

Quelques aspects de l'interaction sol-végétation en télédétection

André COMBEAU et Régine CHAUME

Atelier de Télédétection et Pédologie — 70-74 route d'Aulnay, 93140 Bondy

RÉSUMÉ

A partir de comparaison entre données de simulation SPOT et données LANDSAT, quelques aspects pratiques de l'interaction sol-végétation sont étudiés : évolution saisonnière de cette interaction, cas particulier d'une région soumise à un assolement biennal, incidences du dessèchement des végétaux en fin d'été, manifestations de l'hétérogénéité d'un milieu à travers la végétation qui le recouvre.

MOTS-CLÉS : Télédétection — Simulation SPOT — LANDSAT — Interaction sol-végétation.

ABSTRACT

A FEW ASPECTS CONCERNING THE INTERACTION BETWEEN SOIL AND VEGETATION IN REMOTE SENSING

Some practical aspects of the interaction of soil vegetation can be studied, when simulation SPOT and LANDSAT data are compared together : seasonal evolution, the particular case of an area which is subjected to a biennial rotation, incidences of plants withering during the end of summer, the heterogeneity of the environment, can be observed through the vegetation which overlays it.

KEY WORDS : Remote sensing — SPOT simulation — LANDSAT — Soil-vegetation relationship.

INTRODUCTION

Dans les zones sur lesquelles on ne dispose d'aucune vérité-terrain, l'interprétation de l'imagerie satellite fait largement appel à la partition de l'histogramme bidimensionnel des luminances. Il a paru utile de rappeler les raisons et d'envisager les conséquences de cette démarche en exploitant les données d'un cas concret connu dans le détail.

1. LES COURBES DE RÉFLECTANCE

Un milieu déterminé peut être caractérisé par sa courbe de réflectance dressée point par point en laboratoire grâce à un spectro-photomètre, ou sur le terrain avec un radiomètre portatif. Cette courbe exprime le pourcentage de lumière réfléchi par le milieu étudié pour chaque valeur de la longueur d'onde, à la fois

dans le domaine de la lumière visible et de part et d'autre de celui-ci.

L'examen de ces courbes conduit à un certain nombre de remarques :

A. Sur les milieux dépourvus de végétation (sols nus en particulier), on obtient dans la grande majorité des cas, une courbe croissant, plus ou moins régulièrement, avec la longueur d'onde, de sorte qu'il semble exister une certaine proportionnalité entre les réflectances sur les basses et les hautes longueurs d'onde. Les positions respectives des courbes de réflectance obtenues sur des sols différents, ou sur un même sol dans des états différents, sont fonction, d'une part de la teinte du sol, d'autre part de son degré d'humidité (fig. 1). Si l'on traduit ce résultat en termes de luminance mesurée sur les longueurs d'onde des capteurs classiques des satellites LANDSAT, il est possible d'adopter une repré-

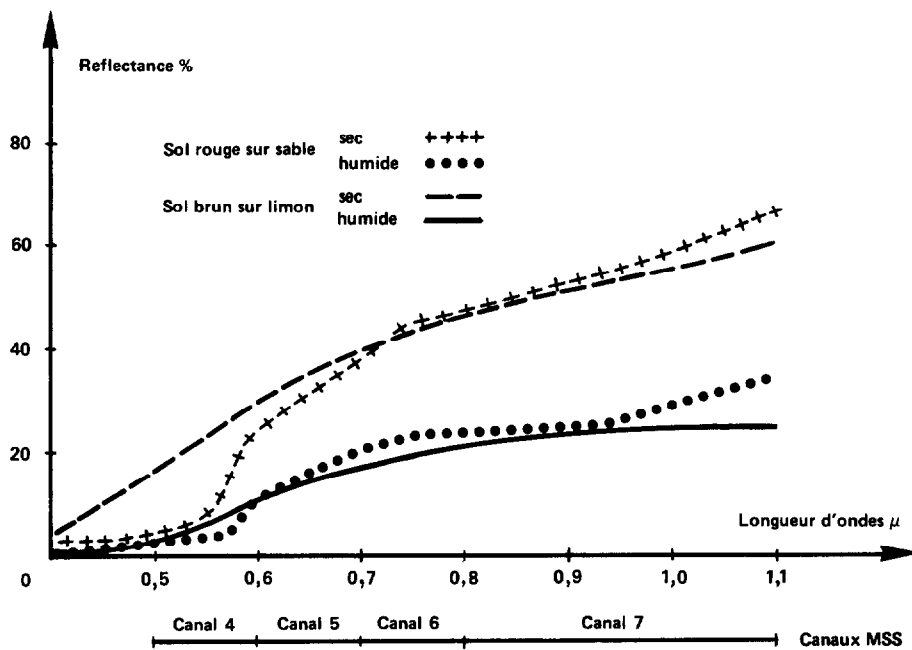


FIG. 1. — Courbes schématiques de réflectance de deux types de sols.

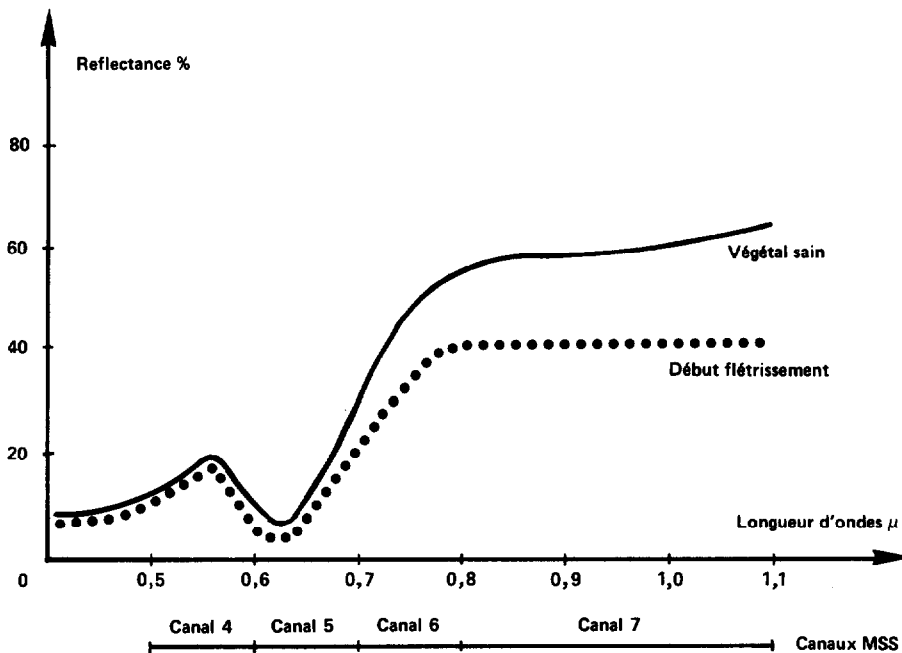


FIG. 2. — Courbes schématiques de réflectance d'une végétation.

sentation graphique dans le plan, par exemple, des canaux 5 et 7 de LANDSAT. Cette représentation est généralement qualifiée d'histogramme bidimensionnel. On observe alors que les points représentatifs de diverses surfaces de sols, ou de différents états d'une même

surface constituent dans le système de coordonnées 5/7 un nuage très allongé traduisant l'existence d'une régression linéaire entre les luminances enregistrées sur les 2 canaux. La position de la droite de régression obtenue, généralement dénommée « droite des sols nus »,

est fonction du système de numération des luminances : dans le cas des données USGS, la droite des sols nus fait un angle de 60° environ avec l'horizontale dans le système 5/7, alors que, pour les données Télésazio, l'angle est de l'ordre de 45°.

B. Sur les milieux constitués d'un couvert végétal dense, la courbe représentant la réflectance en fonction de la longueur d'onde n'est pas monotone : on observe le passage par un minimum entre 0,6 et 0,7 μ , conséquence d'une absorption de la lumière par la chlorophylle, dans le domaine du rouge correspondant au canal 5 de LANDSAT. Par contre, pour les longueurs d'onde du proche infrarouge correspondant au canal 7, la réflectance peut-être très élevée (fig. 2). Si l'on adopte le système de représentation bidimensionnelle évoqué plus haut, dans le plan des canaux 5 et 7, il s'ensuit que les milieux végétaux se localiseront dans une zone différente de celle des sols nus, le nuage de points de l'histogramme bidimensionnel se rapprochant de l'axe du canal 7. La dispersion de ce nuage sera fonction de plusieurs facteurs : type de couvert végétal, état physiologique, structure du toit de la végétation.

Dans le cadre d'une expérience de simulation SPOT réalisée en septembre 1980, nous disposons à la fois de données radiométriques et d'une vérité-terrain précise, recueillie le jour même de l'expérience et s'appuyant sur des photos prises simultanément au sol. Par ailleurs, le secteur de l'expérience ayant été survolé le jour même par LANDSAT, il s'avère possible d'établir des comparaisons dans de bonnes conditions. Il a semblé intéressant de tester les phénomènes d'interaction sol-végétation à partir de ce cas concret doté par ailleurs d'une assez grande diversité.

2. LE SITE DE L'EXPÉRIENCE ET LES THÈMES REPRÉSENTÉS

Le site de la simulation SPOT Ermenonville 1980 a été décrit antérieurement (COMBEAU, 1982). Pour ce qui nous concerne aujourd'hui, nous n'en retiendrons que les éléments essentiels :

— Ce site comporte un secteur cultivé, assez représentatif des plateaux sur loess du centre du bassin parisien, et un secteur forestier sur calcaire de St-Ouen et sur sables de Beauchamp.

— Dans le secteur cultivé, compte tenu de la date de l'expérience (28 septembre) et du calendrier agricole de la région, les divers types d'occupation du sol sont les suivants (fig. 3) :

- des sols nus (en fait des chaumes, déchaumages ou labours) sur les parcelles en céréales moissonnées en août précédent (40 % de la superficie) ;

- des parcelles en betteraves (la récolte venait de commencer) (24 % environ) ;
 - des parcelles en maïs (10 % environ) dont la récolte commencera 2 ou 3 semaines plus tard ;
 - quelques parcelles comportant des engrais verts (4 % environ) ou des cultures diverses (colza, prairies artificielles...) ;
 - des occupations accessoires (bâtiments, routes,...).
- Dans le secteur forestier, on peut distinguer des zones sur sables occupées par des résineux (pin sylvestre) et des zones planes sur éléments issus du calcaire, occupées par des feuillus (chêne et hêtre).

Dans ces conditions, la liste des unités paysagiques du site s'établit ainsi :

A. Les sols nus. Ce sont les sols labourés et hersés, sans aucune trace de végétation. Dans la plupart des cas, ces sols sont en position de plateau, et caractérisés par une teinte brune assez claire. Mais on observe à la surface du plateau l'individualisation d'un réseau d'axes de drainage sous forme de dépressions peu profondes analogues à des « vallées sèches » d'une largeur inférieure à 100 m. La teinte du sol de ces dépressions est alors beaucoup plus pâle. En outre, lorsque ces axes de drainage s'approfondissent (vers l'aval) on voit affleurer sur les hauts de versants des plages de teinte brun sombre dont on peut penser qu'elles correspondent à des affleurements d'horizons plus argileux surmontant le calcaire sous-jacent au limon de plateau. Par ailleurs, l'état de la surface des sols nus dépend des façons culturales récentes : on peut distinguer 2 cas, celui des sols labourés, à structure grossière, celui des sols labourés et hersés, à structure plus fine et à surface beaucoup moins irrégulière.

La seule appellation « sols nus » recouvrira donc six unités paysagiques au moins :

- Sols nus, à structure grossière, de teinte brun foncé 1a
- Sols nus, à structure grossière, de teinte brune 1b
- Sols nus, à structure grossière, de teinte brun très clair 1c
- Sols nus, à structure fine, de teinte brun foncé 1d
- Sols nus, à structure fine, de teinte brune 1e
- Sols nus, à structure fine, de teinte brun très clair 1f

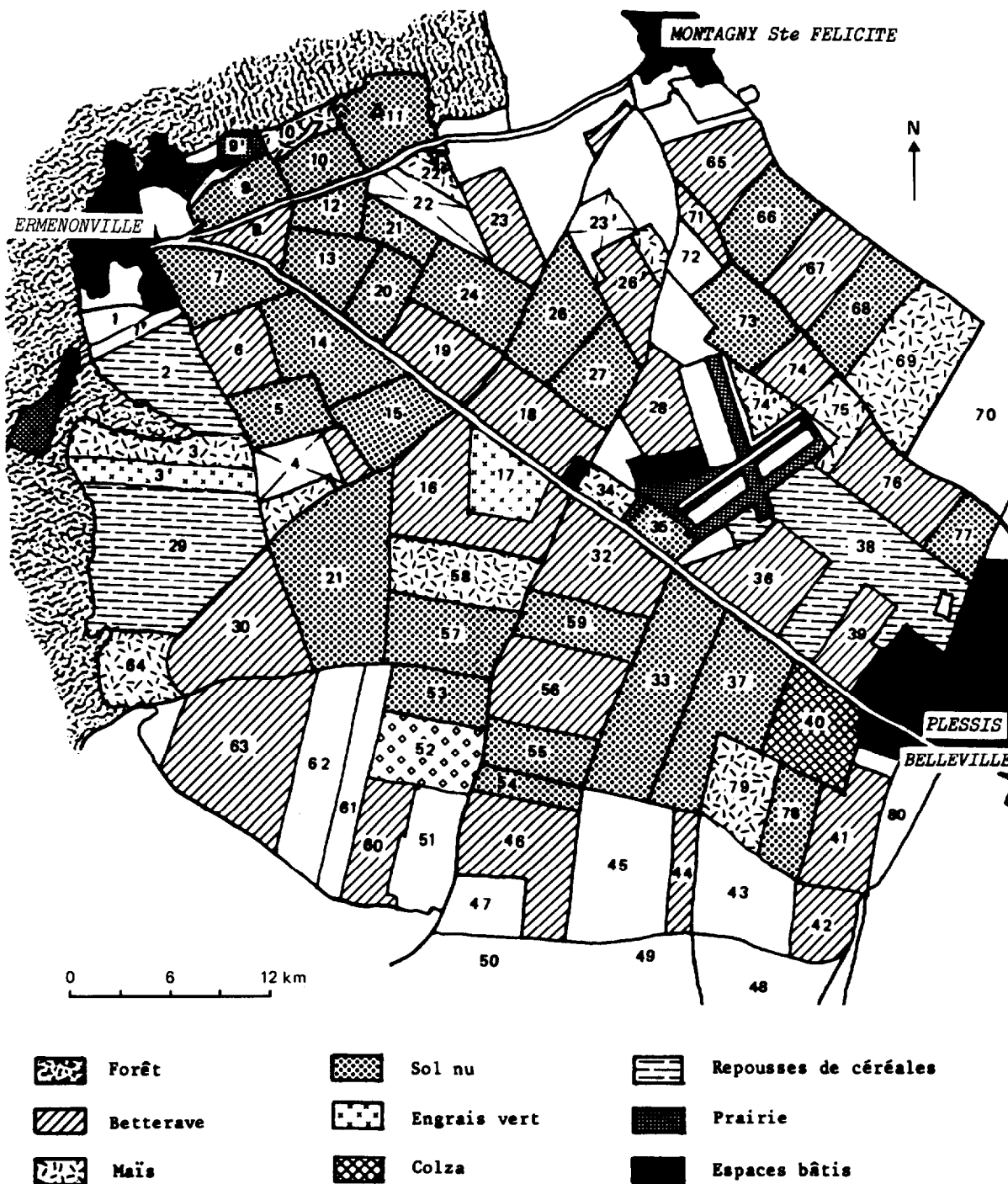
Faute de données sur l'humidité des sols lors de l'expérience, il n'est pas possible de pousser plus loin la discrimination des unités, ce qui aurait certes présenté un grand intérêt.

Les unités 1a, 1b, et 1c sont représentées dans la parcelle 37, les unités 1d, 1e et 1f dans la parcelle 15.

B. Les sols à couvert végétal continu

a. Cultivé. On peut y distinguer 4 unités différentes :

- Les betteraves, à couvert très dense fin septembre
Unité 2a1



Échelle approximative 1/30 000

FIG. 3. — Carte d'occupation des sols au 28/09/80. Simulation SPOT Ermenonville.

— Le maïs, à couvert dense, maïs à un stade de végétation caractérisé par un début de brunissement (3 semaines avant la récolte)... Unité 2a2.

— Les prairies de bas fond, humides, à couvert végétal ras maïs dense et bien vert... Unité 2a3.

— Les pelouses sèches en position de plateau, rases, moins denses, et d'un vert moins vif... Unité 2a4.

Les exemples de ces 4 unités peuvent être localisées dans les parcelles suivantes :

— 2a1 parcelles 18, 19, 16, 32

— 2a2 parcelle 58

— 2a3 parcelles 9' et 10'

— 2a4 parking aérodrome

b. *Forestier*. Deux types principaux sont représentés :

— les parcelles sous forêt de feuillus (chêne et hêtre...),
— les parcelles sous forêt de résineux (pin sylvestre...).

A l'intérieur de chacun de ces types, le nombre des subdivisions est particulièrement élevé, en fonction de l'essence dominante, de l'âge du peuplement, du mode d'exploitation (futaie, taillis) et de la nature du sous-bois (feuilles mortes, bruyère, fougère, sol nu...).

C. Les sols à couvert végétal partiel ou discontinu

Cette catégorie comporte des subdivisions multiples.

a. *Les parcelles déchaumées*, caractérisées par la persistance en surface de fragments de paille plus ou moins abondants après passage de la déchaumeuse. Il est parfois difficile de distinguer les déchaumages des sols nus proprement dits.

Exemple : Parcelles 14, 33 Unité 3a

b. *Les parcelles à repousses de céréales*. Il s'agit de parcelles déchaumées ou non, dans lesquelles s'est produite après la moisson une germination des grains tombés au sol. On y observe donc la présence d'une proportion variable, mais généralement faible, de végétation verte en mélange avec les restes de paille.

Exemple : Parcelles 29,38 Unité 3 b

c. *Engrais vert*. Deux parcelles (3' et 17) sont occupées par un engrais vert (en l'occurrence de la moutarde) à un stade de développement peu avancé. La plante ne couvre pas encore totalement le sol, qui apparaît entre les lignes de semis. La parcelle 17 comporte une moitié Est où le stade de développement est un peu plus avancé que sur la moitié Ouest Unité 3c

d. *Colza*. Une seule parcelle (n° 40) est plantée en colza. La plante, semée en ligne, est levée depuis peu. Le couvert végétal est de l'ordre de 20 % entre lignes, et peut être de 50 % sur la ligne, de sorte que le taux de recouvrement peut être évalué (grossièrement) à 10 % Unité 3d

e. *Parcelles de betteraves en cours d'arrachage*. La

récolte des betteraves est commencée depuis 4 jours environ. Le sol des parcelles concernées est partiellement recouvert par les collets de betteraves, résidus du décolletage avant arrachage, disposés en bandes parallèles de 1 m de large environ séparés par des bandes sans végétation de 0,50 m de large. La parcelle 4 illustre cette situation, à l'exception de son extrémité Est non encore récoltée.

Par conséquent, dans les conditions de cette expérience, les états de surface du site test sont assez variés : si l'on ne prend pas en compte le secteur forestier, on peut recenser 6 états pour les sols nus proprement dits, 4 pour la végétation dense, 5 pour les situations intermédiaires, soit au total 15 thèmes distincts.

3. LES RÉSULTATS DE LA SIMULATION SPOT

3.1. La méthode

L'ensemble des résultats a fait l'objet de plusieurs publications. Nous ne retiendrons ici que les éléments essentiels pour l'illustration de l'interaction sol-végétation.

Dans ce but, on a déterminé dans chaque cas la signature spectrale du thème à partir des parcelles de référence identifiées au chapitre précédent. Dans un petit nombre de cas, l'extension du thème était telle qu'il aurait été arbitraire de s'appuyer sur une parcelle plutôt qu'une autre : ce fut le cas des thèmes betteraves et maïs, pour lesquels on a défini la signature spectrale sur l'ensemble du secteur test. Dans tous les autres cas, la signature spectrale a été déterminée sur un site précis, identifié sans ambiguïté sur le terrain : la surface couverte est alors beaucoup plus restreinte, parfois 25 pixels seulement. On a enregistré dans tous les cas les valeurs extrêmes de la distribution des luminances, la moyenne, la médiane, et les premier et neuvième déciles.

Pour interpréter les résultats, on peut se baser sur la représentation graphique des « serpents » de chacun des thèmes, et procéder à des comparaisons par couples. Compte tenu de l'objectif visé, il est préférable de raisonner sur l'histogramme bidimensionnel des luminances pour les canaux S 2 et S 3, homologues des canaux LANDSAT MSS 5 et MSS 7. Cet histogramme sera établi à partir des *valeurs extrêmes* de la distribution des luminances, mais on pourra également adopter une représentation basée sur les *premier et neuvième déciles*, sélectionnant 64 % au moins des résultats, ce qui permet de mettre davantage en évidence les différences entre thèmes.

3.2. Les résultats

3.2.1. LES SOLS NUS

Les résultats des mesures effectuées sur les 6 emplacement-tests sont représentés sur la figure 4 sous

forme d'un histogramme bidimensionnel S2/S3. L'intervalle contenant la totalité des points du site est figuré en trait plein, alors que les pointillés circonscrivent l'espace inter-déciles.

On constate que les 6 plages représentatives sont

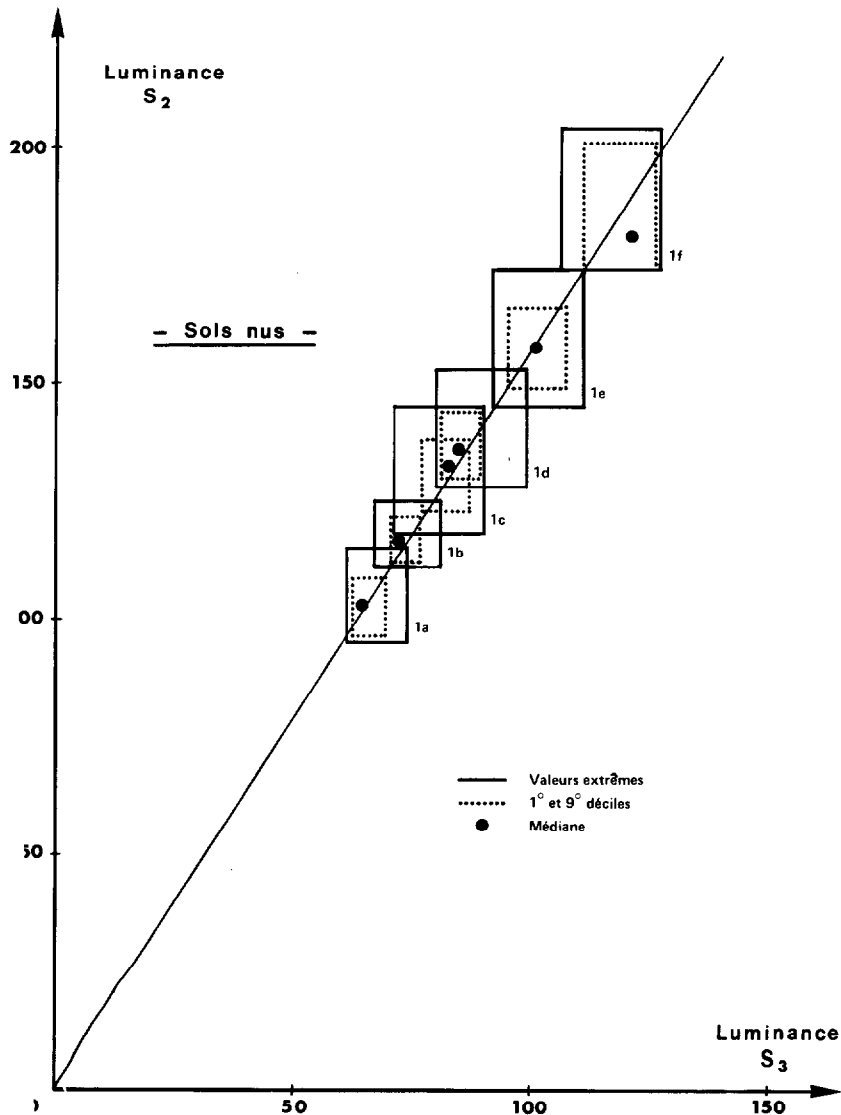


FIG. 4. — Histogramme bidimensionnel S2/S3 : sols nus.

pratiquement alignées. Si l'on se base sur les points médians de chaque plage, on peut considérer que la droite sur laquelle ils s'alignent passe par l'origine des coordonnées. La pente de cette droite est proche de 1,5, on peut la considérer comme « droite des sols nus ».

On observe en outre que l'ordre de classement des 6 zones est celui utilisé en A du paragraphe 1, ci-dessus, de 1a à 1f : il y a donc un ensemble des sols nus labourés à structure grossière, et un ensemble des sols nus hersés à structure fine. Les premiers sont caractérisés

par des luminances plus faibles que les seconds. De plus, dans chacun des 2 ensembles, un classement apparaît entre les sols de teinte foncée des hauts de versant, les sols du plateau, et les sols clairs du fond de la dépression. On constate encore que le recouvrement de chaque catégorie sur la voisine est assez faible, et que, si l'on se base sur les espaces interdéciles, le seul chevauchement perceptible est celui des types 1c et 1d.

On peut en conclure que, dans le cas des sols nus étudiés, les luminances des canaux S2 et S3 sont en corrélation les unes avec les autres et dans un rapport de 1,5/1. Les deux facteurs qui commandent cette luminosité sont, d'abord, la rugosité de la surface, et ensuite la teinte propre du sol (rappelons que le facteur humidité n'a pas été étudié).

3.2.2. LES VÉGÉTATIONS DENSES

Le type le plus caractéristique (à la date étudiée) est la betterave (2a). Le couvert est alors caractérisé par une luminosité faible sur le canal S2 (36-69) alors qu'elle est très élevée sur le canal S3 (171-223).

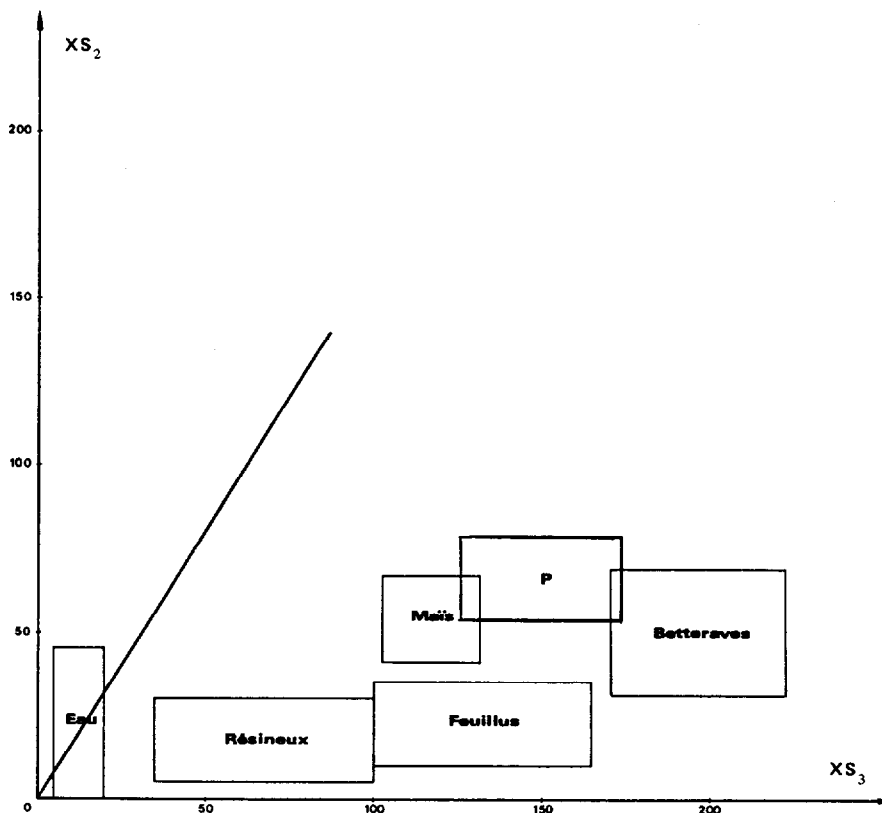
Le maïs, comme la betterave, est caractérisé par une luminosité faible sur le canal S2 (41-68), mais la lumi-

nance sur le canal S3 est sensiblement moins élevée que celle de la betterave (103-132). Ce fait doit être rattaché au début de brunissement des parties aériennes du maïs à un mois de la récolte.

La signature spectrale de la prairie humide de bas-fond (2a3) ne se distingue en rien de celle de la betterave : les deux thèmes sont donc confondus.

La pelouse sèche P (2a4) est caractérisée sur le canal S2 par une luminosité un peu plus élevée que celles de la betterave et du maïs, et, sur le canal S3 par des valeurs intermédiaires entre ces 2 cultures (129-172).

Il apparaît par conséquent que les végétations couvrantes occupent sur l'histogramme bidimensionnel S2/S3 un emplacement très nettement distinct de celui occupé par les sols nus. A titre indicatif, la figure 5 comporte également la localisation des essences forestières. Il apparaît que la localisation exacte de chaque thème sur cette figure est fonction de plusieurs paramètres : nature du végétal, type de chlorophylle (ex. : résineux, feuillus), état végétatif et plus spécialement turgescence plus ou moins poussée des tissus végétaux. On reviendra ultérieurement sur le rôle de ce dernier facteur.



3.2.3. LES VÉGÉTATIONS À COUVERT PARTIEL OU DISCONTINU

Les chaumes et déchaumages (3a) se distinguent difficilement des sols nus hersés correspondants : ils peuvent être totalement confondus avec eux, comme dans le cas de la parcelle 14, mais s'en distinguer plus ou moins nettement, comme dans le cas de la parcelle 33, par une baisse légère de la valeur de S2 et une augmentation faible de S3. D'ailleurs tous les intermédiaires existent entre un sol nu après labour et hersage, et un chaume à paille haute et dense avant passage du pulvérisateur.

Les repousses de céréales sont caractérisées par l'apparition d'une végétation verte peu dense et irrégulièrement répartie se développant sur un chaume. Ce stade est généralement fugace puisqu'il se termine par un labour de déchaumage. Selon la durée écoulée depuis le précédent déchaumage, la densité de la végétation verte est plus ou moins importante. Les résultats de la parcelle 38 montrent une légère dérive des valeurs de luminances : abaissement de S2, augmentation de S3 par rapport aux sols nus.

Les engrais verts correspondent à une colonisation du sol par la végétation un peu plus poussée que dans le cas précédent. L'engrais vert (moutarde en l'occurrence) est semé derrière les céréales fin août, et il sera enfoui par un labour fin novembre. Il n'assure une bonne couverture du sol qu'à partir de début octobre. Fin septembre, la couverture est incomplète et la surface du sol est encore bien visible à travers la végétation. Dans la parcelle 17, l'engrais vert est nettement moins développé dans la moitié Est (E2). Ces 2 parties ont été étudiées séparément. On observe que la signature spectrale est assez proche de celle de la pelouse sèche mais qu'elle s'en distingue par des valeurs plus élevées de S2 (et surtout dans la moitié ouest) et des valeurs un peu plus faibles de S3 :

— Coordonnées de S2 :	sur E1	91-109
	sur E2	78- 94
— Coordonnées de S3 :	sur E1	117-133
	sur E2	122-144

Les deux derniers thèmes intermédiaires peuvent être considérés comme des cas particuliers, en ce sens qu'ils comportent une juxtaposition de lignes sous végétation et de lignes de sols nus :

Le colza, mis en place depuis peu, a atteint le stade d'une plantule de 5 à 10 cm de haut. La largeur de la ligne de végétation peut être estimée à une dizaine de centimètres, alors que celle de l'interligne nu est de 30 à 40 cm environ. Sur une même ligne, le recouvrement par la plante est très imparfait. Le taux de recouvre-

ment global a été évalué à 10 % environ. La signature spectrale de cette parcelle la situe sur l'histogramme bidimensionnel entre les déchaumages et les repousses de céréales.

L'arrachage des betteraves, commencé depuis 4 jours, laisse sur le sol des bandes de résidus végétaux rapidement desséchés, séparés par des bandes plus étroites de sol nu (passage de roues des engins). La signature spectrale de ce thème s'apparente à celle de l'engrais vert peu développé (E1) mais s'en distingue par des valeurs plus élevées de S2.

L'ensemble de ces résultats apparaît sur la figure 6, histogramme bidimensionnel S2/S3 de la totalité des sites étudiés. Sur cette figure, dans la catégorie des sols nus, les sols nus *hersés* s'intercalent nécessairement entre les sols nus seulement labourés et les premiers stades de développement d'une végétation.

La figure 6 traduit de façon claire le passage du stade des sols nus à celui d'un sol comportant une végétation peu dense, puis au stade du sol entièrement colonisé par le végétal. Elle constitue en ce sens un mode d'expression de l'interaction sol-végétation.

Ce type de représentation illustre bien la signification de certains indices couramment utilisés pour caractériser les milieux à partir des données satellites. Le rapport 7/5 ou S3/S2 est souvent employé comme « *indice de végétation* » : ce rapport est la cotangente de l'angle déterminé d'une part par le segment joignant le point représentatif d'un pixel donné à l'origine des coordonnées, d'autre part par l'axe des abscisses (luminance sur S3 ou MSS7). Dans le cas des sols nus, cet angle correspond pratiquement à la pente de la « droite des sols nus ». Le passage progressif à des végétations de plus en plus denses se traduit par une fermeture de cet angle, donc par une augmentation de sa cotangente. L'indice compris entre 0,62 et 0,66 pour la totalité des sols nus, passe à 0,69-0,77 pour les deux parcelles déchaumées, à 0,90 pour les repousses de céréales et le colza, à 1,27 pour l'engrais vert peu dense, à 1,51 pour l'engrais vert plus dense, à 2,00 pour le maïs, 2,71 pour la pelouse, et 3,80 pour les betteraves. Cette progression est conforme à la signification d'un indice de végétation.

Par ailleurs, certains auteurs ont recours à un « *indice de brillance* » utilisé plus particulièrement pour les sols dépourvus de couvert végétal, et défini par $IB = \sqrt{(5)^2 + (7)^2}$. Cette expression n'est autre que la distance sur l'histogramme bidimensionnel 5/7 du point représentatif du pixel concerné à l'origine des coordonnées. Il apparaît que cet indice (traduit par $\sqrt{S2^2 + S3^2}$ dans le cas de SPOT) croît des sols labourés à structure grossière (122 à 157) aux sols hersés à structure fine (160 à 219), et qu'il augmente également pour un état structural donné lorsque la teinte des sols s'éclaircit

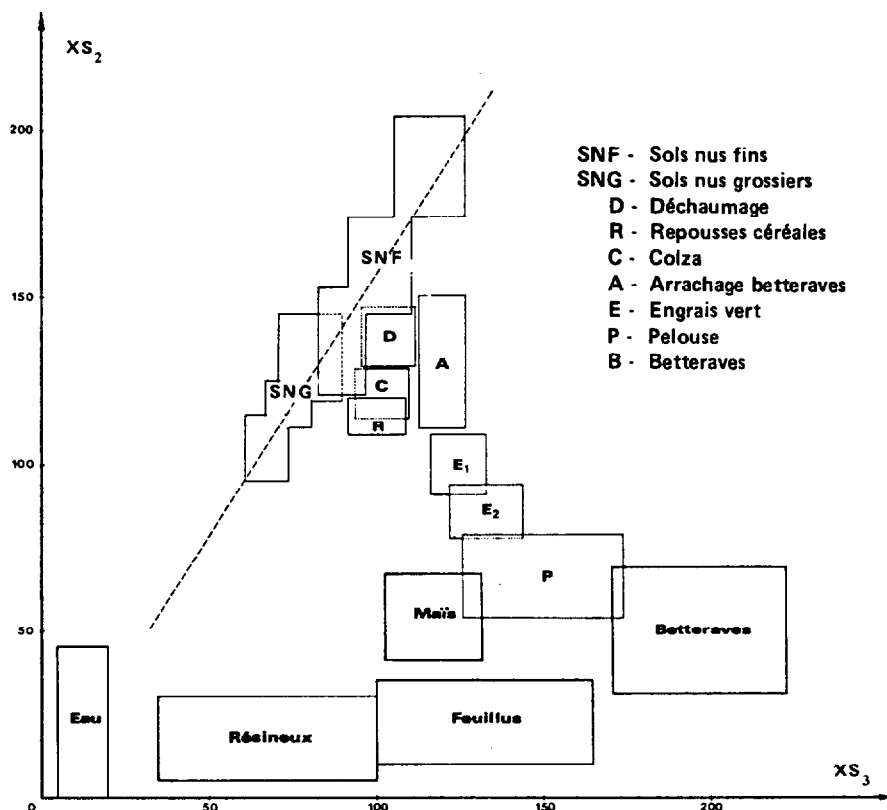


FIG. 6. — Histogramme bidimensionnel : ensemble des thèmes.

Mais on remarque également que cet indice est relativement constant pour la plupart des stades intermédiaires de développement de la végétation (150 à 160), qu'il est plus élevé pour les végétations très vertes d'une part, mais aussi pour les pailles de céréales, alors qu'il s'abaisse dans le cas du maïs en cours de brunissement. On observera accessoirement que les thèmes forêt résineuse et forêt feuillue sont caractérisés par des *indices de végétation* un peu supérieurs à celui de la betterave, mais par des *indices de brillance* nettement inférieurs plus particulièrement pour les résineux.

L'ensemble des deux indices définit par conséquent avec une certaine précision la place des thèmes étudiés sur l'histogramme bidimensionnel.

On peut encore signaler le fait que les différences du milieu ne se traduisent pas exclusivement sur les canaux S2 et S3, et que la prise en compte du canal S1 peut aussi apporter des informations, par exemple dans la discrimination des thèmes betteraves et maïs. S'il existe bien en première approximation une corrélation globale entre les valeurs de la luminance sur S1 et celle de S2, un examen plus approfondi montre que les différents

thèmes ont des comportements différents : pour une même valeur de S2, on observe que les valeurs de S1 diminuent lorsque l'on passe des betteraves au maïs, puis aux sols nus. Dans ces conditions, à l'échelle de l'ensemble de la zone d'observation, le rapport S1/S2 s'établit au voisinage de 1,20 pour les betteraves (1,12 à 1,24), de 0,85 pour le maïs, et de 0,70 à 0,75 pour les sols nus.

La figure 7 est une représentation identique à la figure 6, mais cette fois, à l'échelle des 65 000 points d'un écran de visualisation, telle qu'elle apparaît sur écran fluorescent. Cette figure montre bien l'importance relative des thèmes dominants (sols nus, betteraves, maïs représentent à eux seuls 80 % de l'image) et la part relativement limitée des thèmes intermédiaires. Il convient par ailleurs de se souvenir qu'une proportion appréciable des points situés hors des plages de forte concentration représentent en fait des pixels mixtes (ou pixels de bordure), situés aux frontières de deux milieux contrastés (sols nus, betteraves par exemple). Pour distinguer ces pixels frontières mixtes des pixels représentatifs d'un milieu incomplètement colonisé par la végétation, on aura recours à la visualisation de l'image classée.

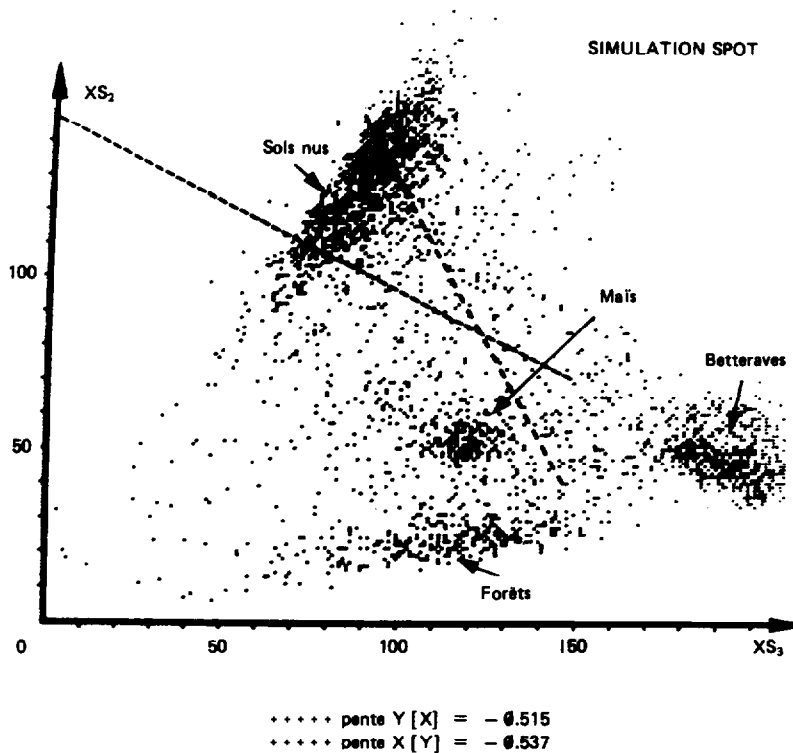


FIG. 7. — Histogramme bidimensionnel S2/S3 de l'ensemble du site test (SPOT).

4. LES RÉSULTATS DES DONNÉES LANDSAT

Au premier rang des questions soulevées par les résultats ci-dessus figure naturellement celle de la correspondance entre les données de l'opération de simulation SPOT et celles d'un satellite opérationnel, en l'occurrence LANDSAT 2. Le 28.09.1980, jour de la réalisation de l'opération Simulation SPOT, le satellite LANDSAT 2 survolait le site (Scène 215-26 du 28.09.1980) et il a été possible de délimiter assez exactement sur l'imagerie LANDSAT le périmètre d'observation de l'opération Simulation SPOT, pour procéder à une comparaison valable des 2 types de données. Le détail des résultats a été publié par ailleurs ; nous n'en retiendrons que ce qui concerne l'histogramme bidimensionnel.

L'histogramme bidimensionnel 5/7 des données LANDSAT (fig. 8) présente approximativement la même configuration que S2/S3 de SPOT, mais il se distingue par la densité et le caractère relativement homogène du nuage des points représentatifs. Cette différence de densité n'est qu'apparente : elle est due d'une part à la résolution spatiale, et d'autre part à la nature des données SPOT calculées à partir des canaux du radiomètre embarqué effectuant la simulation. Si l'on procède à un étalement du graphique LANDSAT en vue de l'amener à une échelle comparable à celle de la simulation

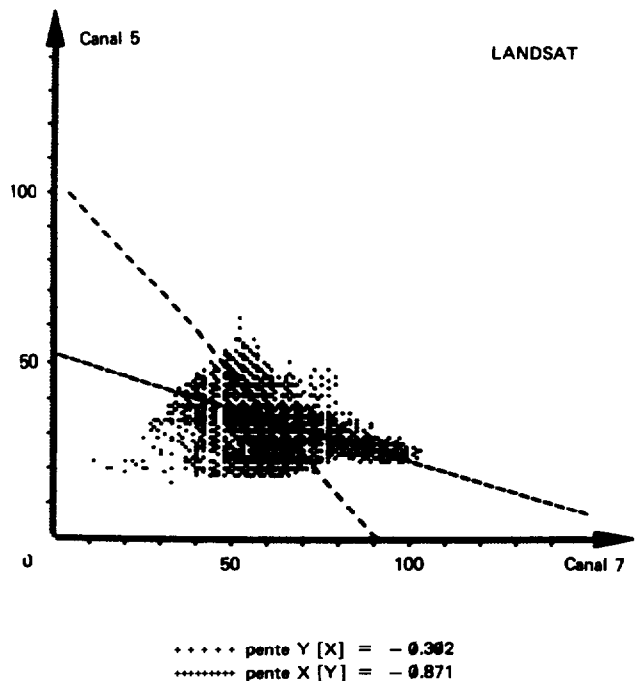


FIG. 8. — Histogramme bidimensionnel 5/7 de l'ensemble du site test (LANDSAT).

SPOT (les luminances du canal 5, initialement comprises entre 15 et 65, sont étalées entre 0 et 250 ; canal 7 : initialement 20 à 100, étalé entre 0 et 250) et si l'on affecte chaque point du graphique d'un signe traduisant l'effectif des couples de données représentés, on obtient la figure 9, sur laquelle ont été cernées les plages à haute densité de points (plus de 10 couples de données par point). Deux constatations sont possibles :

— la disposition globale de deux graphiques est la

même, et il y a donc bien analogie entre les couples de données des deux opérations ;

— les constellations obtenues pour la simulation SPOT sont plus denses, plus localisées et pratiquement exemptes de points parasites ; dans le cas de LANDSAT, il existe des points parasites nombreux, soit entre deux constellations, soit au sein même de chaque constellation (points vides en particulier).

Cette différence de comportement signifie que les

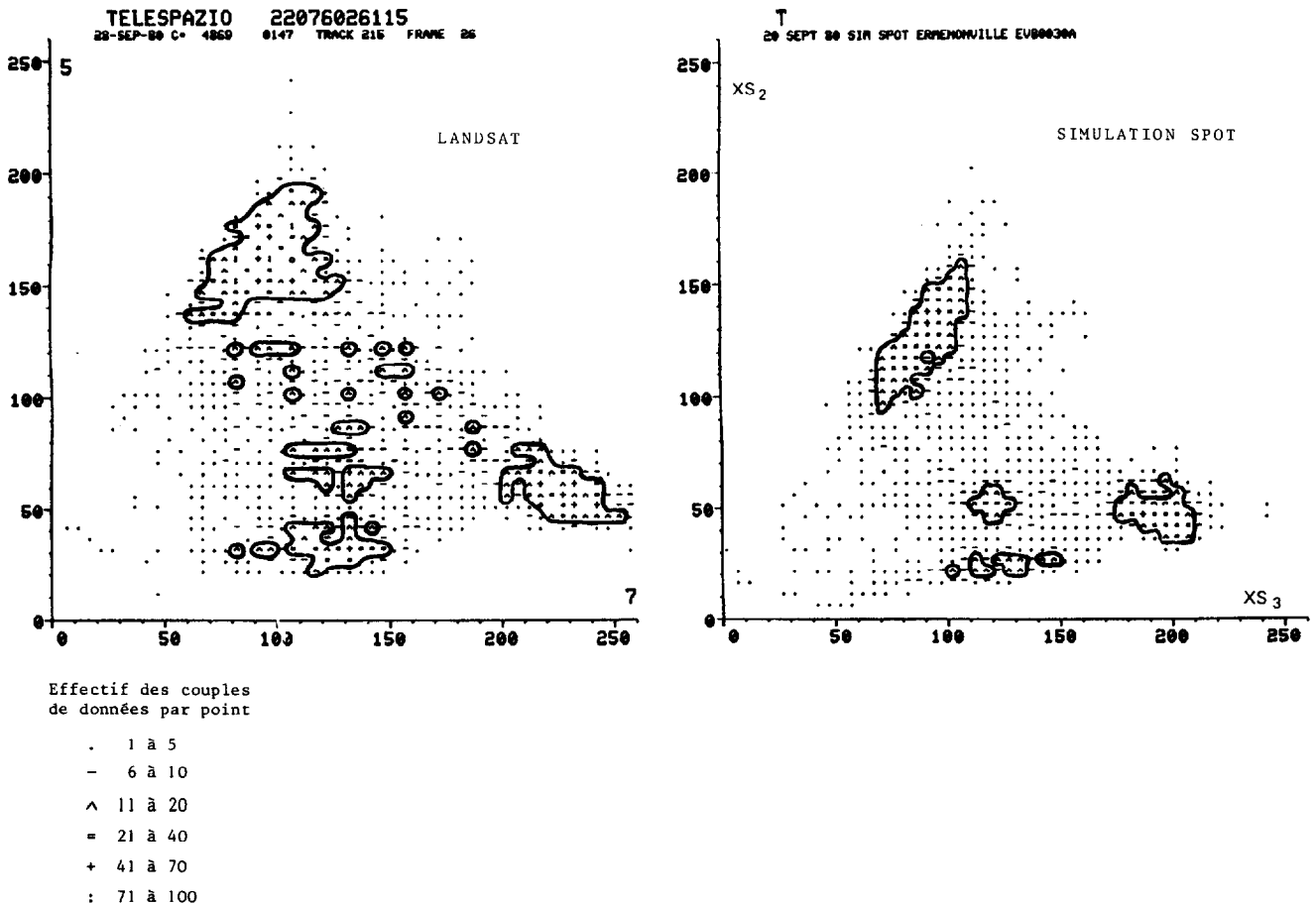


FIG. 9. — Comparaison des histogrammes bidimensionnels SPOT et LANDSAT. (Groupement des points comportant plus de 10 couples de données).

thèmes en question sont radiométriquement mieux définis sur la simulation SPOT que sur LANDSAT. Elle est essentiellement liée à la résolution au sol, c'est-à-dire à la dimension du pixel, et fonction du rapport surface/périmètre de chacune des parcelles : on peut considérer schématiquement que, sur une parcelle déterminée, le nombre de pixels SPOT est onze fois plus élevé

que l'effectif des pixels LANDSAT, alors que le nombre de pixels de bordures au contact des thèmes adjacents n'est multiplié que par un facteur compris entre 3 et 4. La proportion des pixels « mixtes » à la frontière de deux thèmes contigus sera donc considérablement plus faible pour SPOT. Mais il se peut également que la différence de comportement LANDSAT —

Simulation SPOT soit pour une part imputable à la non-concordance des longueurs d'onde des radiomètres utilisés :

— Canal 5 LANDSAT : 0,58-0,71 μ . Canal XS2 SPOT : 0,63-0,69 μ .

— Canal 7 LANDSAT : 0,77-0,97 μ . Canal XS3 SPOT : 0,79-0,89 μ .

On observe en particulier que les bandes radiométriques utilisées dans la simulation SPOT sont sensiblement plus étroites que celles retenues sur LANDSAT. Il faudrait alors en conclure que la gamme des longueurs d'onde retenue pour SPOT est mieux adaptée à la discrimination des thèmes étudiés au cours de cette opération.

Si l'on se réfère au graphique de départ (fig. 8), la droite des sols nus dans le cas des données LANDSAT présente une pente sensiblement égale à 1.

Si l'on ne tient pas compte de la différence de résolution spatiale, il apparaît donc en définitive un parallélisme satisfaisant entre les résultats fournis par LANDSAT et ceux tirés de la simulation SPOT.

5. L'ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DE L'INTERACTION SOL-VÉGÉTATION

Tous les résultats auxquels on s'est référé jusqu'à présent sont ceux obtenus à une date déterminée (28.09.1980). Mais ces résultats évoluent au cours de l'année en fonction de nombreux paramètres : angle solaire, état de la surface du sol (rugosité, humidité...), cycle végétatif des cultures annuelles, successions culturales, conditions météorologiques antérieures, ... Il est intéressant d'étudier les modalités de la transformation de l'histogramme bidimensionnel en cours d'année. Des observations ont été faites dans ce sens à l'occasion d'un travail antérieur (R. CHAUME, A. COMBEAU, 1983) concernant plus particulièrement le milieu forestier.

5.1. Incidence de la hauteur du soleil

L'étude en question était basée sur l'analyse des données de quinze images LANDSAT d'un même secteur, à des saisons différentes, et elle vise à préciser l'amplitude des variations annuelles de luminance sur les 4 canaux MSS. Outre le milieu forestier, certaines parcelles tests représentatives d'autres milieux ont été suivies : une prairie de bas-fond, des sols cultivés aux stades où ils ne sont pas occupés par une végétation, et une dune sableuse de la forêt d'Ermenonville. Ces parcelles, non forestières, peuvent être assimilées à des milieux pérennes, raison pour laquelle nous nous y référons aujourd'hui.

Les 3 graphiques rassemblés sur la figure 10 s'apparentent à des histogrammes bidimensionnels 5/7 :

chacun des points représente la médiane du thème étudié à une date déterminée, le chiffre figurant à côté de ce point étant le numéro d'ordre du mois de l'observation. La droite en pointillés est la bissectrice du premier quadrant.

On note tout d'abord l'existence d'une « migration » annuelle des points représentatifs au cours de l'année : très proches de l'origine des coordonnées en hiver (données de novembre et janvier), ils s'en éloignent rapidement jusqu'en juin-juillet, pour y revenir ensuite pendant l'automne.

On observe ensuite que sols nus et dune sableuse conduisent à des graphiques très proches l'un de l'autre, mais nettement distincts de celui de la prairie de bas-fond. Dans le premier cas, le déplacement des points représentatifs des surfaces sans végétation au cours de l'année s'effectue le long de la droite de pente 1, alors que, pour ce qui concerne la prairie de bas-fond ce déplacement s'effectue selon une trajectoire présentant une pente très faible par rapport à l'axe des abscisses (canal 7). Il résulte de cet état de fait qu'en hiver sols nus et prairies ont des signatures spectrales peu différentes, presque confondues, dans le domaine des luminances faibles sur les 2 canaux. Les différences s'accroissent au printemps pour atteindre un maximum en juin-juillet, qui constitue par conséquent la période la plus propice à la discrimination entre végétation et sols nus. Puis le retour s'effectue progressivement vers la situation de fin d'année.

Il résulte nécessairement de cette migration saisonnière que :

— Dans le cas des sols nus, l'indice S3/S2 ou 7/5 demeure constant et à valeur maximale tout au long de l'année. Par contre, l'indice de brillance subit une importante variation saisonnière.

— Dans le cas des sols sous prairie, l'indice de végétation initialement faible, prend des valeurs de plus en plus élevées au printemps et en été, puis rejoint sa valeur plancher en fin d'année. L'indice de brillance subit une évolution comparable.

On constate par conséquent, l'existence en dehors de toute intervention sur le milieu, d'une variation annuelle liée dans une large mesure à celle de la hauteur du soleil, et qui se traduit par une transformation continue de l'histogramme bidimensionnel 5/7. Cette transformation est étroitement liée à la présence de la chlorophylle qui abaisse les valeurs de la luminance sur le canal 5 pendant la période de végétation.

5.2. Incidence du stade végétatif

5.2.1. L'ALTERNANCE ÉVENTUELLE DES CYCLES VÉGÉTATIFS

L'agriculture de la région est basée pour l'essentiel sur une rotation culturale bisannuelle Blé-Betterave ou

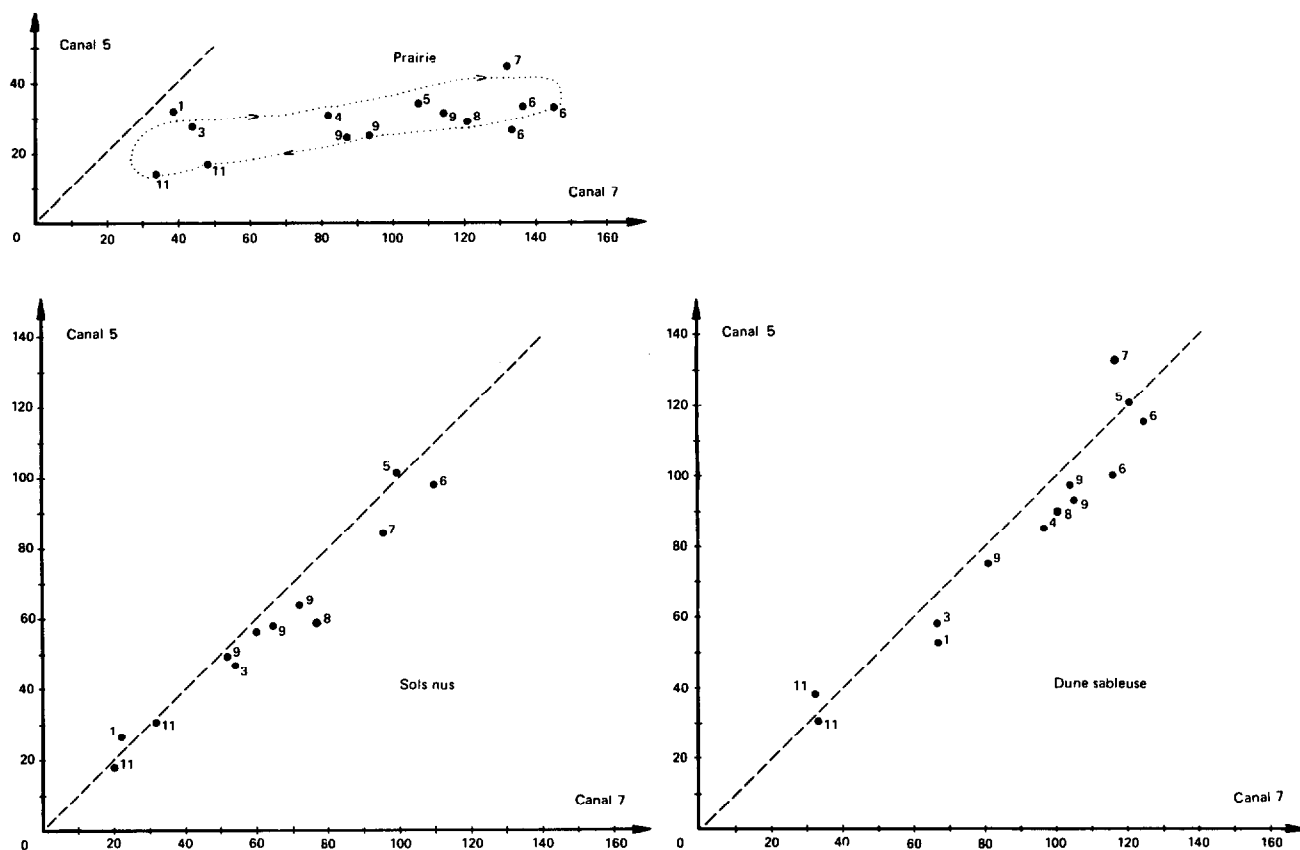


FIG. 10. — Récapitulatif des évolutions saisonnières par thème. (Les chiffres situés près des points correspondent au numéro d'ordre des mois.)

Maïs. Le calendrier des cultures peut donc se schématiser comme indiqué sur la figure 11 : nous retiendrons que les céréales couvrent le sol d'une végétation dense à partir du début d'avril, pour être moissonnées en août. Betteraves et maïs, semés en avril, ne couvrent bien le sol qu'en juillet, pour être récoltés en octobre ou plus tard. On observera donc un couvert assuré par les céréales de début avril à août, et par les betteraves et le maïs, de juillet à octobre-novembre. Il apparaît par conséquent que le mois de juillet constitue dans un tel système cultural une période de confusion possible des thèmes, la quasi-totalité des terres étant occupées par une végétation. On se souvient que juillet est par contre l'une des époques où, du fait de la hauteur du soleil, la différenciation des milieux se perçoit dans les meilleures conditions. Il conviendrait par conséquent d'étudier dans le détail les signatures spectrales des diverses cultures à cette époque pour tenter de les discriminer.

A titre indicatif, la figure 12 utilise le même type de représentation que la figure 10 pour traduire les évolu-

tions comparées de la sole céréales et de la sole betteraves (les chiffres correspondent au numéro d'ordre du mois) telles qu'il ressort de l'étude des 15 scènes LANDSAT évoquées plus haut. Cette figure illustre bien le « croisement » des signatures spectrales des 2 soles, pendant la période cruciale de fin juin-juillet, croisement également illustré par la comparaison des images agrandies d'une partie du site test (fig. 13, 1978 Canal 5). Cette situation apparaît aussi de façon nette dans une représentation graphique de l'évolution des indices de végétation des 2 soles cultivées (fig. 14).

A cette disjonction éventuelle des cycles culturaux se superpose un phénomène supplémentaire, à savoir le dessèchement des organes végétaux dans la période précédant la récolte. Ce cas se présente pour les céréales et le maïs.

5.2.2. LE JAUNISSEMENT DES CÉRÉALES

Pendant le mois qui précède la moisson, la teinte des blés passe successivement du vert sombre au vert clair puis au jaune de plus en plus pâle. Cette transformation

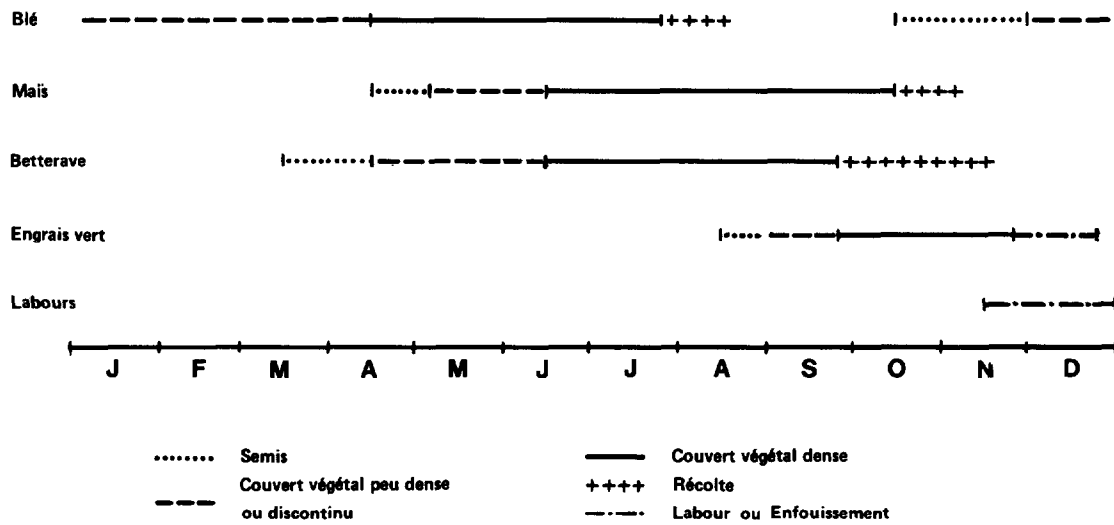


FIG. 11. — Calendrier culturel.

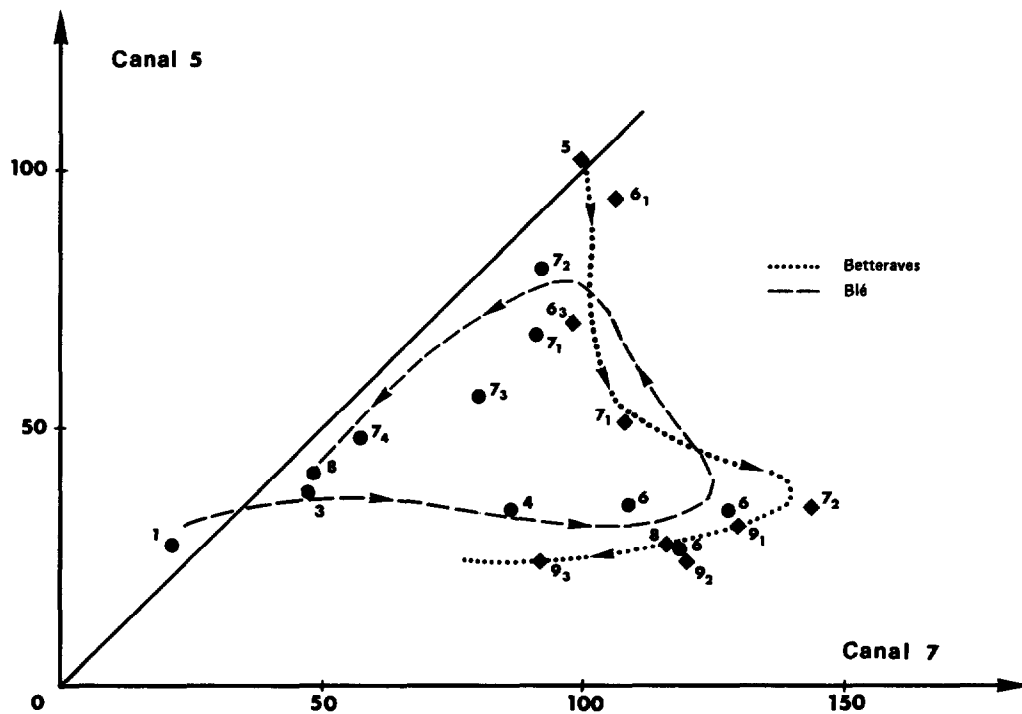


FIG. 12. — Evolution saisonnière des signatures spectrales (LANDSAT) des parcelles cultivées en betteraves et en blé.

se traduit essentiellement par une élévation rapide de la luminance sur le canal 5, assortie d'une faible diminution sur le canal 7. Il en résulte sur les compositions colorées classiques type diazo, un passage de la teinte

rouge caractérisant les couverts végétaux à la teinte bleue généralement indicatrice des sols nus. En la circonstance, et pendant une courte période, céréales mûres et sols nus ont des signatures spectrales très proches. C'est ce



4.6.78

CANAL 5

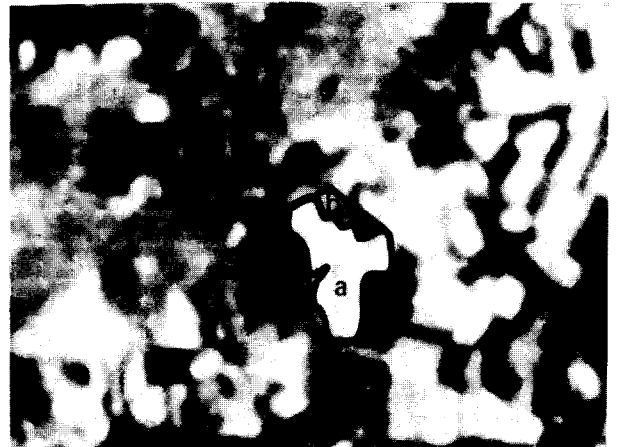


28.7.78



4.6.78

CANAL 7



28.7.78

FIG. 13. — Inversion des signatures spectrales en juin-juillet (blé-betterave). La parcelle a est en betteraves. La parcelle b est en blé. La moisson s'est déroulée du 12 au 20.8.78.

qui apparaît sur les éléments de la photo (1978 Canal 5). Le changement de signature spectrale des parcelles en céréales intervient donc non pas lors de la moisson, mais environ un mois plus tôt.

5.2.3. LE BRUNISSEMENT DU MAÏS

Le couvert végétal du maïs atteint une densité suffisante pour imprimer sa signature vers la mi-juillet, à peu près à la même époque que la betterave, tout au moins dans le centre du bassin parisien. Dans les semaines qui suivent, les deux cultures ont des signatures spectrales très voisines et il est difficile de les discriminer. Mais, dans le courant de septembre, elles se disjoignent

progressivement, du fait du brunissement du maïs qui se traduit par une diminution de la réflectance sur le canal 7 de LANDSAT, ou le canal X S3 de SPOT.

Dans le cas des données LANDSAT de 1979, par exemple, le 16.09.79, la discrimination des betteraves et du maïs est possible sur les canaux 6 et 7 :

TABLEAU I

16.09.79	Luminances			
	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7
Maïs	21-30	21-40	54-73	73-85
Betterave	21-30	27-31	85-124	90-121

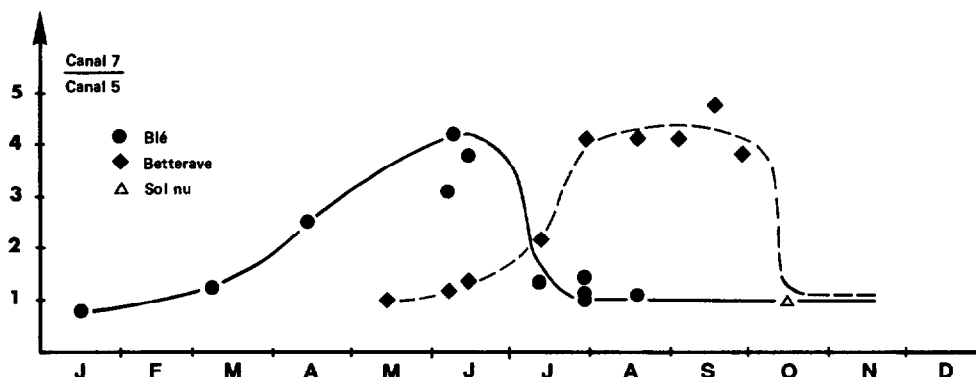


FIG. 14. — Evolution de l'indice de végétation 7/5 sur céréales et plantes sarclées (données LANDSAT).

Dans le cas de SPOT, l'expérience réalisée le 28.09.80 a permis de distinguer 3 catégories dans le thème maïs :

- un maïs dit « normal » ; parcelle 58 : $116 < XS3 < 132$
- un maïs à maturité plus avancée ; parcelle 34 : $103 < XS3 < 116$
- une parcelle de maïs semences ; parcelle 26 bis : $140 < XS3 < 162$
- betteraves (pour mémoire) : $171 < XS3 < 223$

Il apparaît par conséquent que la dessiccation des tissus végétaux a des incidences sensibles sur les histogrammes bidimensionnels, et qu'il convient d'en tenir compte pour interpréter l'évolution du milieu à travers ces histogrammes.

5.3. Luminance de la végétation et nature du sol

Les mesures effectuées sur les sols nus ont montré que certaines différences de nature des sols étaient perceptibles par la télédétection. On peut se demander si ces différences sont de nature à induire, toutes choses égales d'ailleurs, des différences dans une végétation de type donné suffisamment marquées pour être elles-mêmes perçues dans les mesures de luminance du couvert végétal. (Ce problème doit être disjoint de celui des végétations de natures différentes se développant sur des substrats eux-mêmes différents.)

Pour répondre à cette question dans le cadre de la simulation SPOT, il semble indispensable de ne comparer entre elles que des situations choisies dans une même parcelle pour éliminer un maximum de causes de variation. Dans ce but, deux exemples ont été choisis : il s'agit de deux parcelles de betteraves n° 16 et 36 traversées par les mêmes dépressions que celles étudiées précédemment dans des parcelles voisines (15 et 37) pour définir les sols nus. On a déterminé sur des micro-

fenêtres les luminances en situation de plateau et dans le bas-fond. Les résultats obtenus sont au tableau II. De ce tableau, il ressort bien que, dans les 2 cas, lorsque l'on passe du plateau à la dépression, les luminances des canaux S1 et S2 s'abaissent, alors que la luminance sur S3 augmente, ce qui semble traduire une plus grande vigueur de la végétation dans la dépression. On constate naturellement une différence sensible dans l'indice de végétation, avec un rapport dépression/plateau de l'ordre de 1,30 dans les 2 cas. On remarque également une augmentation de l'indice de brillance, et une légère augmentation de S1/S2.

Ces deux exemples montrent la possibilité, au moins dans certains cas, de percevoir à travers le couvert végétal des différences imputables à l'hétérogénéité du substrat.

CONCLUSION

Cette étude des mesures radiométriques effectuées sur des parcelles tests de petites dimensions, dans le cadre d'une simulation SPOT, illustre concrètement les possibilités de l'histogramme bidimensionnel S2/S3 dans l'interprétation numérique des résultats de télédétection. Les facteurs de rugosité et de teinte des sols sans végétation peuvent être mis en évidence ainsi que leur traduction en termes de brillance. L'interaction sols nus-végétation, étudiée à travers la colonisation progressive des sols nus aux premiers stades de développement des cultures, et par l'incidence de certains résidus végétaux, est perceptible à l'aide des mesures radiométriques. Elle se traduit par une évolution particulièrement sensible de l'indice de végétation.

Les comparaisons entre les données de simulation SPOT et celles de LANDSAT faites dans le cadre de ce travail, montrent que la résolution spatiale de SPOT permet des études plus précises que celles effectuées sur

TABLEAU II

Luminances de microfenêtres extraites des parcelles n°s 16 et 36 en situation de plateau et de bas-fonds.
(Min. = valeur minimale ; Maxi. = valeur maximale ; Moy. = moyenne ; déc. = décile).

Thème	Parcelle N°	Nombre Pixels	Canal	Min.	1° déc.	Med.	9° déc.	Maxi.	Moy.	S3/S2	$\sqrt{S2^2+S3^2}$	S1/S2
Betterave plateau	16	34	S1	54	57	58	60	61	58	3,62	188	1,16
			S2	46	49	50	52	52	50			
			S3	171	176	181	184	185	180			
Betterave bas-fond	16	30	S1	49	50	53	61	62	54	4,64	209	1,20
			S2	40	42	44	50	51	44			
			S3	199	201	204	210	215	205			
Betterave plateau	36		S1	50				57	53	4,04	196	1,13
			S2	45				51	47			
			S3	185				199	190			
Betterave bas-fond	36		S1	41				48	44	5,26	204	1,16
			S2	36				41	38			
			S3	194				206	200			

les données LANDSAT. Des aspects pratiques de l'interaction sol-végétation tels que : évolution saisonnière de cette interaction, cas particulier d'une région soumise à un assolement biennal, incidences du dessèchement des végétaux en fin d'été, manifestations de l'hétérogé-

néité d'un milieu à travers la végétation qui le recouvre... sont interprétables par télédétection.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 26 septembre 1986.

BIBLIOGRAPHIE

CHAUME (R.) et COMBEAU (A.), 1983. — Evolutions saisonnières comparées des signatures spectrales de divers milieux pérennes, (forêts, prairies, sols nus) à partir de documents LANDSAT. ORSTOM, Paris, IDT, n° 56, 49 p.

COMBEAU (A.), 1982. — Simulation des données du futur satellite SPOT — Ermenonville 1980. ORSTOM, IDT, n° 53, 41 p.

ESCADAFAL (R.) et POUGET (M.), 1985. — Luminance spectrale et caractères de la surface des sols en région aride méditerranéenne (Sud-tunisien), 12 p. *multigr.* Communication au 4th Symposium of ISSS Working Group remote sensing for soil survey. I.A.C., Wageningen, I.T.C., Enschede, 4-8 March 1985.