

# Perspectives de l'utilisation des données des satellites dans le domaine de l'occupation des sols

(Opération Simulation SPOT Ermenonville 80)

André COMBEAU

Pédologue O.R.S.T.O.M., S.S.C. de l'O.R.S.T.O.M., 70-74 Route d'Aulnay, 93140 Bondy

## RÉSUMÉ

*Dans le cadre de la mise au point du futur satellite français SPOT, dont la mise sur orbite est prévue pour 1984, des expériences de simulation sont réalisées par le Centre National d'Études Spatiales, sur des sites connus, au moyen de radiomètres embarqués sur avion. Cet article expose les résultats obtenus au cours d'une opération Simulation SPOT sur le site d'Ermenonville en région parisienne, le 28.09.1980.*

*Il présente : les valeurs radiométriques des divers thèmes d'occupation du sol, les résultats de l'analyse multi-spectrale (par des méthodes photo-chimiques et des analyses numériques), les possibilités d'une cartographie thématique soit visuelle, soit avec l'aide de l'ordinateur. Il ébauche une comparaison entre les résultats des satellites opérationnels (Landsat) et ceux d'une simulation de ce type.*

**MOTS-CLÉS :** Télédétection. Interprétation thématique. Occupation des sols. Simulation SPOT.

## SUMMARY

### PROSPECTIVE UTILIZATION OF THE SATELLITE DATA IN LAND USE (SIMULATION OPERATION SPOT ERMENONVILLE 80)

*In connection with the French Observation SPOT Satellite Program (due for launching in 1984), a simulation program has been carried out by the "Centre National d'Études Spatiales", over well known test-sites, with an aircraft equipped with a multi-channel Doedalus scanner. Data collected during a Spot Simulation operation on the Ermenonville test-site, near Paris, on 28/09/1980, concern the following topics :*

*spectral values of different types of land-use results of multi-spectral analysis (from photo-chemical and numerical analysis), feasibility of thematic mapping, either visual or computer made. Comparisons between the results of Landsat operating satellite and Spot simulation are outlined.*

**KEY WORDS :** Remote sensing. Thematic interpretation. Land use. SPOT simulation.

## 1. INTRODUCTION

L'année 1982 marquera le dixième anniversaire du lancement du premier satellite américain d'observation de la terre LANDSAT 1. C'est désormais une pratique courante que d'avoir recours à l'imagerie satellite pour illustrer un article impliquant la

connaissance de la variabilité du milieu, tant dans le domaine de la topographie que dans ceux de la végétation naturelle ou de l'occupation des sols. Il est plus rare de voir interpréter dans le détail de tels documents, et plus encore de faire appel à l'analyse numérique des données dans cette interprétation ou dans la représentation des résultats.



Fig. 1. — Ermenonville. Le secteur cultivé (photo panchromatique IGN 77 2413/300 UAG 368 du 15.10.77)

Il est évident que l'observation continue de la terre par satellite est appelée à se développer et à gagner en précision, et qu'elle pourra apporter beaucoup de renseignements utiles aux divers thématiciens. Il convient donc de mettre au point dès maintenant des méthodologies de traitement des données qui permettront d'exploiter les possibilités des techniques nouvelles d'observation de la terre.

Le CNES (Centre National d'Études Spatiales), membre du GDTA (Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale), prévoit le lancement en 1984 d'un satellite français, baptisé SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre). Dans le cadre de la mise au point de ce satellite, une expérimentation a été mise en route en vue de simuler, à partir d'instruments aéroportés, les futures images SPOT. L'O.R.S.T.O.M. a été associé à titre d'investigateur à la réalisation du programme de simulation, son rôle consistant à fournir la vérité-terrain et à interpréter les résultats de l'opération. Une première expérience a été réalisée le 28 septembre 1980. Le présent article expose une partie des résultats acquis à cette occasion, après un rappel des caractéristiques essentielles des satellites et de la saisie des données, et après une présentation des méthodes de traitement utilisées.

## 2. RAPPEL SUR LES DONNÉES DES SATELLITES

Les satellites d'observation de la terre gravitent à une altitude de l'ordre de 900 km. Leur orbite est quasi-polaire pour leur permettre d'observer toute la surface de la terre à l'exception des régions proches des pôles. Leur période de révolution est de l'ordre de 100 minutes.

Dans le cas des satellites de type Landsat, le laps de temps qui sépare deux survols successifs du même point est de 18 jours. La largeur de la bande de terre observée est de 185 km. Le dispositif d'observation principal est un radiomètre multispectral à balayage, qui capte la lumière solaire réfléchiée par le sol selon 4 longueurs d'onde auxquelles on a donné le nom de canaux : canal 4 (0,5-0,6  $\mu$ ), canal 5 (0,6-0,7  $\mu$ ), canal 6 (0,7-0,8  $\mu$ ), canal 7 (0,8-1,1  $\mu$ ). Compte tenu de l'étalement du spectre de la lumière visible entre 0,35 et 0,70  $\mu$ , on constate que les deux premiers canaux enregistrent donc dans le visible, plus précisément dans les lumières verte et rouge, alors que les canaux 6 et 7 correspondent au proche infra-rouge. Les caractéristiques du faisceau de lumière réfléchiée ainsi capté font que le point élémentaire observé au sol (ou « pixel ») est un rectangle de dimensions approximatives de 60 mètres

sur 80 mètres. Une ligne de balayage de 185 km correspond donc à 3240 pixels, observés en 33 millisecondes. L'observation d'une zone de 185  $\times$  185 km, dimension d'une image standard Landsat, correspond à 2256 lignes de balayage. C'est donc un total de plus de 7.300.000 points qui composent une telle image, sur un canal donné. Le temps nécessaire au balayage d'une image complète est de 28 secondes environ.

Dans le cas du futur satellite SPOT, un certain nombre de caractéristiques différeront de celles qui viennent d'être énoncées : l'intervalle de temps séparant deux observations d'un même point au sol sera ramené à 1 et 5 jours, du fait de la possibilité de visées obliques ; la vision stéréoscopique sera possible en principe sur des vues décalées d'un jour ; le radiomètre prévu sur SPOT ne fera pas appel au balayage mécanique ; 3 canaux : S1 (0,50-0,59  $\mu$ ), S2 (0,61-0,69  $\mu$ ), S3 (0,79-0,90  $\mu$ ) et possibilité d'un canal panchromatique P (0,50-0,90  $\mu$ ) ; champ de vue 60  $\times$  60 km ; résolution au sol : 20  $\times$  20 m pour les canaux S1, S2, S3, 10  $\times$  10 m pour le canal P.

Il apparaît par conséquent que la précision d'une image SPOT devrait être sensiblement meilleure que celle des Landsat actuels, et que la répétitivité des images devrait être, elle aussi, notablement améliorée.

## 3. LE SITE EXPÉRIMENTAL

Le programme de simulation des données SPOT comporte, entre autres choses, l'exécution de missions aéroportées au-dessus de secteurs connus, en vue de fournir des produits (films et bandes magnétiques) présentant des similitudes avec les données qui seront élaborées par le système SPOT via le Centre de Rectification des Images SPOT (CRIS). Ces produits sont soumis à des investigateurs en vue d'en effectuer une interprétation thématique et cartographique. L'O.R.S.T.O.M. s'est associé à cette opération en proposant l'exécution d'une telle mission au-dessus d'un secteur proche des Services Scientifiques Centraux de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy et dans lequel l'occupation du sol est connue depuis plusieurs années. Ce secteur a déjà été utilisé pour tester les données Landsat, ce qui permet de se livrer à d'utiles comparaisons.

Le périmètre expérimental est constitué d'une zone située au voisinage du village d'Ermenonville, de part et d'autre de la route Senlis-Meaux. Plusieurs éléments sont entrés en ligne de compte lors du choix de ce périmètre :

— Existence d'une zone cultivée, comportant des parcelles d'assez grandes dimensions (ordre de grandeur : la dizaine d'hectares, mais parfois

plus de 50 hectares) couvrant une superficie globale de 900 hectares environ.

— Connaissance, sur 200 hectares environ, de l'occupation des terres depuis 1975, grâce à la participation active d'un exploitant agricole d'Ermenonville, et extension récente des observations à une surface de 900 hectares environ.

— Existence d'une zone forestière comportant des essences différentes : chênes, hêtres, pins, peupliers, etc., et disponibilité de la carte dressée sur ce secteur par l'Office National des Forêts (échelle 1/20.000<sup>e</sup>).

— Existence de photos aériennes de bonne qualité, prises à des dates différentes, à l'échelle de 1/30.000<sup>e</sup>.

— Existence de points de repère facilement identifiables, élément très utile pour l'imagerie Landsat. De plus localisation sur 2 traces LANDSAT distinctes : 214-26 et 215-26.

— Manifestations visibles sur photos-aériennes d'une hétérogénéité des sols à l'échelle de la parcelle.

— Disponibilité de documents LANDSAT à des dates diverses (mais surtout de mars à juillet, accessoirement en septembre et novembre), et connaissance de quelques signatures spectrales des principales unités de paysage représentées. Une comparaison Landsat-Simulation Spot était donc envisageable.

Dans cette zone d'étude, le substrat de la zone cultivée est constitué par le limon des plateaux, généralement épais de 100 à 150 cm, reposant lui-même à faible profondeur sur des formations calcaires de l'Éocène (Calcaire de Saint-Ouen). Les sols qui se sont développés sur ce limon sont des sols bruns lessivés ou des sols lessivés présentant souvent des traces d'hydromorphie. Il est à remarquer que le plateau lessivé est entaillé de « vallées » sèches dont la profondeur atteint parfois une vingtaine de mètres. Ces dépressions ont alors un sol de colluvions de teinte plus claire, sensiblement distinct des sols du plateau. Des manifestations d'hétérogénéité seront donc perceptibles sur une formation par ailleurs monotone (fig. 1). Sous forêt, le substrat est constitué essentiellement par les sables et grès de Beauchamp (reposant eux-mêmes sur le calcaire grossier), surmontés localement par les calcaires de Saint-Ouen. Ce milieu a donné naissance à des sols podzoliques favorables au développement des résineux dans les secteurs sableux, alors que la forêt de hêtres et de chênes se localise sur les secteurs occupés par le calcaire de Saint-Ouen.

L'agriculture pratiquée dans le secteur cultivé de cette région repose essentiellement sur la succession blé d'hiver-betterave, ou blé-mais. Il est rare d'observer 2 céréales consécutives sur une même parcelle. Sur la zone d'étude, la superficie consacrée

au maïs est toujours faible. Certaines parcelles sont parfois cultivées en orge d'hiver ou de printemps, en pois, en lin ou en colza. En cas de gel, les blés d'hiver sont parfois ressemés en blé de printemps. Enfin, l'utilisation d'engrais vert (moutarde) est quelquefois pratiquée.

### L'opération Simulation SPOT Ermenonville 80

Le site de l'opération est suivi depuis 1975, date à partir de laquelle on dispose chaque année d'une carte d'occupation des sols sur une trentaine de parcelles. A partir de juin 1980, le suivi a été étendu à 80 parcelles environ (fig. 2) et renforcé, les observations visant à préciser dans une certaine mesure les techniques culturales appliquées.

L'opération Simulation SPOT ERMENONVILLE 80, primitivement prévue pour juillet, a été finalement exécutée le 28 septembre 1980. Il est à noter que, à la suite d'un incident technique, les photos IRC de contrôle n'ont pu être réalisées en même temps, et qu'elles ont donné lieu à un vol particulier effectué 4 jours plus tard, le 2 octobre, d'où certaines distorsions entre les enregistrements Daedalus et les photos IRC. La zone couverte comportait 3 axes de vol parallèles de 9 km de long et espacés de 4 km environ. Des observations ont été faites au sol, avec prise de photos, le 29.08.80, lendemain de l'exécution du premier vol, et 3 jours avant l'exécution du second vol.

Lors de l'exécution de la mission de simulation, l'occupation du sol était déterminée par les éléments suivants (fig. 2).

(a) La récolte des betteraves venait à peine de commencer. Elle avait eu lieu dans les 3 jours précédents sur les parcelles 12 et 1 *bis*, et elle était en cours sur les parcelles 4, 23 *bis* et 80.

(b) Tous les maïs étaient en place, mais à des stades de végétation légèrement différents, un mois environ avant la récolte. C'est ainsi que le jaunissement des feuilles et des tiges était nettement plus marqué sur la parcelle 34 que sur la parcelle 4 *bis*. En outre, la parcelle 26 *bis* comportait un secteur cultivé en maïs-semences.

(c) Tous les sols occupés précédemment par des céréales avaient été déchaumés plus ou moins récemment, et parfois labourés. Mais certaines parcelles étaient occupées par un engrais vert, généralement de la moutarde, dont le développement n'assurait pas encore une couverture complète du sol (parcelles 17 et 3 *bis*). En outre, dans un certain nombre de parcelles, on pouvait observer des repousses spontanées de céréales, couvrant très imparfaitement le sol (parcelles 38 et 2 par exemple), lorsqu'elles n'avaient pas été enfouies par un déchaumage récent.

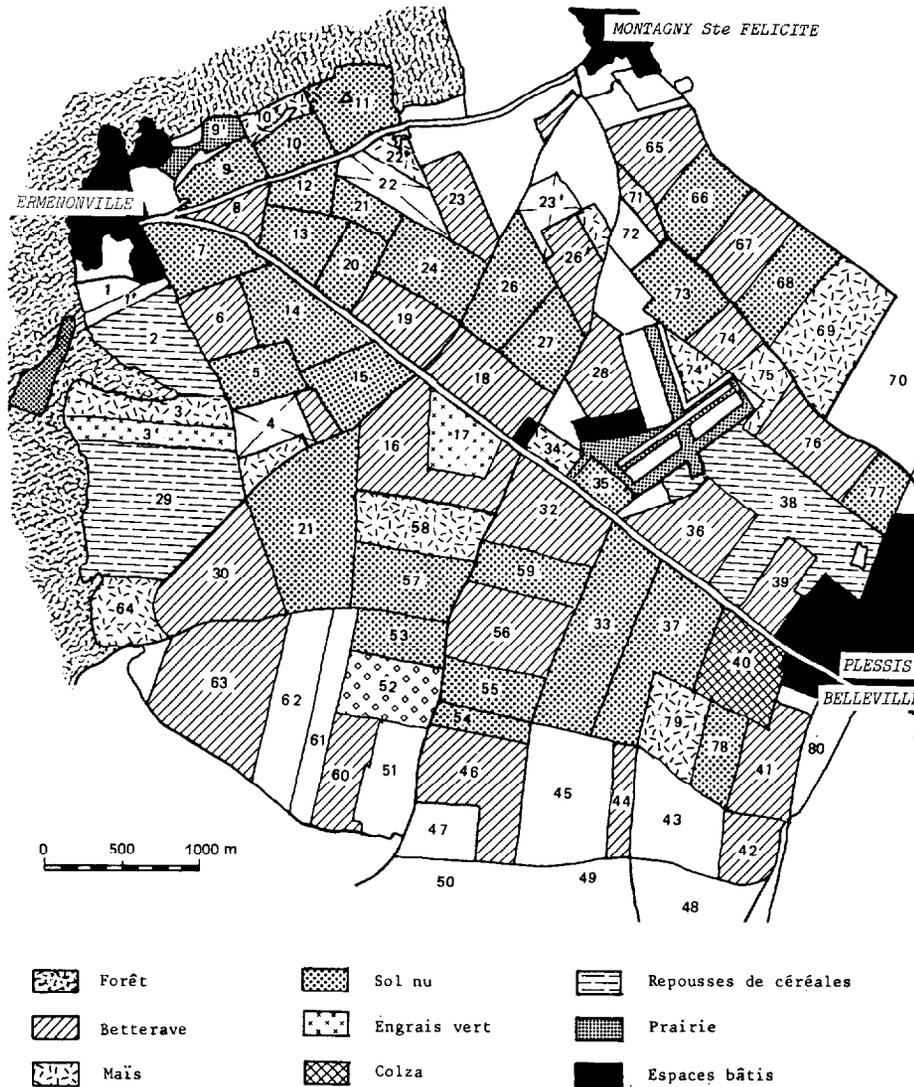


Fig. 2. — Carte d'occupation des sols au 28.9.80

(d) Une parcelle (40) avait été récemment semée en colza ; le développement de cette culture sur la ligne de semis n'assurait qu'un très faible taux de recouvrement du sol à la date du 28.9.80.

(e) Certaines parcelles présentaient des caractéristiques particulières au moment du vol. Citons par exemple : la parcelle 52, traitée en culture biologique, sans engrais ni pesticides, avec légumineuses succédant à une céréale ; la parcelle 60, qui comportait un épandage de fumier sur une partie seulement de sa surface.

#### 4. LES MÉTHODES DE TRAITEMENT

##### Traitement photographique

Les documents résultant de cette opération nous ont été fournis sous forme d'images Visumat et de bandes magnétiques. Dans un premier temps, les images Visumat ont permis de réaliser des compositions colorées type dyazo par tirage des canaux X S1, X S2, X S3 respectivement sur films jaune, magenta, cyan, soit par tirage contact, soit avec un agrandissement 2. Dans un second temps, les films Visumat

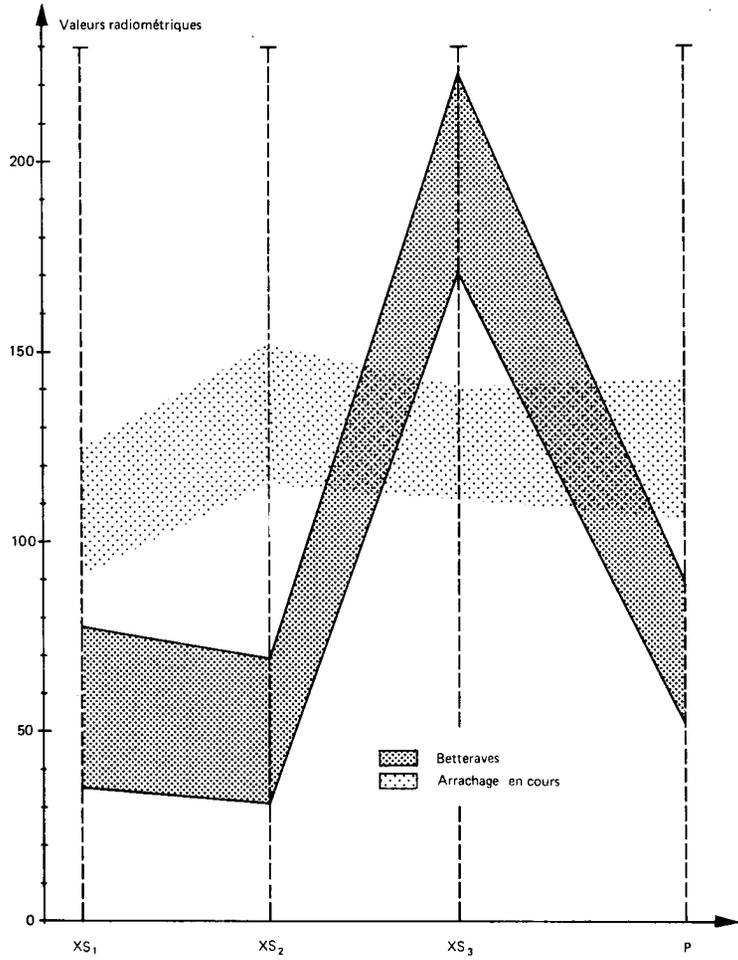


Fig. 3. — Réponse spectrale du thème Betteraves

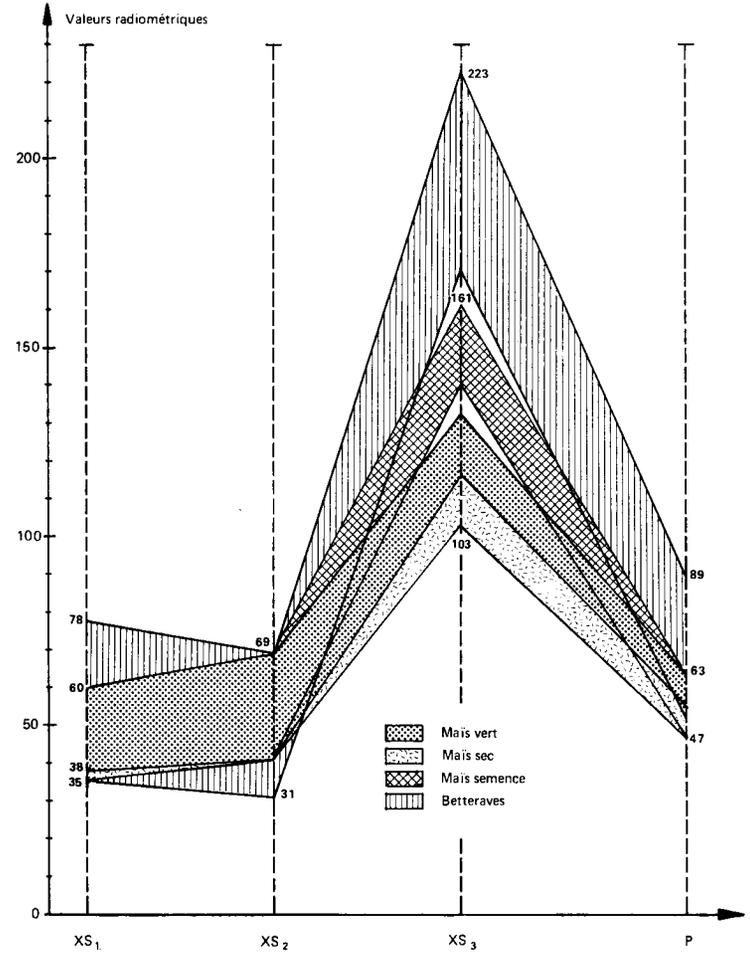


Fig. 4. — Réponse spectrale du thème Mais (comparaison avec betteraves)

ont été traités en équidensités colorées : on a procédé dans ce but à une définition des serpents densitométriques de chacun des thèmes pour chaque bande radiométrique, puis au choix des canaux à retenir pour les divers thèmes et au choix des densités de coupure. Il devenait alors possible de réaliser successivement plusieurs masques (en l'occurrence 6) qui, soit directement, soit par combinaisons, ont permis de sélectionner les divers thèmes de l'occupation du sol.

### Traitement numérique

L'atelier numérique du Bureau de Télédétection de l'O.R.S.T.O.M. comporte un ordinateur Mini 6 de CII HB, un écran de visualisation de 256 × 256 pixels, une table traçante et une imprimante rapide.

Les diverses opérations réalisées à partir des bandes magnétiques ont été les suivantes :

— Visualisation de chaque vue sur écran, repérage des thèmes à étudier par comparaison avec la carte des cultures, et recherche des bornes radiométriques de chacun de ces thèmes sur chacun des canaux X S1, X S2, X S3 et P.

— Contrôle de ces bornes par visualisation des lignes d'isovaleurs de la réflectance.

— Définition de la réponse spectrale de chaque thème sur l'ensemble des 4 canaux par le tracé du « serpent du thème ».

-- Contrôle de la validité de cette caractérisation par l'introduction des paramètres ainsi définis dans le programme de visualisation de serpent (programme VISSER).

— Recherche des canaux dont la prise en compte n'est pas indispensable à la définition du thème, par habillage sélectif du serpent.

— Application de la procédure Loterie à la définition des lots correspondant aux divers thèmes (programme LOTE).

— Application éventuelle d'une rotation d'axes en vue d'optimiser le classement obtenu.

— Représentation cartographique, sur table traçante Benson ou sur imprimante rapide, des résultats fournis par la procédure Loterie avec, ou sans rotation d'axes.

## 5. LES RÉSULTATS

Les résultats obtenus concernent deux milieux très différents : agricole et forestier. Le présent article n'abordera que les travaux relatifs au milieu agricole, et insistera plus spécialement sur les résultats concernant les sols sans végétation.

### 5.1. Les signatures spectrales des différents thèmes

#### (a) Les betteraves

Sur diazo, les parcelles en betterave apparaissent en rouge vif. Elles sont identifiables sans ambiguïté dans le secteur cultivé, mais se confondent avec les prairies humides de bas-fonds. Les parcelles en cours de récolte ont une allure très caractéristique, les zones récoltées apparaissent en blanc, par exemple sur les parcelles 4 et 80. Lorsque la récolte a eu lieu dans les 3 jours précédents, la teinte est alors bleu clair (parcelles 12 et 1 bis).

L'étude des valeurs radiométriques du thème définies à partir de la dégradation de chacun des 4 canaux a conduit à retenir comme suit les bornes du serpent de définition de la culture des betteraves (fig. 3) :

X S1	X S2	X S3	P
078	069	223	089
035	031	171	051

On remarquera au passage les valeurs radiométriques élevées obtenues sur le canal X S3.

L'application du programme VISSER nous montre que ce serpent définit le thème sans ambiguïté, exception faite des prairies de bas-fonds et permet une représentation cartographique satisfaisante de ce thème.

Nous avons tenté de définir également les serpents caractérisant les zones d'arrachage en cours ou récent. Ces serpents sont les suivants :

	X S1	X S2	X S3	P
Arrachage terminé	126	147	172	143
	080	102	115	099
Arrachage en cours	126	151	138	142
	091	115	111	105

On observe que ces deux serpents sont sans ambiguïté possible, disjoints du précédent et ce sur les 4 canaux, les valeurs radiométriques étant plus élevées sur les canaux X S1, X S2, P, plus faibles sur X S3, du fait de la disparition de la végétation ; mais on remarquera également par la suite que les serpents « arrachage » diffèrent dans une certaine mesure du serpent des sols nus.

#### (b) Le maïs

Sur diazo, les parcelles en maïs apparaissent en brun. Elles sont identifiables sans ambiguïté, à l'exception d'une confusion possible avec la parcelle 52 en culture biologique. On observe par ailleurs diverses nuances de brun selon les parcelles. L'observation au sol a montré que, lors de la date de prise de vue, certaines parcelles avaient atteint un stade de flétrissement plus poussé que d'autres (par exemple la parcelle 54, en comparaison des parcelles 4 bis et 3).

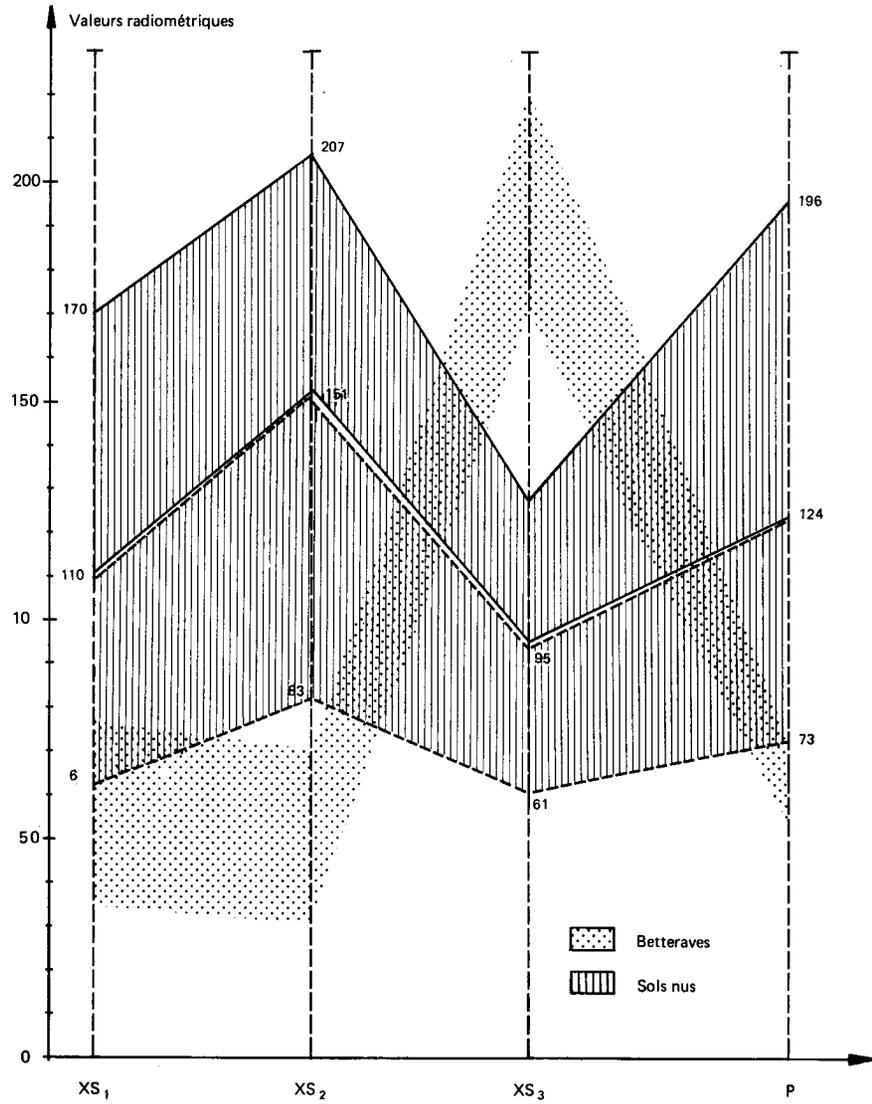


Fig. 5. — Réponse spectrale du thème Sols nus (comparaison avec betteraves)

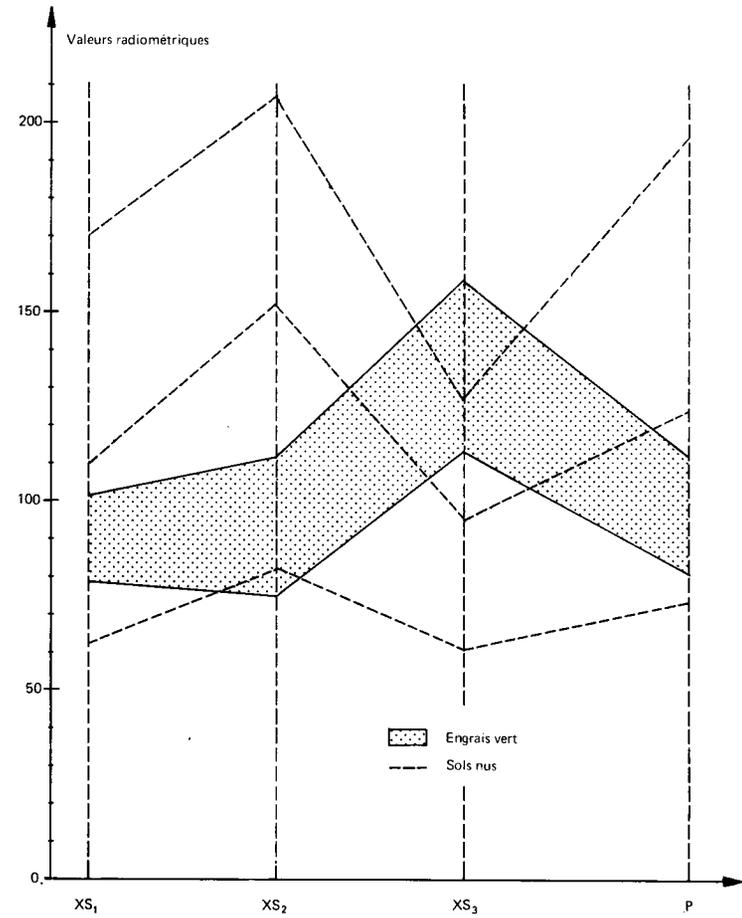


Fig. 6. — Réponse spectrale du thème Engrais vert (comparaison avec sols nus)

L'étude des valeurs radiométriques a conduit à définir le serpent du thème de la façon suivante (fig. 4) :

X S1	X S2	X S3	P
060	067	132	063
035	041	103	047

Ce serpent est disjoint de celui de la betterave sur le canal X S3. On remarque par ailleurs que le serpent propre à la parcelle 34 (où la maturité est très avancée) se localise dans la partie basse des fourchettes des valeurs radiométriques ci-dessus, tout au moins sur les canaux X S1, X S3 et P. Il est alors possible de distinguer un serpent maïs vert et un serpent habillant qui inclut le maïs sec selon le schéma suivant :

X S1	X S2	X S3	P
060	067	132	063
(060	067	132	063)
(038	041	116	053)
035	041	103	047

La visualisation des 2 serpents permet alors de localiser les zones de maturité différente de la culture.

Enfin le maïs semences de la parcelle 26 bis a un comportement particulier sur le canal X S3 : les valeurs radiométriques sont alors comprises entre 140 et 162 (fig. 4).

(c) *Les sols nus*

Cette rubrique regroupe en fait des éléments sensiblement différents bien qu'il s'agisse dans la quasi-totalité des cas de parcelles cultivées précédemment en céréales : certaines d'entre elles ont simplement fait l'objet d'un déchaumage léger, d'autres ont déjà été labourées et hersées, d'autres viennent d'être labourées sans que les mottes aient été émietées, d'autres enfin sont occupées par une végétation peu couvrante : colza, engrais vert, repousses de céréales. Plusieurs paramètres vont donc interférer dans la signature spectrale de la surface : couleur du sol nu, liée à la nature des sols (bas-fonds clairs, hauts de versants sombres), travail du sol et rugosité de la surface qui en résulte, humidité éventuelle dans le cas d'un labour récent, présence éventuelle et densité de la végétation.

Le facteur *couleur du sol* est particulièrement perceptible sur les images obtenues. Sur les compositions colorées diazos, les sols nus apparaissent en bleu, avec des nuances du bleu clair au bleu sombre liées à l'état de la surface : les bas-fonds de teinte claire et les taches de sols foncés sont visibles sans ambiguïté, et cela avec une bonne précision qui peut être estimée par comparaison avec les photos aériennes à 1/30.000<sup>e</sup> (parcelle 29, bas-fonds des parcelles 3, 4, 15, 16, 37 et 33). En analyse numérique, et encore que ce type de séparation soit arbitraire,

on a pu distinguer un serpent des sols de teinte foncée et un serpent des sols clairs selon le schéma suivant (fig. 5) :

	X S1	X S2	X S3	P
Sols clairs	≥ 110	206 152 151	127 95 94	≥ 124
Sols foncés	< 110	83	61	< 124

Le facteur *travail du sol* peut être apprécié dans le cas de la parcelle 3 tout récemment labourée. Le sol est très motteux, et la parcelle a une teinte générale sombre sur diazo, par opposition aux parcelles qui l'entourent, de teinte plus claire, et cela même lorsque l'on écarte le secteur nord-ouest de cette parcelle perturbé par la traversée d'un bas-fond. Il est également intéressant d'étudier la limite entre les parcelles 14 et 15, toutes deux cultivées en blé en 1980, puis déchaumées, mais la parcelle 15 ayant seule été l'objet d'un labour récent. Les valeurs radiométriques, seuil entre ces deux parcelles sont les suivantes :

	15 Labouré	14 Non labouré	Netteté de la limite
X S1	< 115	≥ 115	peu nette
X S2	< 150	≥ 150	peu nette
X S3	87-97	98-127	assez nette
P	< 127	≥ 127	peu nette

C'est donc essentiellement au niveau du canal X S3 que peut être perçu l'effet travail du sol, ce que confirme l'examen de la composante cyan de la diazo. On peut alors se demander si ce contraste des réflectances est imputable à une humidité plus forte du sol labouré tout récemment (abaissement de la réflectance de la parcelle 15) ou aux débris végétaux laissés en surface lors du déchaumage dans la parcelle non encore labourée (élévation de la réflectance de la parcelle 14).

Les repousses de céréales peu denses le 28.9.80, n'affectent pas de façon sensible la signature spectrale des sols nus ; citons les parcelles 2 et 38, et par analogie, le cas de la parcelle 40 en colza.

En définitive, le serpent caractérisant globalement les sols nus peut se définir comme suit :

X S1	X S2	X S3	P
170	206	127	196
063	083	061	073

Nous envisagerons la possibilité d'affiner ultérieurement la classification de ce thème grâce à la procédure Loterie.

(d) *Les engrais verts*

Deux parcelles 3 bis et 17 sont occupées par une moutarde engrais vert au moment du vol avion.

Ces parcelles ont sur diazo une teinte violet clair assez caractéristique (malgré la présence d'une perturbation due à un bas-fond dans la parcelle 3 bis).

Le serpent des valeurs radiométriques relevées sur ces deux parcelles est le suivant (fig. 6) :

X S1	X S2	X S3	P
102	111	159	112
079	075	113	081

La visualisation sur écran du serpent correspondant montre que le thème est convenablement défini. On observe que les impuretés de ce thème sont localisées aux 4 parcelles dans lesquelles la récolte des betteraves est en cours. On peut supposer que les collets de betterave abandonnés en surface du sol dans les quelques minutes précédant la prise d'image réagissent de façon comparable à l'engrais vert proprement dit.

#### (e) Les prairies

Elles sont peu représentées sur la zone étudiée, et la surface des parcelles correspondantes est toujours restreinte. On peut distinguer 2 types différents : des pelouses-parcs à herbe rase (parcelle 9 bis, parking aérodrome...) et des prairies de bas-fonds dans la vallée de la Launette.

Sur diazo, ces prairies se distinguent difficilement des champs de betteraves. L'étude des serpents radiométriques conduit à observer que les réponses des 2 types de prairies sont identiques sur les canaux X S1, X S2 et P, et qu'elles diffèrent sur X S3. Ces serpents sont les suivants :

	X S1	X S2	X S3	P
Pelouses-parcs	069	066	172	083
	046	042	129	053
Prairies de bas-fond	<i>id.</i>	<i>id.</i>	243	<i>id.</i>
			167	

On constate donc que les prairies de bas-fond ne peuvent être distinguées des betteraves, alors que les pelouses-parcs présentent sur le canal X S3 des réflectances intermédiaires entre celles du maïs et de la betterave. Par contre, nous avons déjà signalé qu'il n'y avait pas de confusion possible avec les parcelles engrais vert.

#### (f) Les thèmes secondaires

Le cas des arrachages de betteraves en cours a déjà été évoqué. Ceux du colza et des repousses de céréales également.

Une parcelle (52) présente un comportement particulier, apparenté à la réponse fournie par le maïs. Cette parcelle fait l'objet d'une culture de type biologique : blé de printemps, avec légumineuse en culture dérobée, sans engrais ni pesticide. Elle a été envahie de chardons et les restes de

végétation desséchée en surface du sol sont importants.

Le serpent de cette parcelle est le suivant :

X S1	X S2	X S3	P
065	086	113	102
039	045	082	042

Un autre cas particulier est celui de la parcelle 68, sur laquelle avait lieu au moment de l'enregistrement, un épandage de fumier. La moitié N.-O. de cette parcelle, fumée, se distingue nettement de la moitié S.-E. par sa teinte plus sombre qui l'exclut du serpent des sols nus.

#### 5.2. Les variations au sein des différents thèmes

Les résultats exposés précédemment avaient pour but de définir, sans ambiguïté, grâce à leur signature spectrale, chacun des 6 thèmes étudiés. Nous avons vu, que, à l'exception de confusions possibles entre betteraves et prairies de bas-fond d'une part, et entre maïs et une parcelle de culture biologique d'autre part, cette caractérisation est possible.

Mais on peut se proposer d'étudier les variations intervenant à l'intérieur d'un même thème. Ces variations sont imputables à l'hétérogénéité du milieu, qu'il s'agisse du sol lui-même ou de la végétation qu'il supporte : dans ce dernier cas, les différences observées seront dues soit à des stades de développement différents du végétal, soit à l'hétérogénéité du substrat.

Nous avons déjà envisagé les variations qui se manifestent dans le thème *sol nu* et nous y reviendrons. Elles se traduisent par le fait suivant : le passage des sols de teinte claire aux sols foncés entraîne systématiquement une baisse de réflectance à la fois sur les canaux X S2 et X S3 (parcelles 37, 29 et 68). Il semble qu'il en soit de même pour le labour du sol, soit du fait de l'apparition d'une rugosité accrue (parcelle 37), soit du fait d'une humidité temporaire plus élevée de la surface.

En ce qui concerne la *végétation*, on constate que certaines végétations à coefficient de réponse élevé se manifestent par des valeurs élevées de réflectance sur le canal X S3, des valeurs faibles sur les canaux X S1 et X S2. C'est particulièrement le cas des betteraves et des prairies humides, alors que le phénomène est moins marqué pour le maïs.

Il peut être intéressant d'étudier de quelle façon l'hétérogénéité du milieu du sol se manifestera à travers la réaction éventuelle du végétal. Dans ce but, certaines observations antérieures réalisées à l'occasion de travaux entrepris sur l'imagerie LANDSAT avaient montré que, au sol, les différences de nature des sols entre versants et fonds de vallées sèches peuvent avoir une incidence sur l'allure

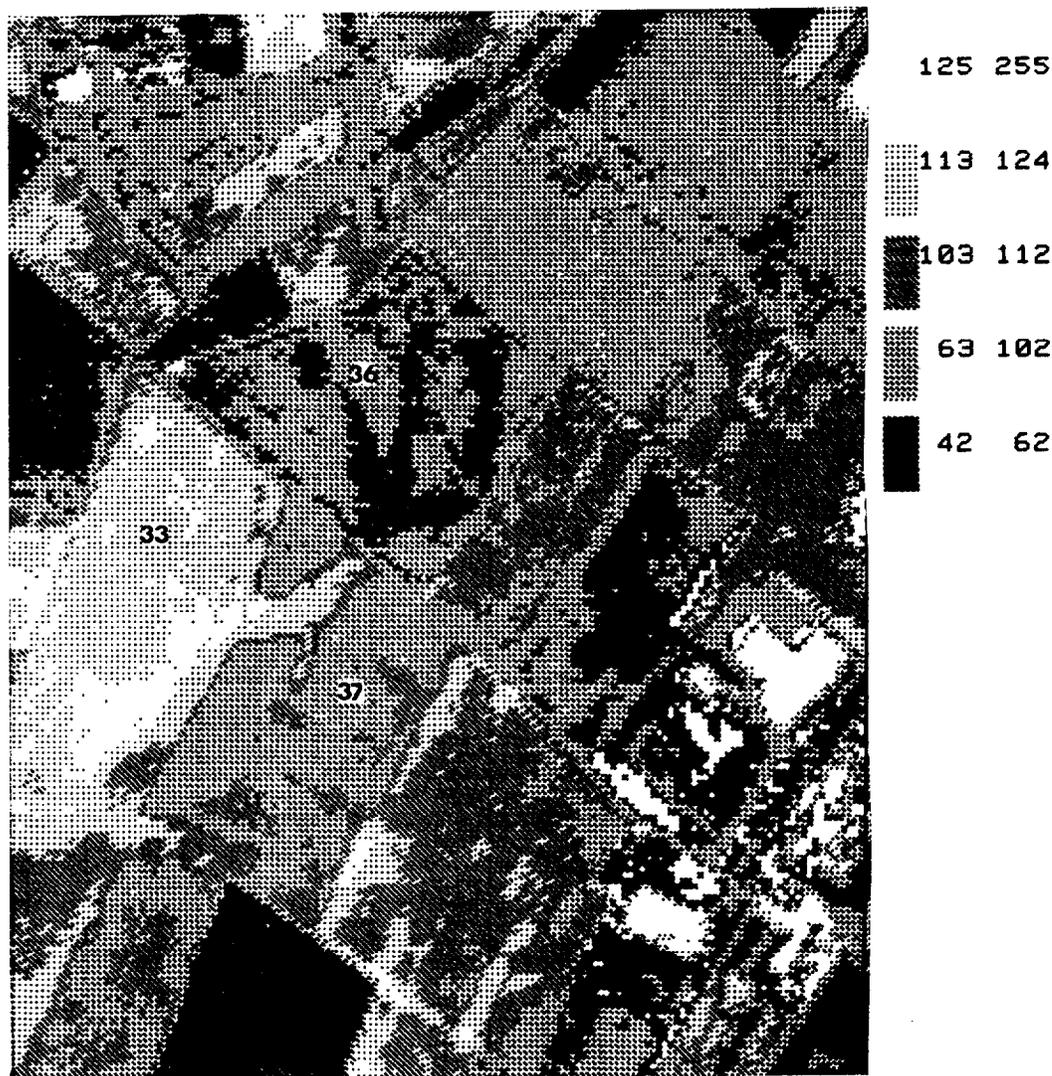


Fig. 7. — Manifestations différentes de l'hétérogénéité du milieu sur sol nu et sous végétation : inversion du gradient de réflectance

de la culture. Les parcelles 33, 36 et 37 présentent un intérêt tout particulier pour ce genre d'observations : elles sont en effet traversées par un bas-fond peu marqué, mais bien perceptible au sol. De plus, les parcelles situées au S.-O. de la route (33 et 37) sont en sol nu, ou récemment labouré, alors que la parcelle 36 située au N.-E. de la route est sous betteraves. On observe alors que, lorsque le sol est nu, le bas-fond est associé à des valeurs de réflectance plus élevées que celles des sols voisins, mais que, lorsque le sol est couvert par la végétation des betteraves, le bas-fond apparaît au contraire avec des valeurs de réflectance plus basses que celles observées sur les versants. L'hétérogénéité perçue

de la sorte se traduit donc dans ce cas particulier par des gradients de réflectance inverses sur les sols nus et sous culture (fig. 7).

### 5.3. Synthèse des résultats

#### (a) L'équidensité photographique

Le traitement photochimique des documents d'origine a conduit à la réalisation d'une équidensité photographique du secteur étudié. Le principe de cette opération est de rassembler dans une même classe (traduite par un niveau de gris, ou par une couleur) les plages de gris faiblement différenciés correspondant à une même unité thématique. Cette



Fig. 8. --- Équidensité colorée (betteraves : orange ; maïs : jaune ; engrais vert : vert foncé ; sols nus : vert clair ; forêt : bleu)

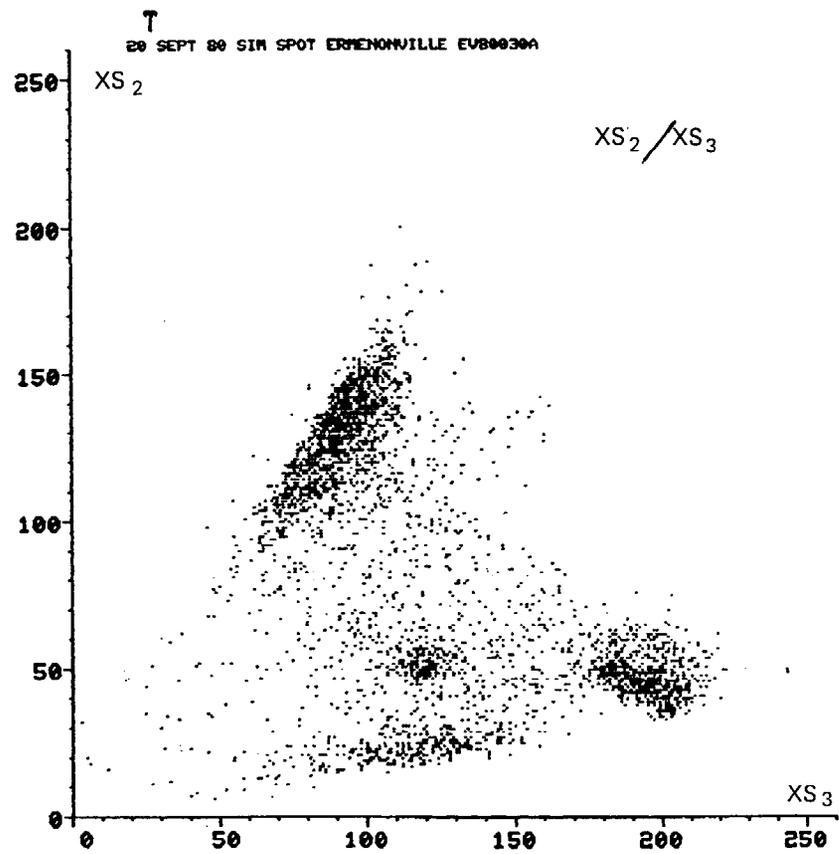
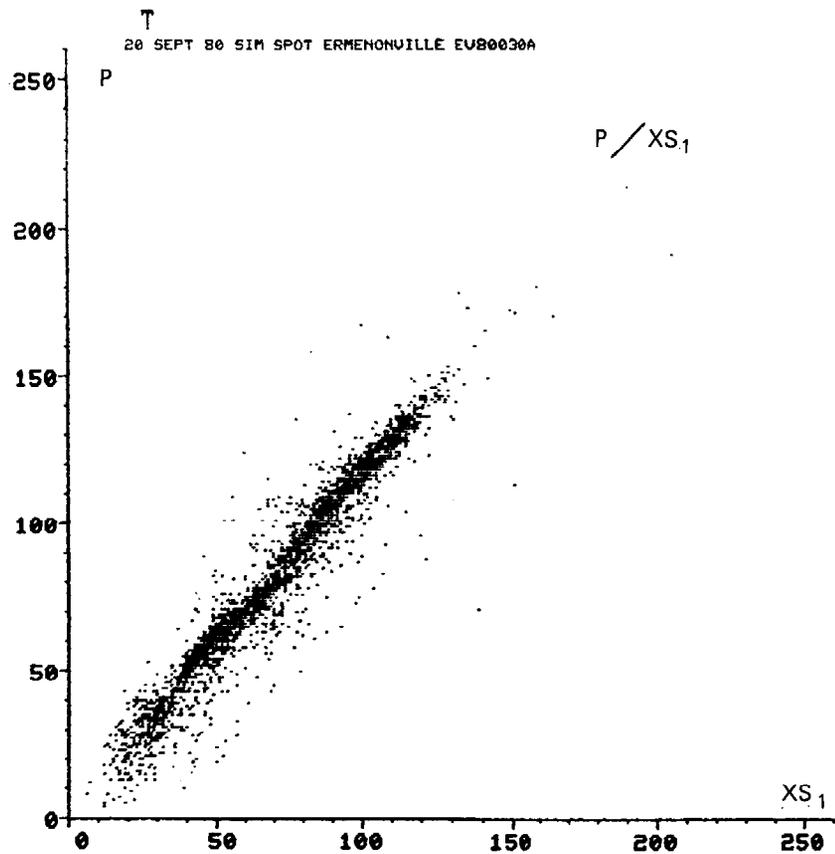


Fig. 9. — Corrélations des valeurs radiométriques obtenues sur divers canaux

20 SEPT 80 SIM SPOT ERMENONVILLE EV80030A

T

CADRE:

L= 461 972  
C= 1 512

CODAGE DES LOTS \*\*\*\*\*

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9										
CANAL XS <sub>1</sub>	0	255	*****																	
CANAL XS <sub>2</sub>	31	40	41	66	67	68	69	74	75	82	83	110	111	206	*****					
CANAL XS <sub>3</sub>	61	102	103	112	113	126	127	131	132	158	159	170	171	222	*****					
CANAL P	0	255	*****																	

N	CL	NPIX	ZI	ZT	
1	600	73112	0.279	0.279	Sols nus foncés
2	160	49484	0.189	0.468	Betteraves
3	500	18448	0.070	0.538	Sols nus foncés
4	610	17888	0.068	0.606	Sols nus clairs
5	120	12100	0.046	0.652	Maïs
6	60	7680	0.029	0.682	Betteraves
7	140	7448	0.028	0.710	Maïs
8	100	5340	0.020	0.731	Parcelle biologique - Agglomération
9	620	4372	0.017	0.747	Sols clairs - Arrachage betteraves ancien
10	110	3412	0.013	0.760	Maïs sec
11	520	3360	0.013	0.773	Engrais vert
12	150	3136	0.012	0.785	Prairie
13	540	2316	0.009	0.794	Engrais vert
14	130	2184	0.008	0.802	Labour
15	510	2148	0.008	0.810	Sol nu foncé

Fig. 10. — Statistique des lots du secteur cultivé

opération peut être réalisée à partir des clichés correspondant à plusieurs canaux, en l'occurrence X S2 et X S3.

Dans le cas présent, six thèmes distincts ont pu être isolés : forêt, betteraves et prairies de bas-fonds, maïs, engrais verts, sols nus et la parcelle en culture biologique. Les deux premiers de ces thèmes ont été extraits directement du canal X S3, les autres étant obtenus par combinaison de masques successifs (6 masques).

La représentation globale des thèmes ainsi isolés (fig. 8) s'est avérée tout à fait exacte, les seules ambiguïtés portant sur le secteur bâti, particulièrement hétérogène dans la région étudiée (habitat pavillonnaire et zones industrielles).

#### (b) La procédure Loterie

Pour synthétiser les résultats précédemment exposés, concernant l'analyse numérique, deux démarches sont apparues possibles : l'une qui viserait à définir en tant que tels les divers thèmes d'occupation des sols du secteur étudié, donc à nous fournir une statistique de cette occupation et à dresser la carte des thèmes : l'autre qui tenterait d'évaluer la variabilité possible au sein d'un même thème, et qui fournirait par conséquent un aperçu de la sensibilité de la méthode.

Ces deux démarches sont du ressort d'une même

technique de traitement, celle de la procédure Loterie, mise au point et utilisée à l'O.R.S.T.O.M. et qui consiste, à partir des coupures retenues lors de la dégradation de chacun des canaux, à constituer des lots de points caractérisant un milieu déterminé ou un certain état de ce milieu. Cette procédure, très simple dans son principe, est applicable à 2, 3 ou n canaux.

La technique consiste dans un premier temps à définir les canaux « utiles » par exemple en visualisant le serpent du thème, une première fois tel qu'il a été défini dans les premiers stades de l'étude, puis une seconde fois en occultant un des canaux de ce serpent. Si l'occultation n'entraîne pas d'augmentation appréciable du nombre de pixels attribués au thème, on peut en déduire que le canal occulté n'intervient pas dans la définition de celui-ci.

Dans le cas de la Simulation SPOT Ermenonville 80, plusieurs constatations ont pu être faites (fig. 9) :

— Il existe une corrélation très étroite entre les valeurs de réflectance des canaux X S1 et P. Compte tenu de la nécessité d'un choix entre les diverses longueurs d'onde classiques d'une part, et le canal panchromatique d'autre part, il apparaît donc logique, malgré le surcroît très considérable de précision géométrique apporté par la résolution du

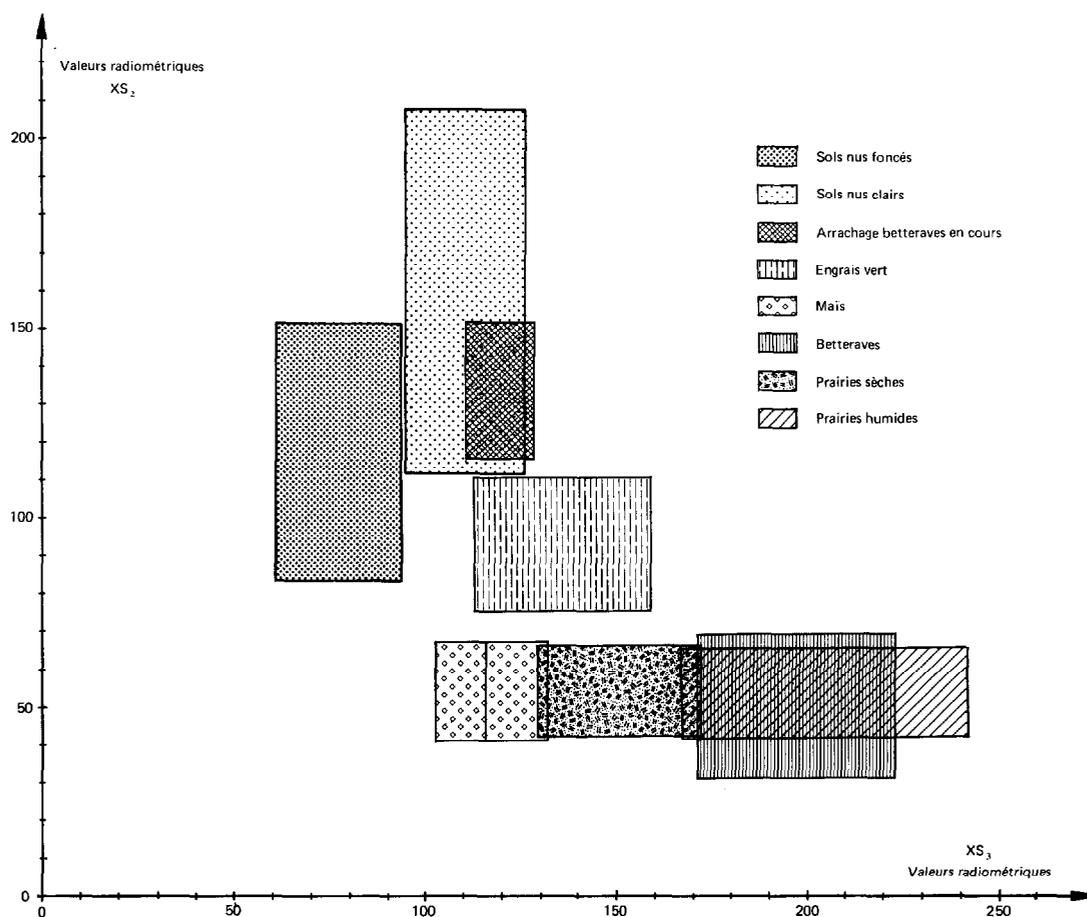


Fig. 11. — Loterie du secteur cultivé

canal P, de préférer la filière radiométrique, donc le système multi-canaux, compte tenu de l'intérêt des compositions possibles.

— Il existe également une corrélation étroite entre X S1 et X S2.

— Par contre, la corrélation est très faible entre X S2 et X S3.

Ces observations ont conduit à ne conserver comme canaux utiles que X S2 et X S3 et à ramener ainsi l'analyse par la procédure Loterie à la combinaison de ces deux canaux.

Dans ces conditions, la statistique des lots apparaît sur la figure 10, sortie d'imprimante qui précise les coupures effectuées sur les canaux X S2 et X S3, donc les lots obtenus, et classe ces lots par ordre d'importance décroissante (en nombre de pixels et en pourcentage de la superficie totale). L'attribution des lots aux thèmes étudiés figure en regard de ce tableau. Cette loterie peut également se

traduire graphiquement (fig. 11). Enfin, le résultat de la loterie s'exprimera sous la forme d'une carte obtenue soit sur table traçante, soit sur imprimante rapide (fig. 12). C'est en définitive ce document qui, par comparaison avec la vérité terrain (carte d'occupation des sols, photo IRC du 4.10.80) permet d'apprécier la validité des résultats obtenus.

L'examen de la carte « Analyse de l'ensemble du secteur agricole » (fig. 12) et la comparaison de celle-ci avec la carte d'occupation des sols (fig. 2) fait apparaître une très bonne concordance, ce qui signifie que les thèmes étudiés sont caractérisés radiométriquement de façon satisfaisante.

Pour apprécier la sensibilité de la méthode, il semble souhaitable de s'attacher à la discrimination de détails perceptibles au sein d'un même thème. Dans ce but, il est apparu intéressant d'étudier le contenu du « thème sols nus ». Dans ce cas, l'application de la procédure Loterie consiste, dans un

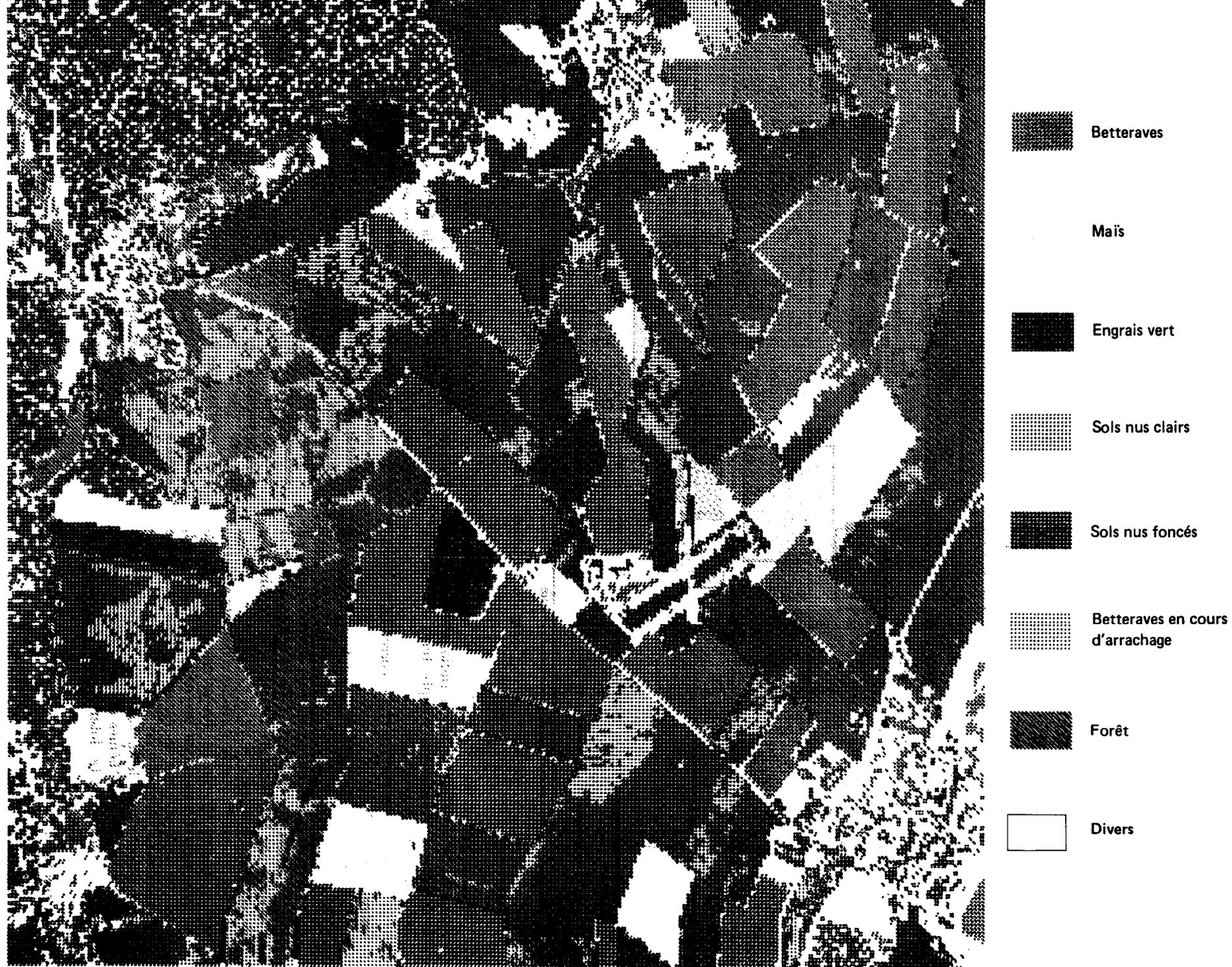


Fig. 12. — Analyse de l'ensemble du secteur cultivé par la procédure loterie sur les canaux X S2 et X S3

20 SEPT 80 SIM SPOT ERMENONVILLE EV80030A

CADRE:  
L= 461 972  
C= 1 512

CODAGE DES LOTS \*\*\*\*\*

CANAL	X <sub>S1</sub>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
CANAL X <sub>S2</sub>	71	82	83	110	111	130	131	131	152	180	181	206
CANAL X <sub>S3</sub>	61	80	81	94	95	102	103	112	113	127	128	172
CANAL P	0	255	*****									

N	CL	NP1X	ZI	ZT
1	210	22944	0.088	0.088
2	320	17752	0.068	0.155
3	310	15532	0.059	0.214
4	100	11120	0.042	0.257
5	330	9712	0.037	0.294
6	200	8600	0.033	0.327
7	220	6328	0.024	0.351
8	110	5184	0.020	0.371
9	430	4808	0.018	0.389
10	140	3716	0.014	0.403
11	150	3496	0.013	0.417
12	230	3312	0.013	0.429
13	50	2360	0.009	0.438
14	130	2148	0.008	0.446
15	120	2144	0.008	0.455
16	240	1796	0.007	0.461
17	420	1776	0.007	0.468
18	340	1648	0.006	0.474
19	0	1444	0.006	0.480
20	250	1420	0.005	0.485
21	40	1032	0.004	0.489
22	440	964	0.004	0.493
23	350	852	0.003	0.496
24	10	820	0.003	0.499
25	30	752	0.003	0.502
26	20	572	0.002	0.504
27	540	200	0.001	0.505
28	410	116	0.000	0.506
29	450	64	0.000	0.506
30	300	56	0.000	0.506
31	530	56	0.000	0.506
32	550	28	0.000	0.506
33	520	8	0.000	0.506

Fig. 13. — Statistique des lots du thème Sols nus

premier temps, à éliminer tous les lots autres que sols nus, puis dans un second temps, à faire apparaître des classes différentes à l'intérieur du seul thème « sols nus ». Cette opération correspond aux figures 13, 14 et 15. Il en ressort que 6 classes d'aspect de la surface ont pu être distinguées à l'intérieur du thème sols nus ; ces six classes traduisent de façon satisfaisante l'hétérogénéité du milieu, ainsi qu'il est possible de le vérifier pour la parcelle 29, par comparaison de la sortie d'imprimante (échelle de l'ordre de 1/15.000<sup>e</sup>) avec la photo aérienne du 15.10.1977, date à laquelle cette parcelle ne comportait pas de végétation. La comparaison des parcelles 14 et 15 fait ressortir l'effet du labour (parcelle 15), malgré la présence de bas-fonds qui limitent dans une certaine mesure la netteté du résultat.

Il est intéressant d'examiner en parallèle le graphique loterie (fig. 14) sur lequel ont été représentés tous les lots étudiés sous l'appellation « sols nus », et le tableau de la statistique des lots (fig. 13), car on situe assez exactement les zones à forte densité de points et la signification des thèmes. Plusieurs remarques s'imposent :

— Les 27 premiers lots de la loterie totalisent 50,5 % du nombre total de pixels de l'image étudiée, et chacun des lots suivants n'intervient que pour moins de 0,1 % de la surface totale. Ce résultat est à rapprocher du fait que la rotation culturale est de type biennal : la superficie en maïs et betteraves est sensiblement égale à la surface occupée par les céréales. Toutefois, il faut tenir compte du fait qu'une faible partie de l'image est occupée par la bordure de la forêt, ce qui conduit à supposer que la superficie des céréales est un peu supérieure à celle occupée par betteraves et maïs.

— On observe que les 8 premiers lots, comportant chacun plus de 2000 pixels (soit 2 % de l'image) interviennent au total pour 37,1 % de la surface du cadre de la visualisation, soit 83 % des sols nus. La disposition de ces lots sur la figure 12 fait ressortir la nature de la corrélation entre les réflectances des sols nus sur les canaux X S2 et X S3.

— Un examen détaillé de la figure 16 permet de saisir les divers stades d'évolution de la signature spectrale d'un sol nu lorsqu'une végétation commence à le coloniser. Les sols totalement dépourvus de végétation, c'est-à-dire récemment labourés ou

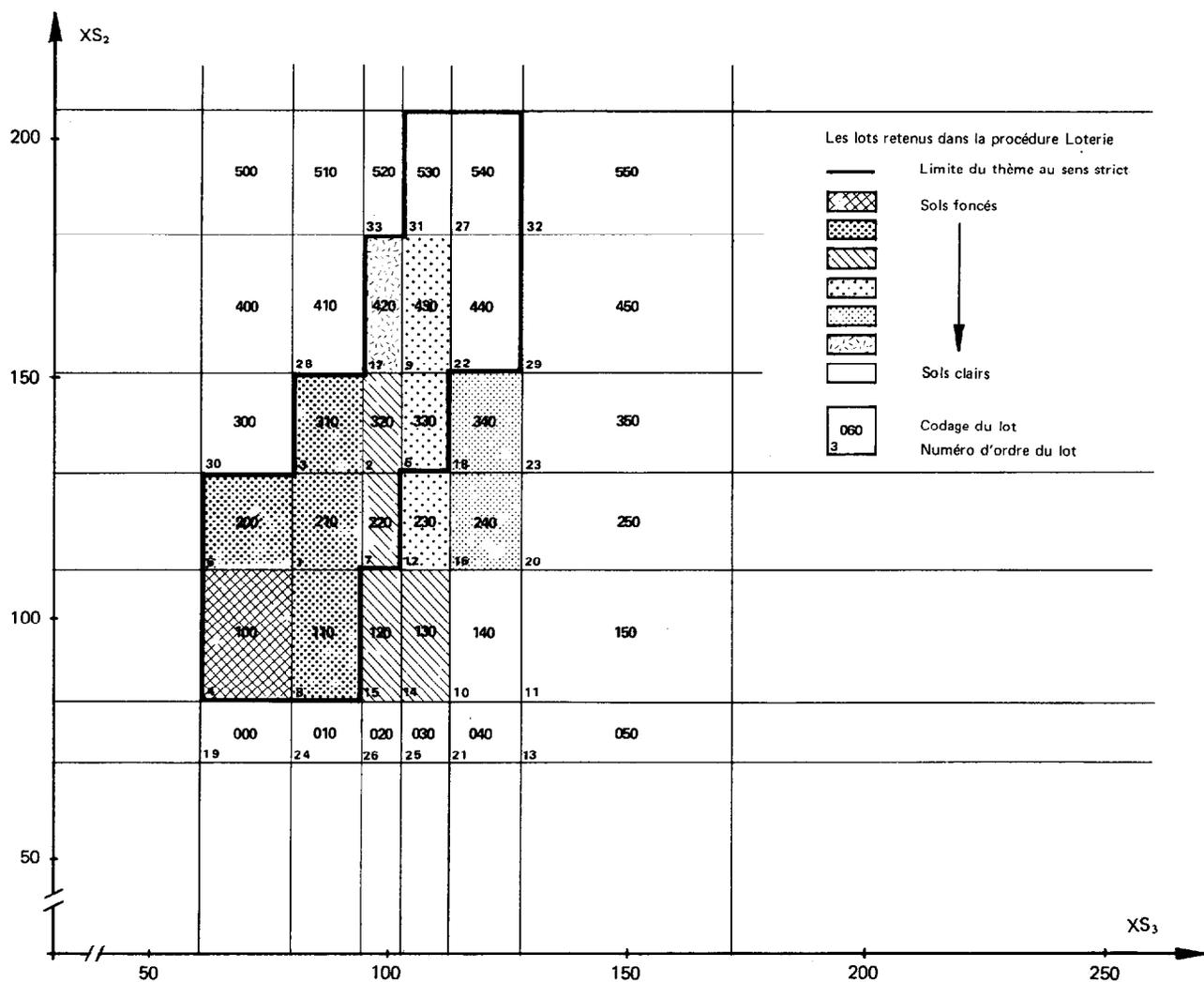


Fig. 14. — Analyse du thème « Sols nus » par la procédure Loterie

déchaumés correspondent aux lots 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 17, 27, 31, qui occupent la moitié N.-O. du nuage de points. Les chaumes, ou les parcelles comportant une repousse de céréales sont décalées vers l'angle S.-E. du graphique (chaumes : lot 5 ; repousses de céréales : lots 5, 7, 12, 14 et 15). Dans le même secteur, on retrouve le colza, à faible taux de couverture (lots 7 et 12). Viennent ensuite les lots correspondant à l'arrachage des betteraves (avec collets en surface) : ce sont les lots 16 et 18. Puis, nettement en dehors du nuage, figurent les deux parcelles d'engrais vert (lots 10, 11, 13). À titre indicatif, on a en outre fait figurer sur le graphique les lots betteraves et maïs. Il apparaît

clairement que le développement d'une végétation sur un sol entraîne une dérive des points représentatifs vers le secteur S.-E. du graphique, l'amplitude de la dérive étant d'autant plus marquée que le couvert est plus dense. Ce phénomène ne fait que traduire une augmentation des valeurs de la réflectance sur X S3, une réduction sur X S2. On peut penser que le maïs conduit au même résultat que la betterave (Landsat ayant montré l'identité des réflectances jusqu'à un stade avancé de développement des 2 cultures) mais que la dessiccation des parties aériennes peu avant la récolte provoque une diminution des réflectances sur X S3, ce qui masque en partie le phénomène.

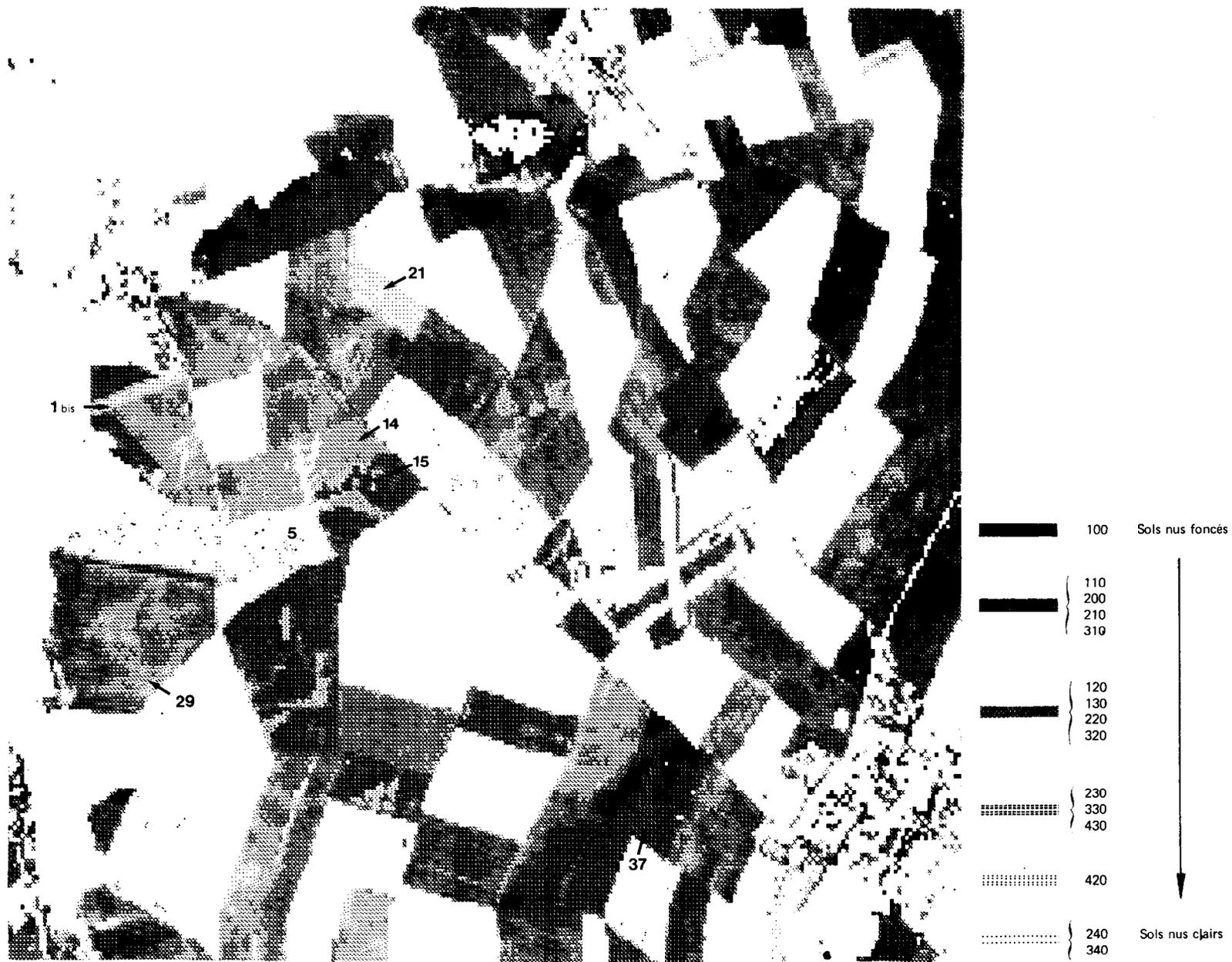


Fig. 15. — Analyse du thème « Sols nus » par la procédure Loterie. Cartographie de l'hétérogénéité des sols nus

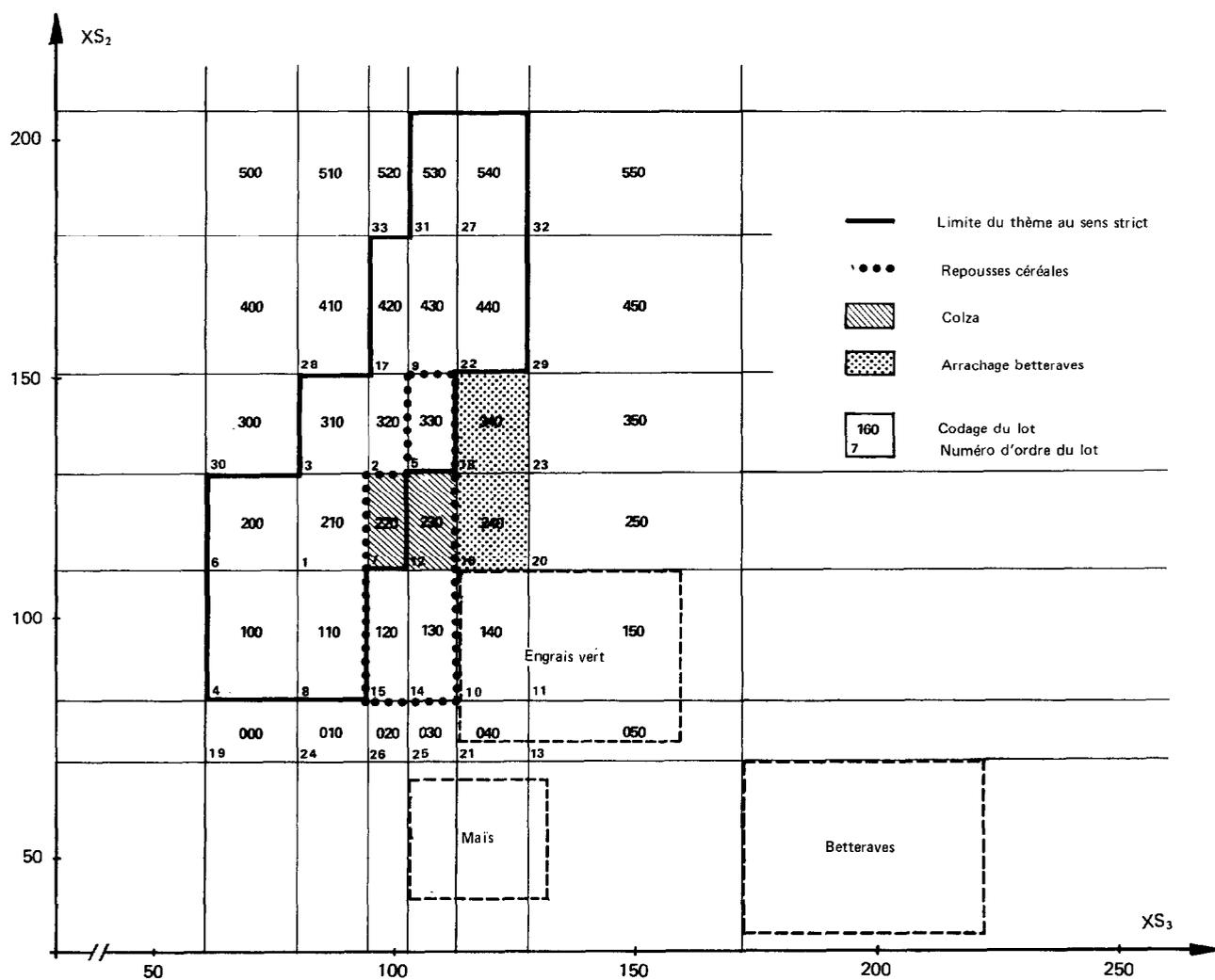


Fig. 16. — Incidences de la végétation sur la signature spectrale des sols nus

(c) Les différences de réflectance  $X S3 - X S2$ 

Les remarques qui précèdent montrent tout l'intérêt de l'étude de la différence des valeurs de réflectance  $X S3 - X S2$  : cette différence est négative dans le cas des sols nus, mais elle s'annule et devient positive lorsque la densité du couvert augmente. A titre d'exemple, sur quelques-unes des diverses parcelles étudiées à Ermenonville, on a pu établir l'échelle suivante des valeurs de  $X S3 - X S2$  (fig. 17) :

	$X S3 - X S2$
Sols nus clairs de bas-fonds.....	— 80 à — 50
Labour grossier.....	— 49 à — 34
Chaumes, sols nus divers.....	— 49 à — 6
Colza.....	— 37 à — 6

Repousses de céréales.....	— 49 à + 6
Arrachage des betteraves.....	— 19 à + 6
Parcelle culture biologique.....	— 1 à 52
Engrais vert.....	14 à 50
Maïs.....	51 à 92
Maïs semences.....	93 à 114
Betteraves + Prairies.....	115 à 190

A titre indicatif, au cours de la même expérience, mais en milieu forestier, on a obtenu les résultats suivants :

Forêt feuillue.....	70-140
Forêt résineuse.....	13- 70
Clairières.....	45-107

On notera que la gamme des valeurs obtenues en

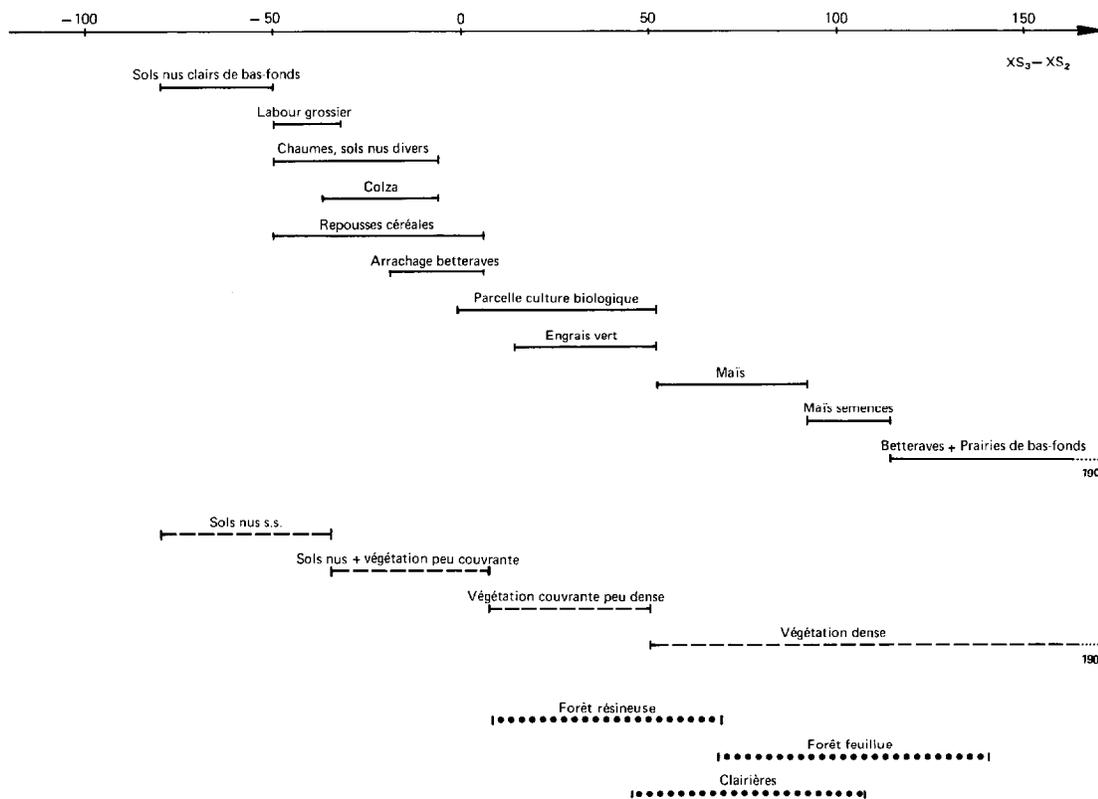


Fig. 17. — Échelonnement des valeurs de la différence des réflectances  $X_{S_3} - X_{S_2}$

clairières, avec végétation dense de fougères et de graminées sèches, est comparable à celle obtenue pour les maïs.

(d) *Les rotations d'axes*

Les considérations qui précèdent incitent à étudier la possibilité d'une rotation d'axes. Il apparaît en effet que, dans la représentation graphique des valeurs de réflectance sur  $X_{S_2}$  et  $X_{S_3}$  (fig. 16), 2 directions privilégiées peuvent être mises en évidence : la première est celle du classement des sols nus, la seconde celle du classement des sols en fonction de la densité du couvert végétal. Les équations des 2 droites en question sont approximativement les suivantes :

$$A = 0,96 X_{S_2} + 0,65 X_{S_3} + 10$$

$$B = -0,45 X_{S_2} + 0,89 X_{S_3} + 75$$

On peut alors envisager de projeter les points du graphique sur les deux droites ainsi définies. On créerait ainsi en quelque sorte 2 « canaux » nouveaux, dénommés A et B, qui devraient classer les pixels en fonction des deux critères étudiés : teinte du sol, activité de la végétation. Une loterie sur les « canaux »

A et B devrait conduire à un classement des différents lots plus précis que celui obtenu sur  $X_{S_2}$  et  $X_{S_3}$ .

Le résultat de cette opération est présenté sur les figures 18 et 19. On définit de la sorte 11 lots différents (fig. 18) par regroupement des lots initiaux (fig. 19) ; ces 11 lots peuvent être cartographiés. On observe :

- que la cartographie des thèmes d'occupation des sols est satisfaisante ;
- que le thème sols nus au sens large a pu être subdivisé en 6 lots distincts ;
- que des subdivisions plus fines pourraient être envisagées sur d'autres thèmes, par exemple sur les forêts.

(e) *Comparaison LANDSAT-SPOT*

Du fait d'un concours de circonstances heureux, il se trouve que nous disposons d'une image LANDSAT réalisée le jour même de l'exécution de l'Opération Simulation SPOT Ermenonville 80. Il était donc intéressant *a priori* de tenter une comparaison des résultats obtenus dans les deux cas,

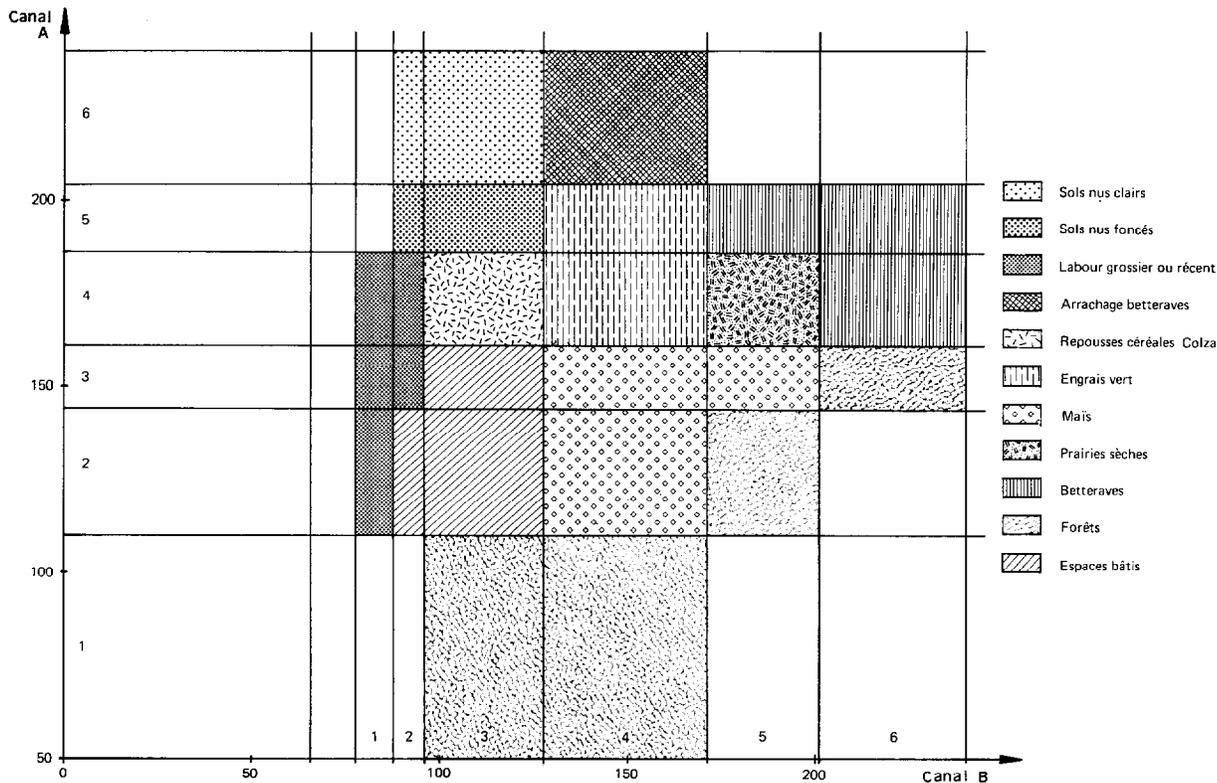


Fig. 18. — Loterie du secteur cultivé après rotation d'axes

CADRE:  
L= 461 972  
C= 1 512

CODAGE DES LOTS \*\*\*\*\*

CANAL A 27 0 49 50 110 111 144 145 161 162 186 187 204 205 240 \*\*\*\*\*  
CANAL XS2 0 255 \*\*\*\*\*  
CANAL XS3 0 255 \*\*\*\*\*  
CANAL B 66 77 78 87 88 95 96 127 128 171 172 200 201 240 \*\*\*\*\*

N	CL	NPIX	%1	%T	
1	4004	41416	0.158	0.158	Betteraves
2	6003	26148	0.100	0.258	Sols nus clairs
3	5003	26108	0.100	0.357	Sols nus foncés
4	2004	21504	0.082	0.439	Maïs
5	4003	19480	0.074	0.514	Repousses Colza
6	1004	14192	0.054	0.568	Forêt
7	4002	13068	0.050	0.618	Labour grossier ou récent
8	5006	12020	0.046	0.664	Betteraves
9	2005	11256	0.043	0.706	Forêt
10	5002	8848	0.034	0.740	Sols nus foncés
11	6002	6568	0.025	0.765	Sols nus clairs
12	4004	6532	0.025	0.790	Engrais vert
13	3004	6264	0.024	0.814	Maïs
14	4005	4808	0.018	0.832	Prairies sèches
15	3002	4740	0.018	0.850	Labour grossier ou récent
16	2003	4540	0.017	0.868	Espaces bâtis
17	3005	4536	0.017	0.885	Maïs
18	3003	4272	0.016	0.901	Espaces bâtis
19	5004	3368	0.013	0.914	Engrais vert
20	1003	3144	0.012	0.926	Forêt
21	6004	2256	0.009	0.935	Arrachage betteraves
22	2002	1512	0.006	0.941	Espaces bâtis
23	4001	1280	0.005	0.946	Labour grossier ou récent
24	2001	1160	0.004	0.950	Labour grossier ou récent
25	3001	1084	0.004	0.954	Labour grossier ou récent
26	3006	1080	0.004	0.958	Forêt
27	5005	1020	0.004	0.962	Betteraves
28	1005	692	0.003	0.965	
29	1001	544	0.002	0.967	
30	1002	516	0.002	0.969	
31	6006	420	0.002	0.970	
32	2006	376	0.001	0.972	
33	0	276	0.001	0.973	
34	0	232	0.001	0.974	
35	6005	232	0.001	0.974	
36	1000	188	0.000	0.975	
37	1	124	0.000	0.976	
38	5001	124	0.000	0.976	
39	6001	104	0.000	0.977	
40	2	96	0.000	0.977	
41	2000	80	0.000	0.977	
42	4000	12	0.000	0.977	
43	3000	8	0.000	0.977	
44	5000	8	0.000	0.977	

Regroupement des lots				
Labour grossier ou récent	2001	3001	4001	4002 3002
Sols nus foncés	5002	5003		
Sols nus clairs	6002	6003		
Repousses colza	4003			
Espaces bâtis	3003	2003	2002	
Maïs	2004	3004	3005	
Prairies sèches	4005			
Engrais vert	4004	5004		
Arrachage betteraves	6004			
Betteraves	5005	5006	4006	
Forêt	3006	2005	1004 1003	

Fig. 19. — Statistique des lots après rotation d'axes.

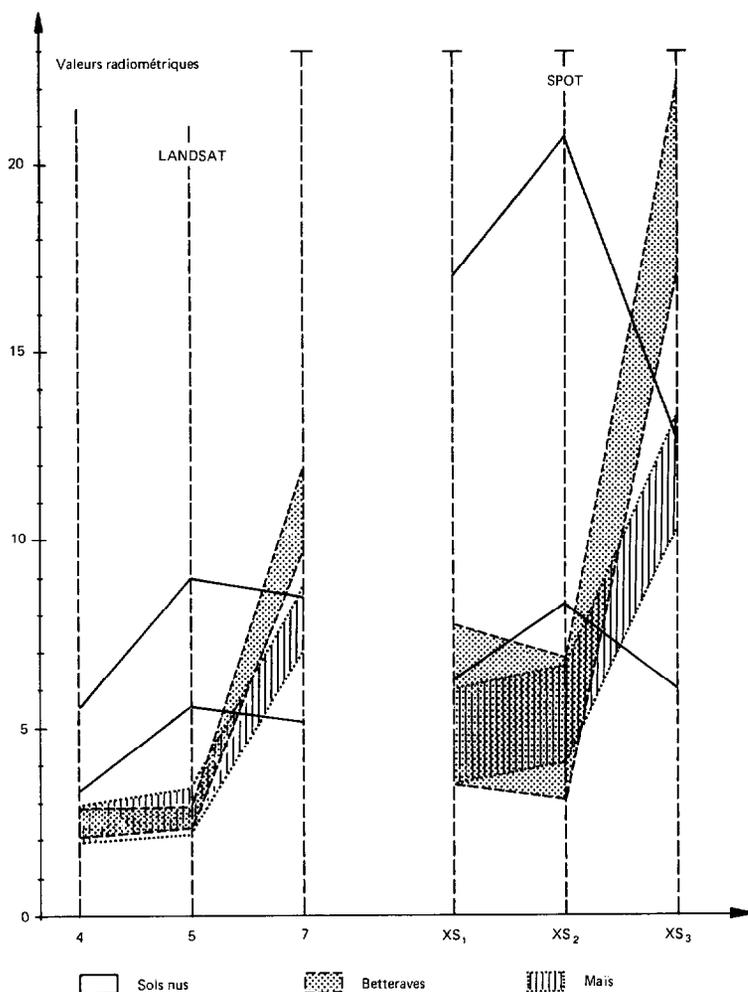


Fig. 20. — Comparaison Landsat - Spot. Réponses spectrales des sols nus, de la betterave et du maïs

le laps de temps séparant les observations étant de l'ordre de 2 heures.

Cette comparaison est illustrée par un graphique (figure 20) représentant les signatures spectrales des 3 thèmes principaux du milieu cultivé (betteraves, maïs, sols nus) sur les longueurs d'onde comparables : on a retenu dans ce but les canaux 4, 5 et 7 de LANDSAT, et les canaux X S1, X S2 et X S3 de SPOT. On observe que les réponses spectrales sont strictement du même type, mais que les fourchettes des valeurs radiométriques sont nettement plus étalées sur SPOT que sur LANDSAT. Les possibilités de discrimination au sein d'un même thème seront donc bien plus grandes dans le premier cas. Cette observation est particulièrement justifiée dans le cas du thème « sols nus », mais aussi

pour la discrimination maïs-betterave, la mise en évidence des stades végétatifs du maïs, et pour la caractérisation des thèmes secondaires, engrais vert par exemple.

En ce qui concerne la précision des restitutions, on pouvait s'attendre à une finesse bien plus grande de la Simulation SPOT, ce qui est effectivement vérifié : la comparaison des images diazo obtenues dans les 2 cas est très démonstrative. Nous observons cependant que les données fournies par l'image LANDSAT sont d'une très haute qualité : elles permettent en effet une identification précise de la plupart des thèmes inventoriés ci-dessus. Elles sont souvent insuffisantes pour détecter l'hétérogénéité au sein de chaque thème par exemple dans le cas du maïs, mais permettent toutefois de dis-

criminer les sols nus forcés des sols clairs dans de bonnes conditions. Ces résultats sont confirmés par l'analyse numérique des données.

La comparaison des résultats Landsat-Spot fera ultérieurement l'objet d'un travail particulier.

A titre d'essai, une estimation de la surface occupée par un thème déterminé à l'échelle de la parcelle individuelle ou du groupe de parcelles a été tentée sur les parcelles 19, 6 et sur l'ensemble 24+26+27, dont les superficies cadastrales sont respectivement de 16,13 ha, 13,68 ha et 54,06 ha. En attribuant au pixel une superficie de 400 m<sup>2</sup>, les superficies calculées étaient respectivement de 16,30, 13,12 et 56,20 ha. Les erreurs d'appréciation étaient alors de +2,9 %, - 4,1 %, +4,8 %. Il va de soi que l'erreur commise à l'échelle de l'ensemble d'une scène serait plus faible.

## VI. CONCLUSIONS

On peut résumer comme suit l'ensemble des résultats acquis au cours de cette opération :

— Tant au moyen des méthodes photochimiques qu'avec l'aide des traitements numériques, il s'est avéré possible de classer sans ambiguïté notable les principaux thèmes d'occupation du sol au moment de l'expérience (à l'exception de la confusion betteraves-prairies de bas-fonds), et de les cartographier en tant que tels, soit en les discriminant sur image, soit en les traçant au moyen d'une imprimante et d'une table Benson.

— Certains des thèmes étudiés se prêtaient à une étude de l'hétérogénéité au sein du thème, et

cette hétérogénéité a pu être mise en évidence et cartographiée dans le cas des sols nus.

— L'échelle de cartographie retenue, de l'ordre de 1/15.000 a été jugée satisfaisante par comparaison avec les informations fournies par les photos aériennes de type classique ou les photos infra-rouge couleurs.

— Les observations basées sur les corrélations entre les canaux X S2 et X S3 ont montré le mode d'évolution de la signature spectrale du thème sols nus au fur et à mesure du développement d'une végétation à leur surface, et également les incidences du travail du sol par le biais de la rugosité de cette surface. Les différences de luminance entre X S3 et X S2 conduisent à un classement assez cohérent de l'activité chlorophyllienne des divers végétaux présents.

— La comparaison LANDSAT-SPOT permet de se faire une idée de ce que devrait être le gain de précision attendu des futures données SPOT.

LES RÉSULTATS présentés dans cet article sont le fruit de la participation de l'ensemble des membres du Bureau de Télédétection de l'O.R.S.T.O.M., dirigé par J. Cruette, et plus spécialement, de G. Dandoy, A. Aing et B. Lortic pour le laboratoire de Photographie, de J. Noël, R. Chaume et L. Vercesi pour le laboratoire d'Analyse Numérique d'Images. Les illustrations sont de E. Driffort.

Les données de terrain ont été acquises grâce à la collaboration très active de J.-B. Martin pour le secteur cultivé, et aux renseignements fournis par l'Office National des Forêts pour le secteur forestier.

*Manuscrit reçu au Service des Éditions de l'O.R.S.T.O.M.  
le 15 février 1982.*