bibliographiques</b>	213
<b>Annexes</b>	223
<b>Liste des figures</b>	229
<b>Table des matières</b>	235