

SIMULATION DES DONNÉES DU FUTUR SATELLITE SPOT

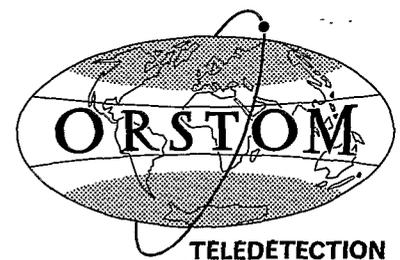
Ermenonville 1980

**Résultats dans le domaine de l'occupation des sols
et comparaison Landsat - Simulation Spot**

A. COMBEAU

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ET TECHNIQUE OUTRE-MER



INITIATION – DOCUMENTATIONS TECHNIQUES

N° 53

TÉLÉDÉTECTION 7

ORSTOM

PARIS

1982

.....

« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective» et, « d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon « sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal.»

SIMULATION DES DONNÉES DU FUTUR SATELLITE SPOT

— Ermenonville, 1980 —

**RÉSULTATS DANS LE DOMAINE DE L'OCCUPATION DES SOLS
ET COMPARAISON LANDSAT - SIMULATION SPOT**

A. COMBEAU

Directeur de Recherches à l'ORSTOM



Les résultats présentés dans cet article sont le fruit de la participation de l'ensemble des membres du Bureau de Télédétection de l'ORSTOM 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 l'œuvre de E. Driffort et l'édition du texte a été assurée par l'imprimerie du Service des Éditions de l'ORSTOM sous la direction de J. Quinet.

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.

PLAN

I – Introduction

II – Le site expérimental

III – Les méthodes de traitement
 Traitement photochimique
 Traitement numérique

IV – Les résultats

1 - Les signatures spectrales des différents thèmes

2 - Les variations au sein des thèmes

3 - Synthèse des résultats

a - l'équidensité colorée

b - la procédure Loterie

c - les différences de réflectance XS_3 - XS_2

d - les combinaisons linéaires de canaux

V – Comparaison LANDSAT – Simulation SPOT

VI – Conclusions

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 multispectrale (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 établit une comparaison entre les résultats de cette expérience de simulation et ceux des satellites opérationnels (Landsat).

SUMMARY

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.



Figure 1 - ERMENONVILLE, LE SECTEUR CULTIVÉ
Photo Panchromatique IGN - 77 2413/300 UAG 368 du 15.10.1977.

I - INTRODUCTION

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'ORSTOM 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.

II - 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 (CRIS). Ces produits sont soumis à des investigateurs en vue d'en effectuer une interprétation thématique et cartographique. L'ORSTOM 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'ORSTOM 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).
- Existence de photos aériennes de bonne qualité, prises à des dates différentes, à l'échelle de 1/30 000.
- 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.

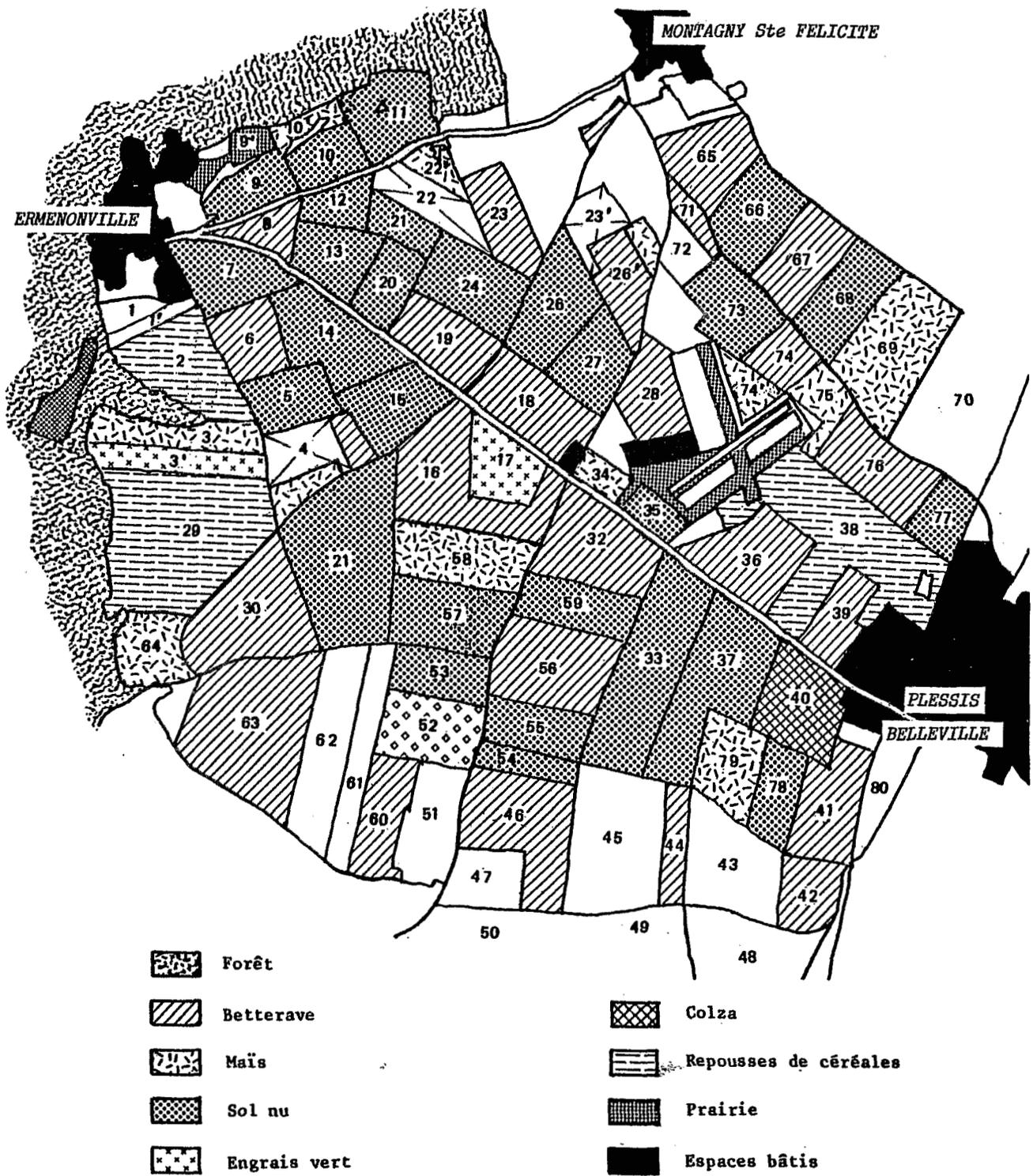


Figure 2 - Carte d'occupation des sols au 28.9.1980 (échelle approximative : 1/36 000)

- 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 St-Ouen). Les sols qui se sont développés sur ce limon sont des sols bruns lessivés présentant souvent des traces d'hydromorphie. Il est à remarquer que le plateau loessique 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 distincts 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 St-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 St-Ouen.

L'agriculture pratiquée dans le secteur cultivé de cette région repose essentiellement sur la succession blé d'hiver - betterave, ou blé - maïs. Il est rare d'observer deux 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

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 quatre jours plus tard, le 2 octobre, d'où certaines distorsions entre les enregistrements Daedalus et les photos IRC. La zone couverte comportait trois axes de vol parallèles de 9 km de long et espacés de 4 km environ. Des observations ont été faites au sol, avec prises de photos, le 29.09.80, lendemain de l'exécution du premier vol, et trois 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 trois 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, 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.

- 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 28.9.1980.
- 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.

III – 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 diazo par tirage des canaux XS_1 , XS_2 , XS_3 respectivement sur films jaune, magenta et cyan, soit par tirage contact, soit avec un agrandissement 2. Dans un second temps, les films Visumat 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 optiques 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'ORSTOM comporte un ordinateur Mini 6 de CII HB, un écran de visualisation de 256x256 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 XS_1 , XS_2 , XS_3 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 thème.
- application éventuelle d'une combinaison linéaire de canaux 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.

IV – 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.

I - LES SIGNATURES SPECTRALES DES DIFFÉRENTS THEMES

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 trois 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).

XS ₁	XS ₂	XS ₃	P
078	069	223	089
035	031	171	051

On remarquera au passage les valeurs radiométriques élevées obtenues sur le canal XS₃.

L'application du programme VISSER nous montre que ce serpent définit le thème sans ambiguïté, exception faite des prairies de bas-fond, 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 :

	XS ₁	XS ₂	XS ₃	P
Arrachage terminé	126	147	172	143
	080	102	115	099
Arrachage en cours	126	151	138	142
	091	115	111	105

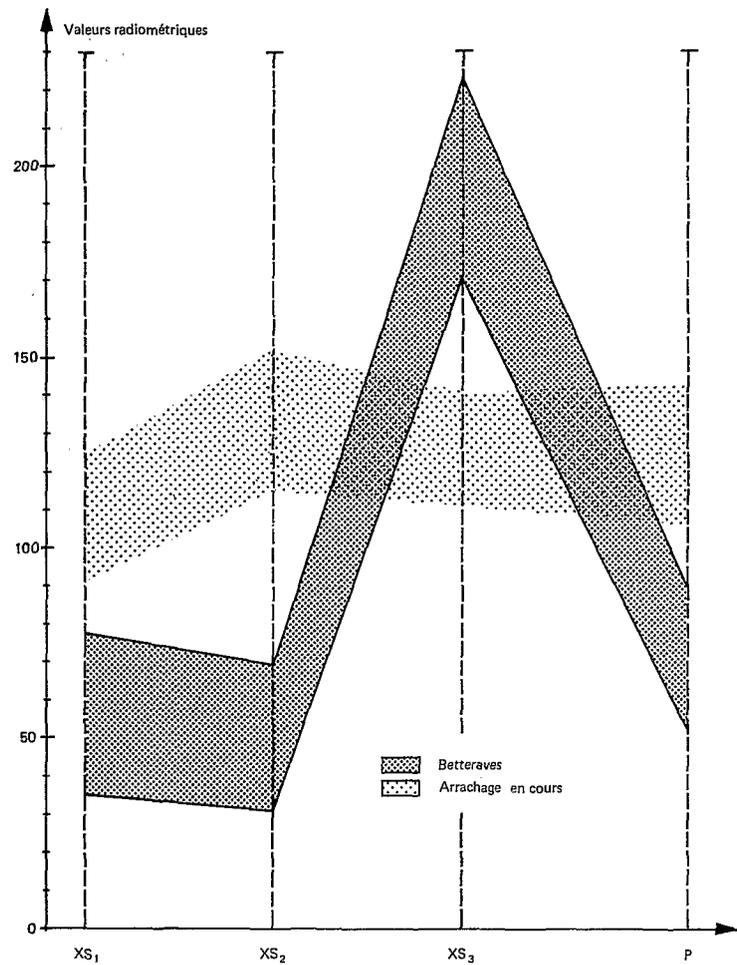


Figure 3 - Réponse spectrale du thème Betteraves

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 XS₁, XS₂, P, plus faibles sur XS₃, 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.

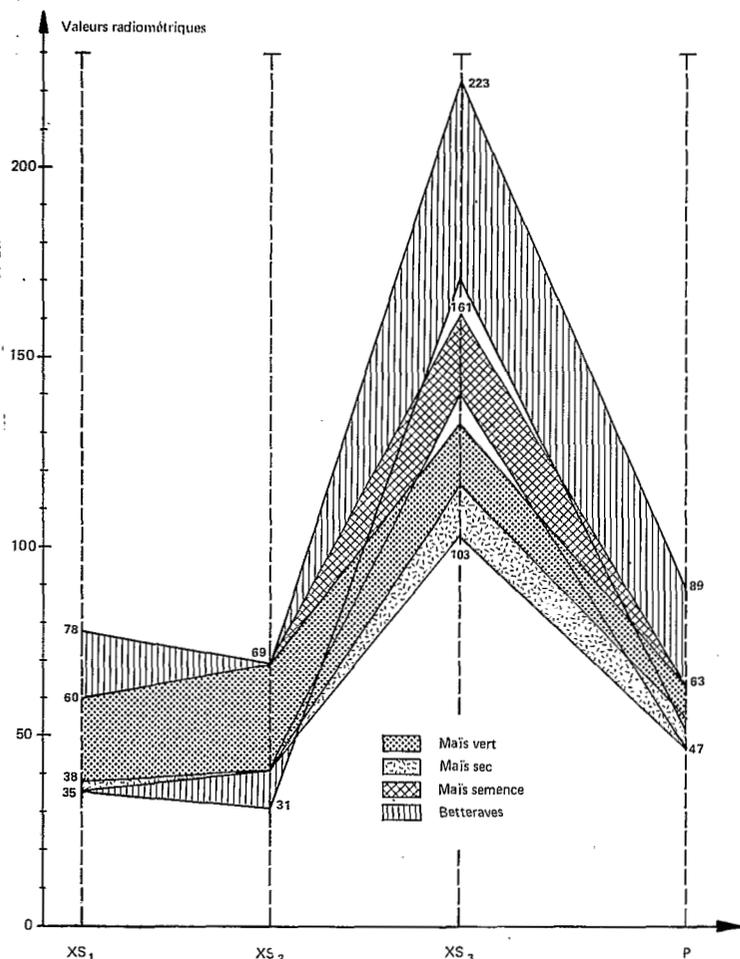


Figure 4 - Réponse spectrale du thème maïs
(Comparaison avec Betteraves)

canaux XS₁, XS₃ 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 :

XS ₁	XS ₂	XS ₃	P
060	067	132	063
060	067	132	063
038	041	116	053
035	041	103	047

la visualisation des deux 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 XS₃ : les valeurs radiométriques sont alors comprises entre 140 et 162 (Fig. 4).

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 ex. : la parcelle 54, en comparaison des parcelles 4 bis et 3).

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

XS ₁	XS ₂	XS ₃	P
060	067	132	063
035	041	103	047

Ce serpent est disjoint de celui de la betterave sur le canal XS₃. 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

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 émiettées, 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 versant 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 diazo, 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 ceci avec une bonne précision qui peut être estimée par comparaison avec les photos aériennes à 1/30 000 (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) :

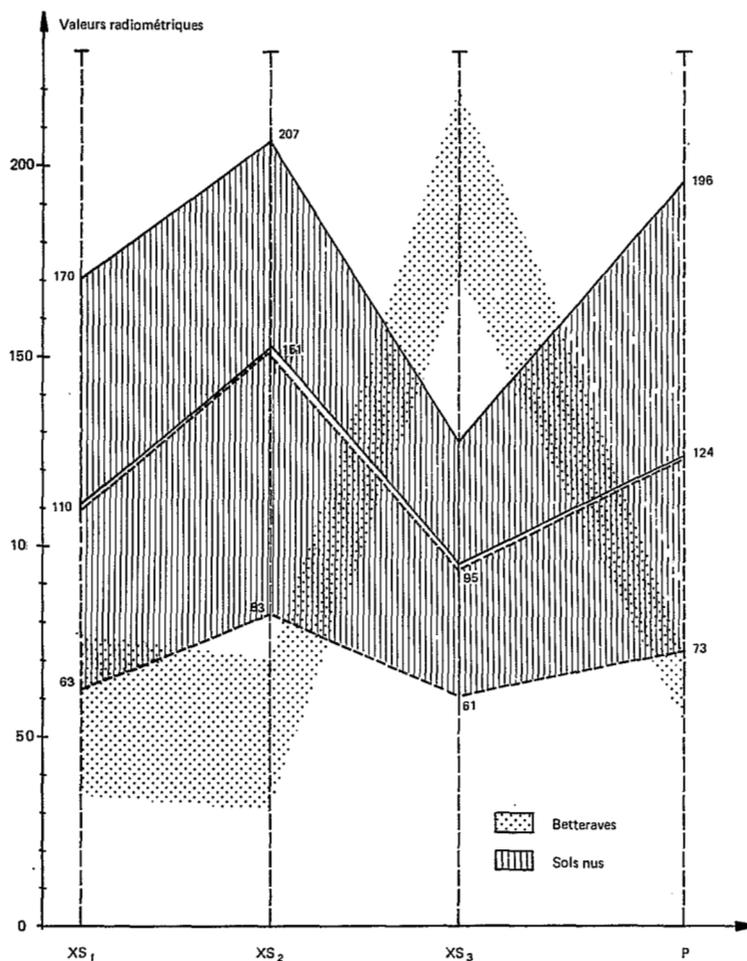


Figure 5 - Réponse spectrale du thème Sols nus (Comparaison avec Betteraves)

	XS ₁	XS ₂	XS ₃	P
Sols clairs	≥ 110	152	95	≥ 124
Sols foncés	< 110	83	61	< 124

Le facteur travail du sol peut être apprécié dans le cas de la parcelle 37 tout récemment labourée. Le sol est très motté, et la parcelle a une teinte générale sombre sur diazo, par opposition aux parcelles qui l'entourent, de teinte plus claire, et ceci 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 radiométrique - seuil entre ces deux parcelles - sont les suivantes :

	15 Labouré	14 Non Labouré	Netteté de la limite
X S ₁	< 115	≥ 115	peu nette
X S ₂	< 150	≥ 150	peu nette
X S ₃	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), ou encore à la rugosité du sol labouré.

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 S ₁	X S ₂	X S ₃	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.

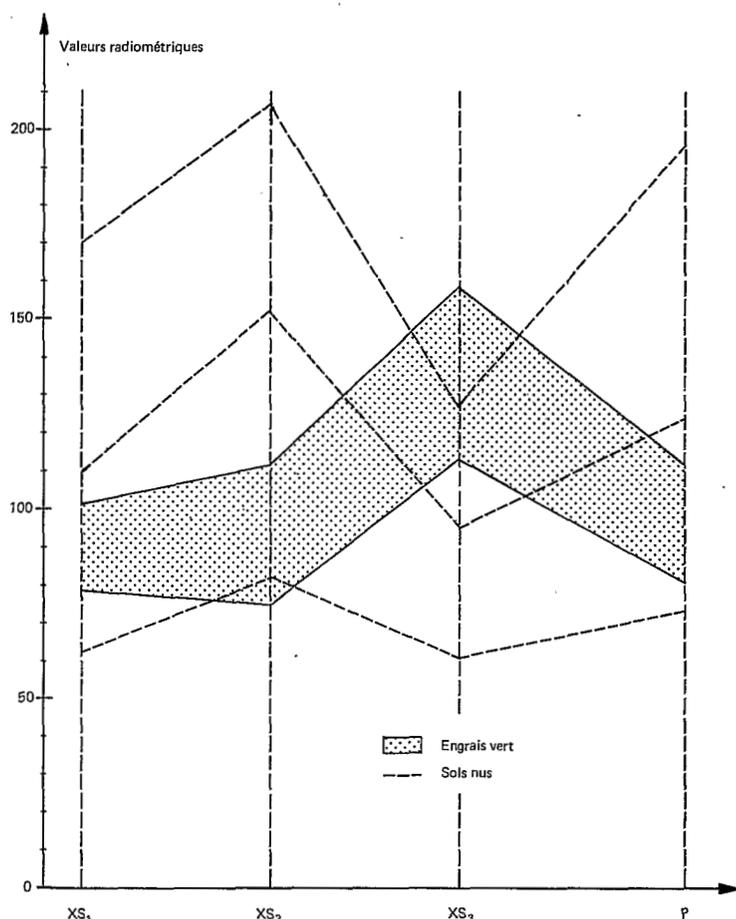


Figure 6 - Réponse spectrale du thème engrais vert
(Comparaisons avec Sols nus)

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 S ₁	X S ₂	X S ₃	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 deux 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 deux 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 S ₁	X S ₂	X S ₃	P
Pelouses-parcs	069	066	172	083
	046	042	129	053
Prairies de bas-fond	id.	id.	243	id.
			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.

La 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 S ₁	X S ₂	X S ₃	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.

2 LES VARIATIONS AU SEIN DES DIFFÉRENTS THEMES

Les résultats exposés précédemment avaient pour but de définir, sans ambiguïté, grâce à leur signature spectrale, chacun des six 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

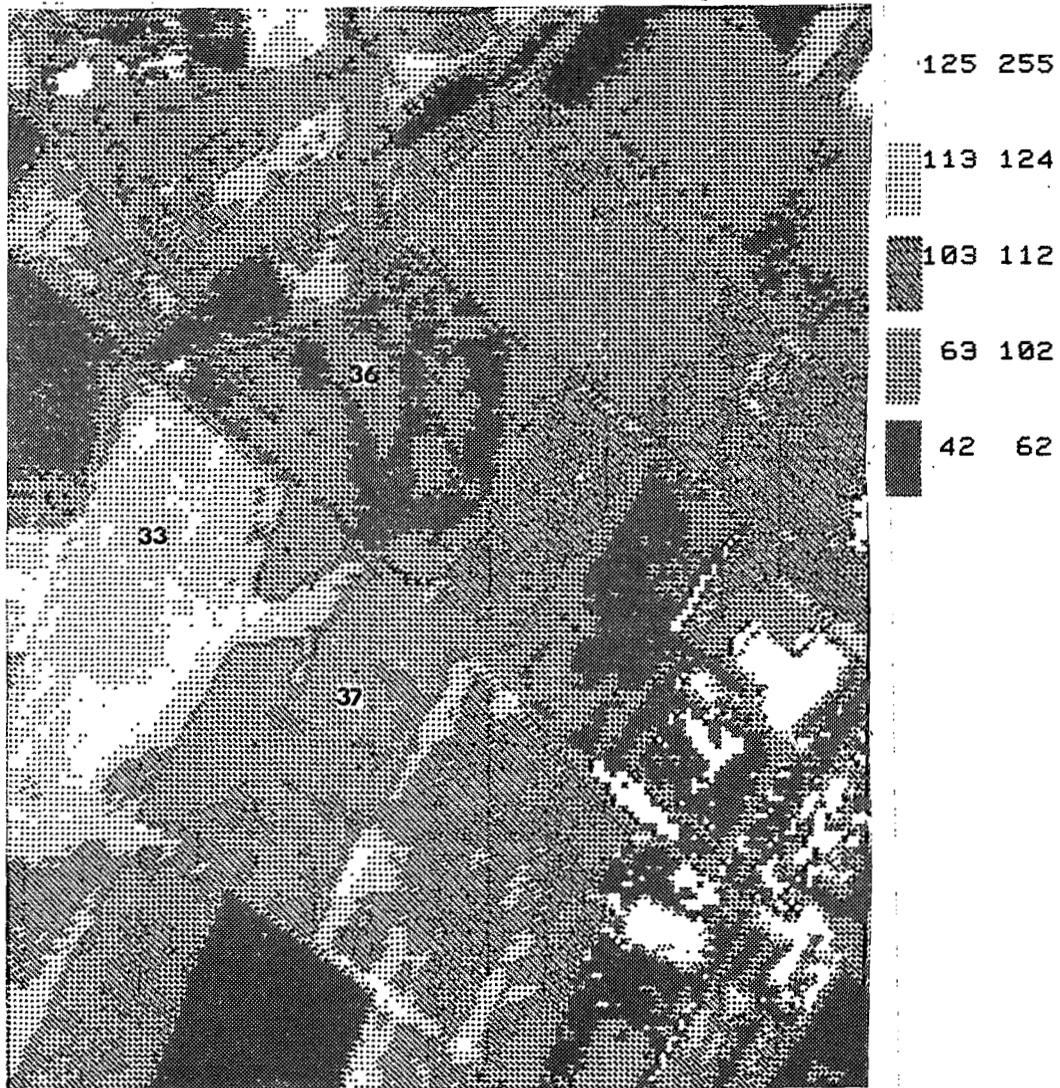


Figure 7 - Manifestations différentes de l'hétérogénéité du milieu sur sol nu et sous végétation :
Inversion du gradient de réflectance

systématiquement une baisse de réflectance à la fois sur les canaux XS_2 et XS_3 (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 XS_3 , des valeurs faibles sur les canaux XS_1 et XS_2 . 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 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 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 réflectances 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. La figure 7 illustre bien cette différence de comportement.

3 – SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

a - L'équidensité colorée

Le traitement photochimique des documents d'origine a conduit à la réalisation d'une équidensité colorée 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 opération peut être réalisée à partir des clichés correspondant à divers canaux, en l'occurrence $X S_2$ et $X S_3$.

Dans le cas présent, six thèmes distincts ont pu être isolés : Forêt, Betteraves et Prairies, Maïs, Engrais verts, Sols nus, et la parcelle en culture biologique. Les deux premiers de ces thèmes ont été extraits directement du canal $X S_3$, 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'ORSTOM, 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 $X S_1$ 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

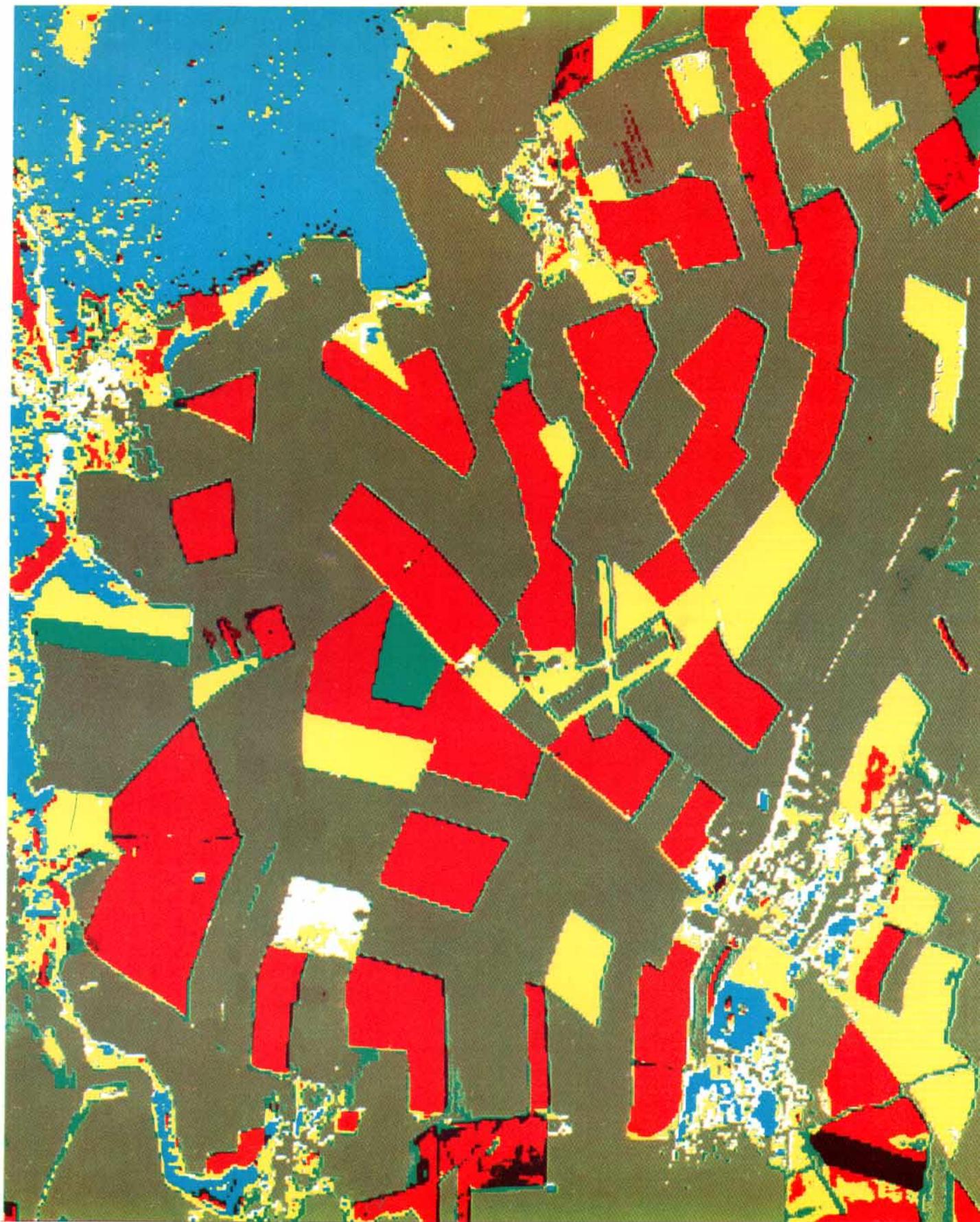


Figure 8 - Équidensité colorée.

Betteraves : orange – Maïs : jaune – Engrais vert : vert foncé – Sols nus : vert clair – Forêt : bleu.

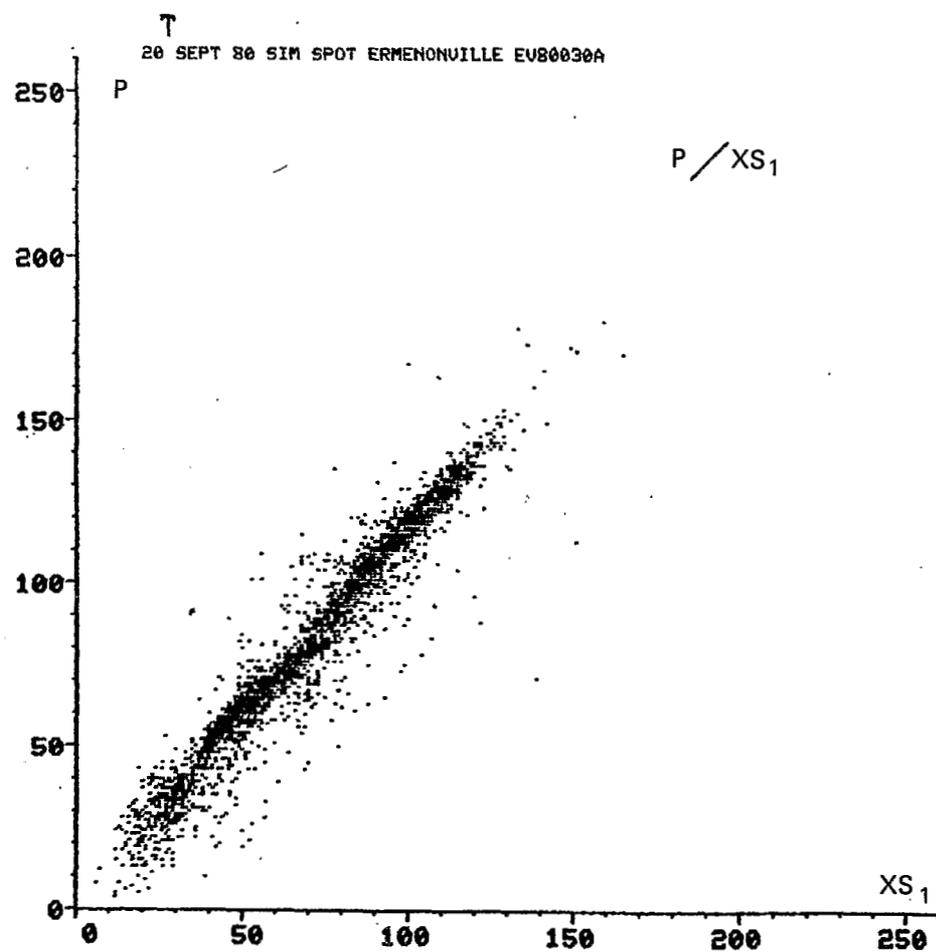
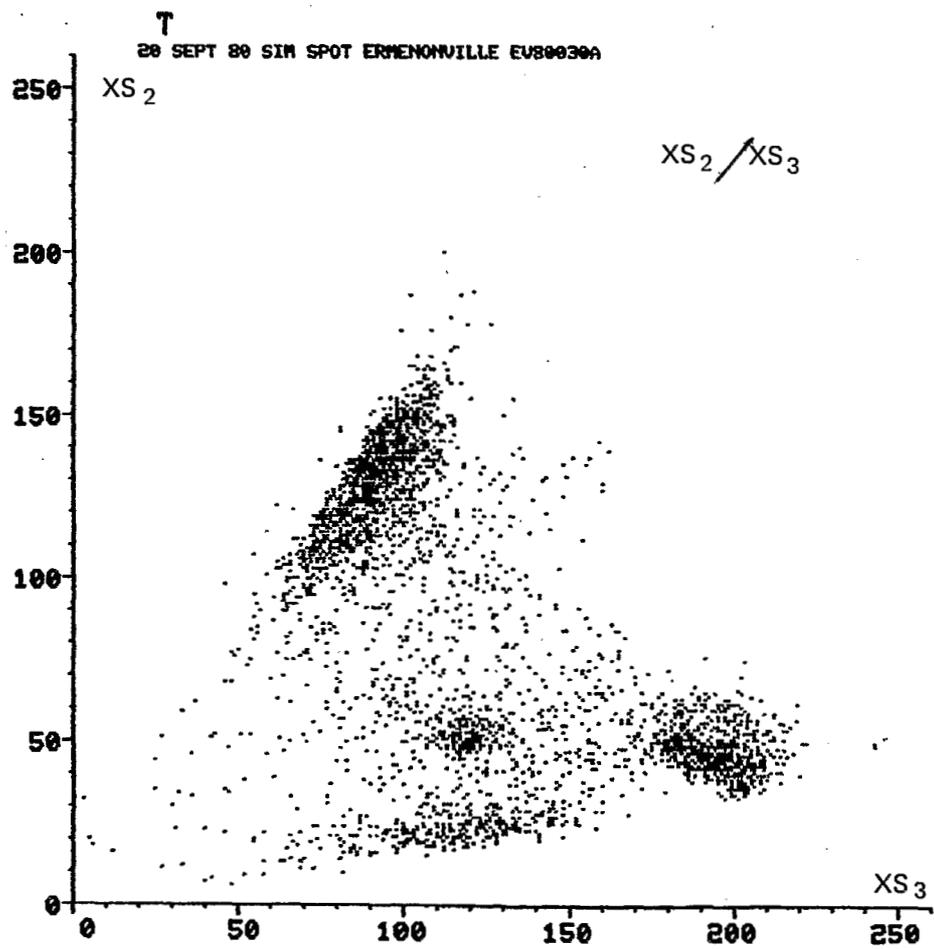


Figure 9 - Corrélation des valeurs radiométriques obtenues sur divers canaux

CADRE:
L= 461 972
C= 1 512

20

CODAGE DES LOTS *****

CANAL XS₁ 0 255 *****
CANAL XS₂ 0 30 31 40 41 66 67 68 69 74 75 82 83 110 111 206 *****
CANAL XS₃ 61 102 103 112 113 126 127 131 132 158 159 170 171 222 *****
CANAL P 0 255 *****

Laboratoire
Analyse
Numérique
Image

O.R.S.T.O.M.

N	CL	NPIX	%I	%T
1	700	73112	0.279	0.279
2	260	49484	0.189	0.468
3	600	18448	0.070	0.538
4	710	17888	0.068	0.606
5	220	12100	0.046	0.652
6	160	7680	0.029	0.682
7	240	7448	0.028	0.710
8	0	7272	0.028	0.738
9	20	5564	0.021	0.759
10	200	5340	0.020	0.779
11	40	4836	0.018	0.798
12	720	4372	0.017	0.815
13	10	3648	0.014	0.829
14	210	3412	0.013	0.842
15	620	3360	0.013	0.854
16	250	3136	0.012	0.866
17	640	2316	0.009	0.875
18	230	2184	0.008	0.883
19	610	2148	0.008	0.892
20	500	2072	0.008	0.900
21	140	2060	0.008	0.907
22	30	1976	0.008	0.915
23	740	1576	0.006	0.921
24	100	1280	0.005	0.926
25	630	1228	0.005	0.931
26	120	1180	0.005	0.935
27	400	1168	0.004	0.940
28	440	1080	0.004	0.943
29	540	912	0.003	0.947
30	730	816	0.003	0.950
31	520	612	0.002	0.952
32	110	584	0.002	0.954
33	420	544	0.002	0.957
34	460	528	0.002	0.959
35	150	488	0.002	0.960
36	510	484	0.002	0.962
37	300	452	0.002	0.964
38	410	404	0.002	0.966
39	340	396	0.002	0.967
40	130	324	0.001	0.968
41	560	308	0.001	0.969
42	650	288	0.001	0.971
43	450	284	0.001	0.972
44	530	268	0.001	0.973
45	550	268	0.001	0.974
46	360	244	0.001	0.975
47	320	228	0.001	0.975
48	750	208	0.001	0.976
49	50	196	0.001	0.977
50	430	180	0.000	0.978
51	310	176	0.000	0.978
52	660	160	0.000	0.979
53	350	140	0.000	0.980
54	330	64	0.000	0.980
55	60	44	0.000	0.980
56	760	44	0.000	0.980

REGROUPEMENT DES LOTS			
Thèmes	Lots	% Superficie	
Betteraves + Prairies	260, 160, 250, 460, 560, 650, 450	23,8 %	
	550, 360, 660, 350, 760		
Maïs	220, 240, 210, 230, 520, 420	9,9 %	
Engrais vert	620, 640, 630	2,7 %	
Sols nus foncés	600, 610, 700	42,5 %	
Sols nus clairs	710, 720		
Forêt	140, 120, 110, 150, 130, 100	2,3 %	
Arrachage Betteraves	740, 730, 750	1,7 %	

Figure 10 - Statistique des lots des sols cultivés - SPOT



Figure 11 - Loterie du Secteur Agricole

par la résolution du canal P, de préférer la filière radiométrique, donc le système multicanaux, compte tenu de l'intérêt des compositions possibles.

- il existe également une corrélation étroite entre XS_1 et XS_2 .
- par contre, la corrélation est très faible entre XS_2 et XS_3 .

Ces observations ont conduit à ne conserver comme canaux utiles que XS_2 et XS_3 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 XS_2 et XS_3 , 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.

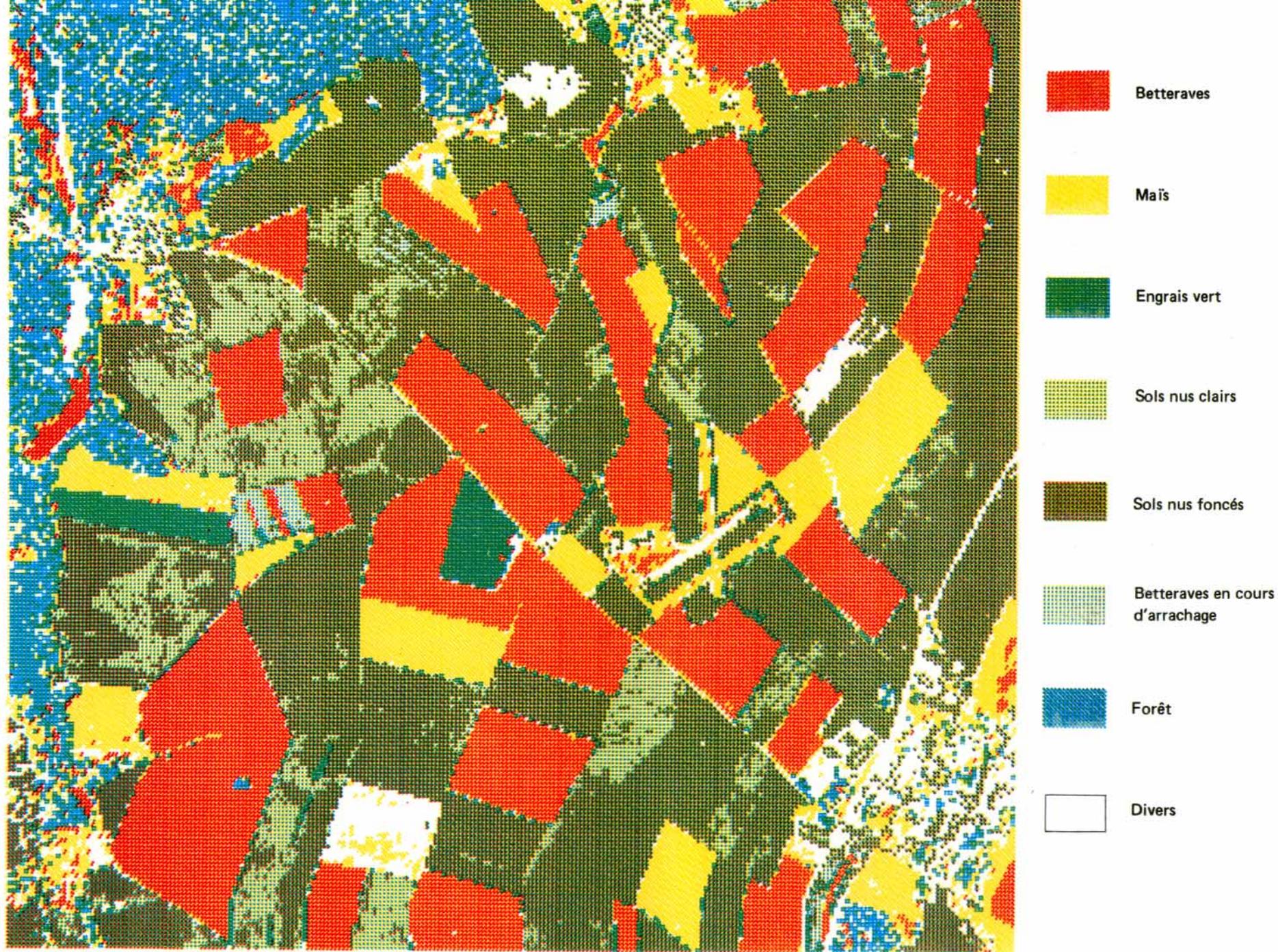


Figure 12 - Simulation Spot. Analyse de l'ensemble du secteur agricole par la procédure Loterie sur les canaux X_{S_2} et X_{S_3} .

20 SEPT 80 SIM SPOT ERMENONVILLE EV80030A

CADRE:
L= 461 972
C= 1 512

CODAGE DES LOTS *****

```

      0      1      2      3      4      5      6      7      8      9
CANAL XS1 0 255*****
CANAL XS2 71 82 83 110 111 130 131 151 152 180 181 206*****
CANAL XS3 61 80 81 94 95 102 103 112 113 127 128 172*****
CANAL P 0 255*****
  
```

N	GL	NPIX	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	0.494
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

Figure 13 - Loterie Sols nus

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 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 six 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) 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 :

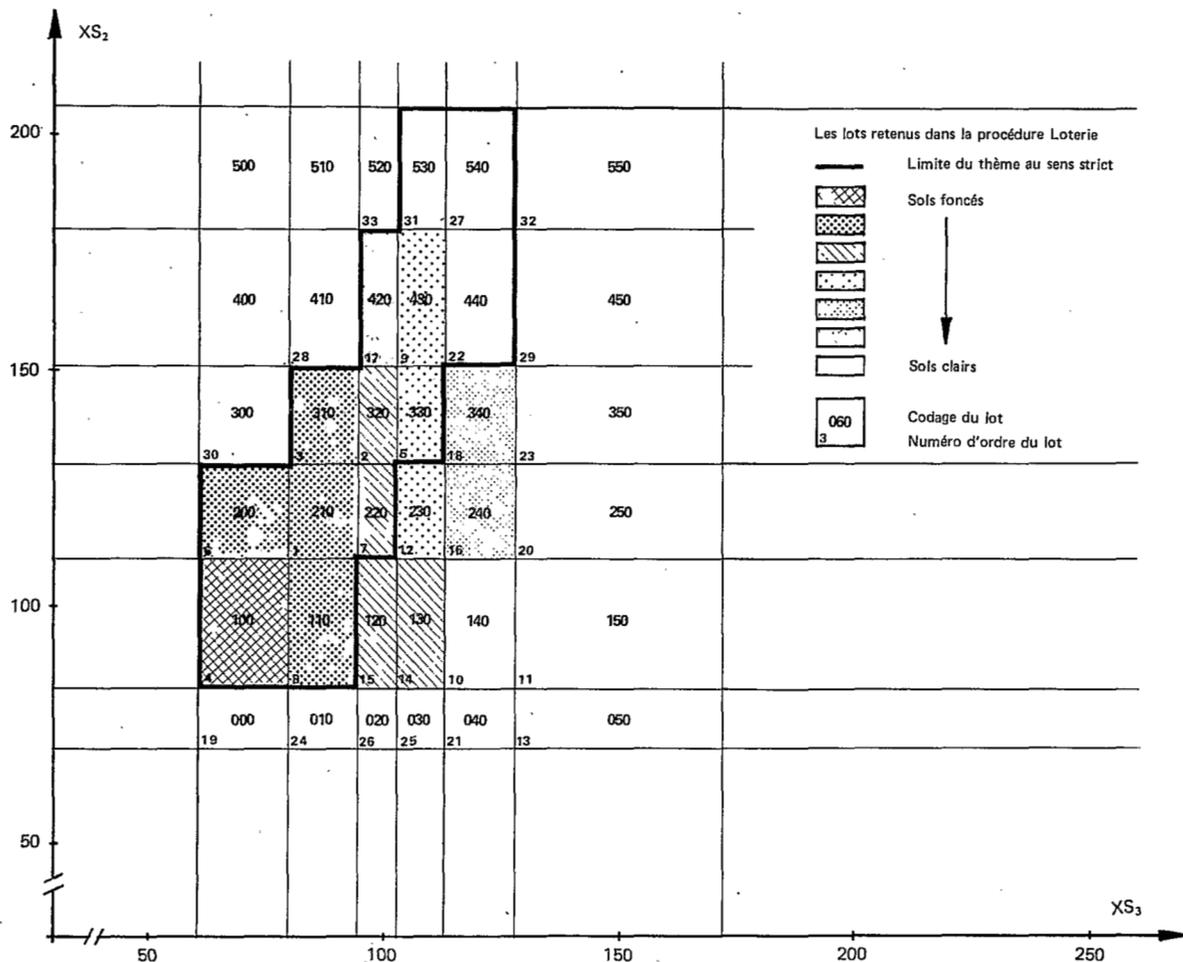


Figure 14 - Analyse du thème Sols nus par la procédure Loterie.

- 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 13 fait ressortir la nature de la corrélation entre les réflectances des sols nus sur les canaux XS_2 et XS_3 .
- 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 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 décalés 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).

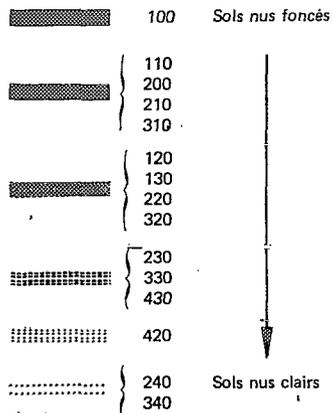


Figure 15 - Analyse du thème Sols nus par la procédure Loterie.
 Cartographie de l'hétérogénéité des sols nus

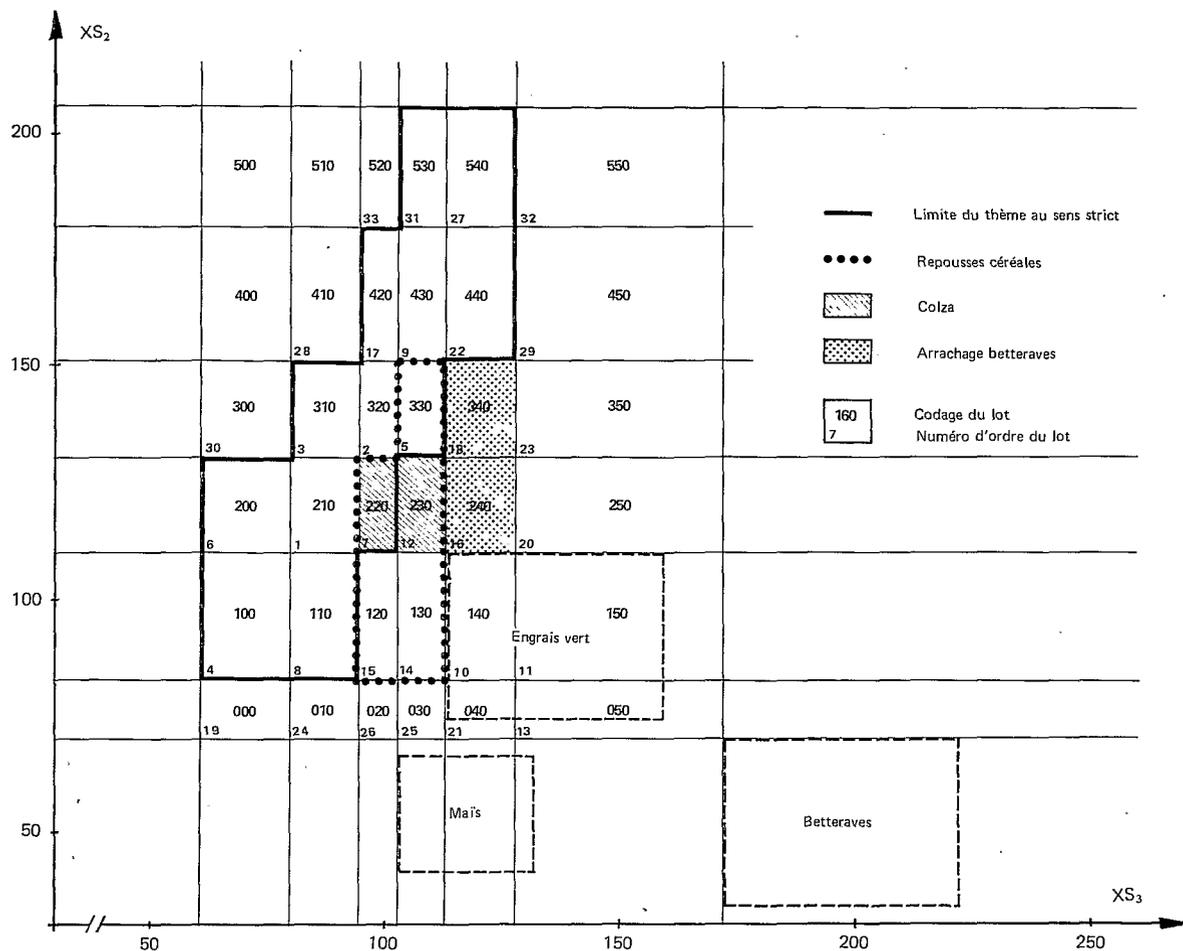


Figure 16 - Incidence de la végétation sur la signature spectrale des sols nus.

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). A 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 XS_3 , une réduction sur XS_2 . 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 deux cultures) mais que la dessiccation des parties aériennes peu avant la récolte provoque une diminution des réflectances sur XS_3 , ce qui masque en partie le phénomène.

b - Les différences de réflectance $XS_3 - XS_2$

Les remarques qui précèdent montrent tout l'intérêt de l'étude de la différence des valeurs de réflectance $XS_3 - XS_2$: 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 $XS_3 - XS_2$ (Fig. 17) :

	$X S_3 - X S_2$
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
Arrachages 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 et 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 clairières, avec végétation dense de fougères et de graminées sèches, est comparable à celle obtenue pour les maïs.

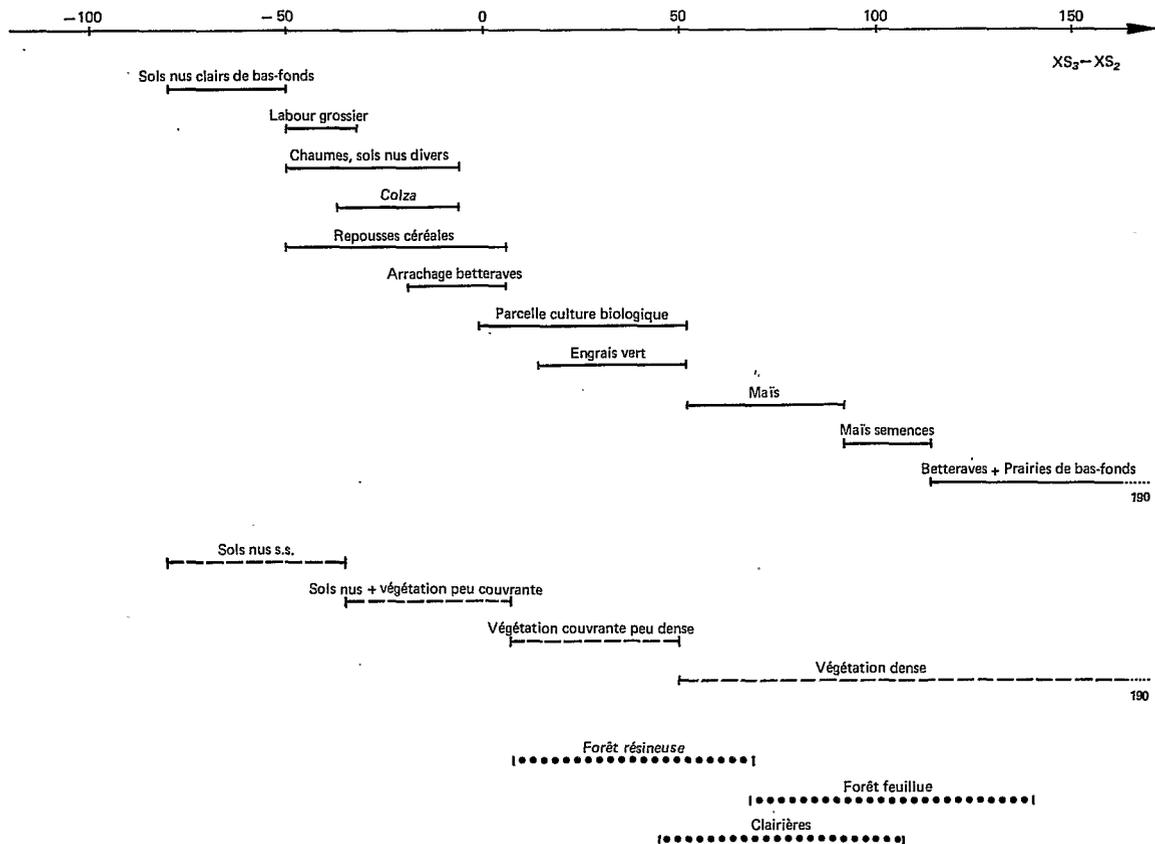


Figure 17 - Échelonnement des valeurs de la différence des réflectances $X S_3 - X S_2$

c - Les combinaisons linéaires de canaux

Les considérations qui précèdent incitent à étudier la possibilité d'une combinaison linéaire de canaux. Il apparaît en effet que, dans la représentation graphique des valeurs de réflectance sur $X S_2$ et $X S_3$ (Fig. 16), deux 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 quelques sortes deux «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 onze lots différents (Fig. 18) par regroupement des lots initiaux (Fig. 19) ; ces onze 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.

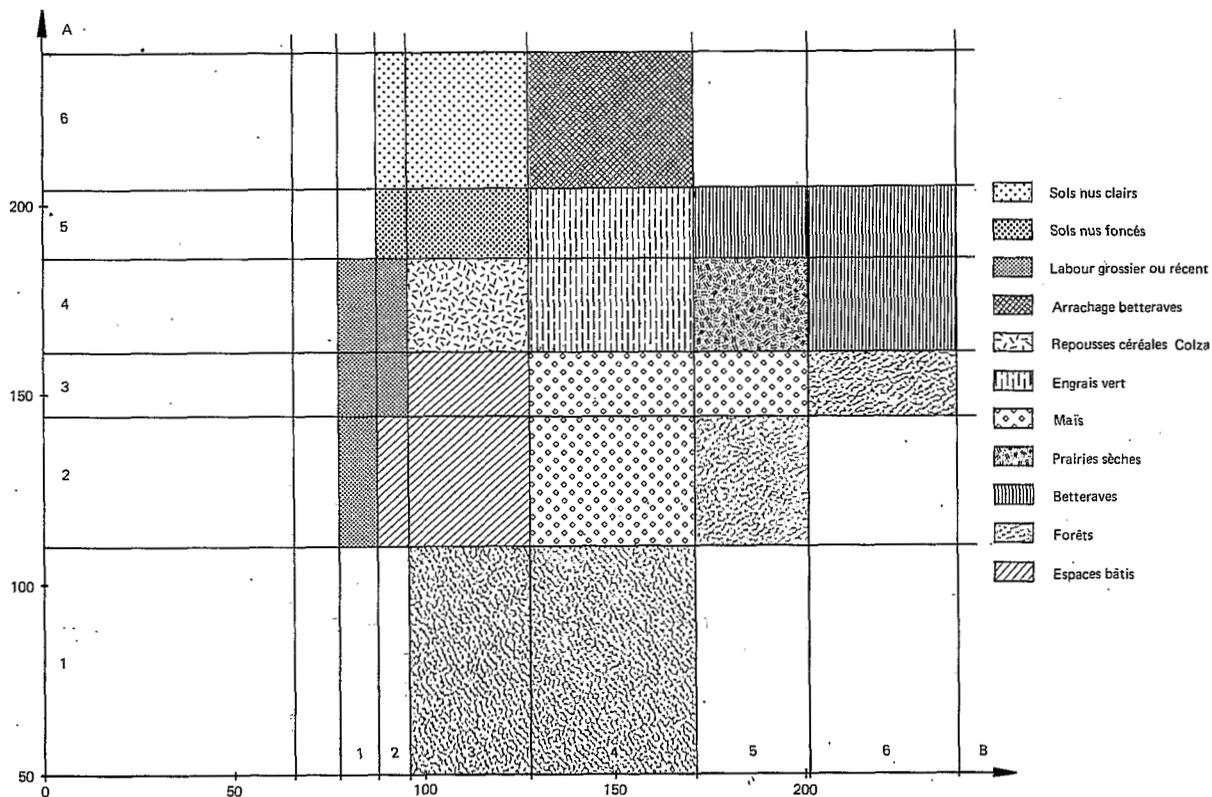


Figure 18 - Loterie du secteur agricole après combinaison linéaire de canaux

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	ZI	ZT
1	4006	41416	0.158	0.158
2	6003	26148	0.100	0.258
3	5003	26108	0.100	0.357
4	2004	21504	0.082	0.439
5	4003	19480	0.074	0.514
6	1004	14192	0.054	0.568
7	4002	13068	0.050	0.618
8	5006	12020	0.046	0.664
9	2005	11256	0.043	0.706
10	5002	8848	0.034	0.740
11	6002	6568	0.025	0.765
12	4004	6532	0.025	0.790
13	3004	6264	0.024	0.814
14	4005	4808	0.018	0.832
15	3002	4740	0.018	0.850
16	2003	4540	0.017	0.868
17	3005	4536	0.017	0.885
18	3003	4272	0.016	0.901
19	5004	3368	0.013	0.914
20	1003	3144	0.012	0.926
21	6004	2256	0.009	0.935
22	2002	1512	0.006	0.941
23	4001	1280	0.005	0.946
24	2001	1160	0.004	0.950
25	3001	1084	0.004	0.954
26	3006	1080	0.004	0.958
27	5005	1020	0.004	0.962
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	3	232	0.001	0.974
35	6005	232	0.001	0.975
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	2006	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				
Labour grossier ou récent	5005	5006	4006		
Forêt	3006	2005	1004	1003	

Figure 19 - Loterie après rotation d'axes.
 Statistique des lots.

V – COMPARAISON LANDSAT – SIMULATION SPOT

Un concours de circonstances favorables a fait que le site expérimental concerné a été survolé par le satellite Landsat 2 le jour même de l'exécution de l'opération Simulation Spot et que nous disposons par conséquent d'une image enregistrée au même moment que cette simulation, à 2 heures près.

Il a paru intéressant de comparer les documents obtenus dans les deux cas, tant en ce qui concerne l'imagerie proprement dite (documents noir et blanc ou compositions colorées) que le traitement numérique à partir des bandes magnétiques.

Les méthodes employées ont consisté, en premier lieu, en un examen des images N et B ou des compositions colorées type diazo obtenues par combinaison des canaux 4, 5, 7 de Landsat, XS₁, XS₂, XS₃ de Spot ; en second lieu, en une analyse numérique basée sur la succession d'opérations précédemment définie.

Toutes ces opérations ont été réalisées sur un cadre choisi pour être pratiquement identique dans les deux cas (Landsat et Spot), de manière à pouvoir effectuer des comparaisons valables. C'est ainsi que le cadre retenu pour Landsat était défini par les coordonnées suivantes :

Scène 215-26 du 28.09.1980 :

Lignes : 83 - 140
Colonnes : 3205 - 3310 soit 6148 pixels

alors que le cadre de l'opération Simulation Spot était défini ainsi (en increment 2) :

Simulation Spot Ermenonville du 28.09.1980 :

Lignes : 461 - 972
Colonnes : 1 - 512 soit 65536 pixels

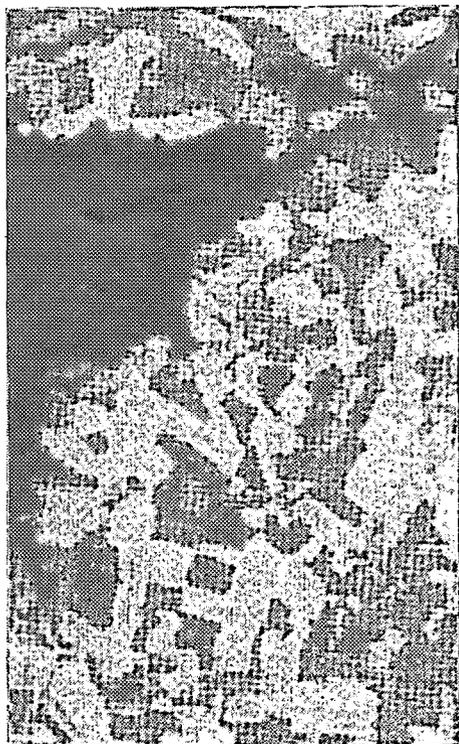
Le rapport des surfaces d'un pixel Spot à un pixel Landsat étant de l'ordre de 1 à 11, les secteurs observés ont donc des superficies voisines.

1 - RÉSULTATS DE L'ANALYSE VISUELLE

Les documents de base de l'opération Simulation Spot ont été fournis, sous forme de clichés Visumat à l'échelle de 1/62 500, ceux de Landsat à 1/1 000 000. Dans un premier temps, et conformément à la technique généralement utilisée, les documents Landsat ont été agrandis à l'échelle de 1/100 000, limite compatible avec le maintien d'une certaine qualité de l'image. Par souci d'homogénéité, les documents Spot ont été réduits à une échelle voisine de 1/100 000 : cette opération pénalise naturellement la précision des documents de Spot.

La figure 20 représente les résultats de cette comparaison sous la forme de deux couples de photos en noir et blanc, tirage standard : un couple canal 5 Landsat - canal XS₂ Spot, un couple canal 7 Landsat - canal XS₃ Spot. L'examen de cette figure appelle les commentaires suivants :

a - Les similitudes entre Landsat et Spot dans un même couple sont frappantes : sur les canaux 5 et XS₂, les sols nus apparaissent en blanc, betteraves, maïs et prairies en gris très foncé, les engrais verts en gris très clair, la forêt en noir ; sur les canaux 7 et XS₃, les sols nus apparaissent en gris plus ou moins foncé, les betteraves et prairies en blanc, les maïs et engrais vert en gris clair, la forêt en gris lorsqu'il s'agit d'essences feuillues, en noir pour les résineux.



Landsat - Canal 5



Spot - Canal XS₂

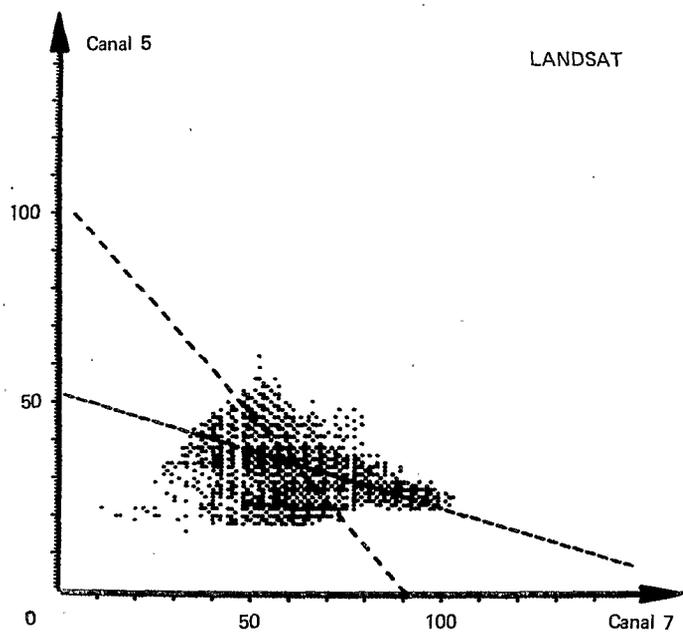


Landsat - Canal 7

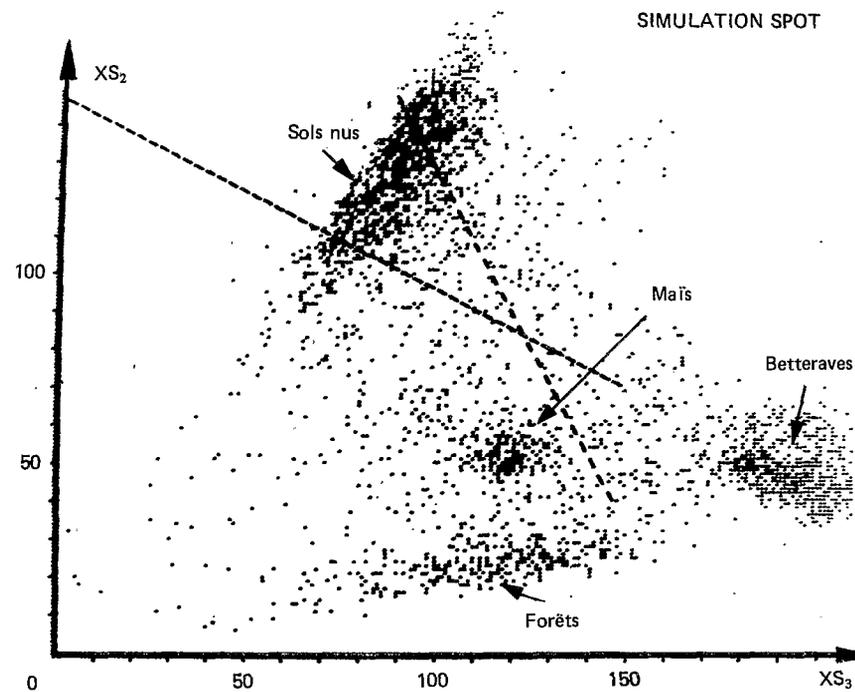


Spot - Canal XS₃

Figure 20 - Comparaison des images Landsat et Simulation Spot



$$\begin{aligned} \text{pente } Y [X] &= -0.302 \\ \text{pente } X [Y] &= -0.871 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{pente } Y [X] &= -0.515 \\ \text{pente } X [Y] &= -0.537 \end{aligned}$$

Figure 21 - Visualisation sur écran Tektronix des corrélations inter-canaux Landsat et Spot pour une même date et un même secteur géographique.

On observe cependant quelques différences de comportement : la limite forêt-sols nus est davantage perceptible sur XS₃ que sur le canal 7, la différence maïs-sols nus également. Il ne semble pas que ces différences de comportement soient dues aux conditions de développement des clichés : des essais de tirage adapté (dans le sens d'une sous-exposition) ne les atténuent pas. Il apparaît toutefois intéressant de procéder sur les canaux XS₂ et 5 à un tirage adapté, qui déplace les plages claires (sols nus) des images vers les tons plus sombres : on observe alors des nuances à l'intérieur de ces plages et on constate que ces nuances entre sols foncés et sols clairs se retrouvent avec un bon parallélisme.

b - Le gain de précision géométrique de la Simulation Spot par rapport à Landsat apparaît à l'évidence sur la figure 20 lors de l'examen des limites entre thèmes. Il convient de noter que ce gain de précision est meilleur encore qu'il n'apparaît sur cette figure, puisque l'image Landsat est agrandie 10 fois, alors que l'image Spot est réduite d'un facteur 1,5 environ. En faisant subir à l'image Spot d'origine un grossissement x2, on obtient par contre une représentation à une échelle voisine de celle de la photographie aérienne courante (1/30 000). Il est alors possible d'apprécier les précisions géométriques et radiométriques obtenues, par comparaison avec cette photo aérienne.

c - Ces remarques faites, il convient de souligner la bonne précision radiométrique de Landsat : outre les discriminations possibles entre thèmes, déjà signalées, on observe qu'il est possible de distinguer convenablement sur le canal 7 deux classes de sols nus : sols nus foncés et sols nus clairs, et d'identifier, par exemple, le labour grossier de la parcelle 37 ou la limite du labour entre les parcelles 14 et 15, ou encore le labour récent des parcelles 9, 10 et 11.

d - La réalisation d'une composition colorée type diazo permet d'affiner la comparaison des deux images, et de préciser en particulier les points b- et c- ci-dessus.

e - Il a déjà été signalé qu'il avait été possible de réaliser à partir de la Simulation Spot une équidensité colorée à une échelle proche de 1/30 000 conduisant à une excellente discrimination des thèmes observés (Fig. 8). Les seules ambiguïtés concernent, d'une part, la confusion entre betteraves et prairies de bas-fonds (confusion qui pourrait être éliminée sans difficulté si l'on disposait d'images correspondant à d'autres dates, par exemple en hiver), d'autre part le caractère complexe du milieu bâti (habitat de type pavillonnaire des trois localités situées dans le champ d'observation). Il est apparu délicat de réaliser un document identique à partir de Landsat, donc à l'échelle de 1/100 000, du fait de la résolution de l'image.

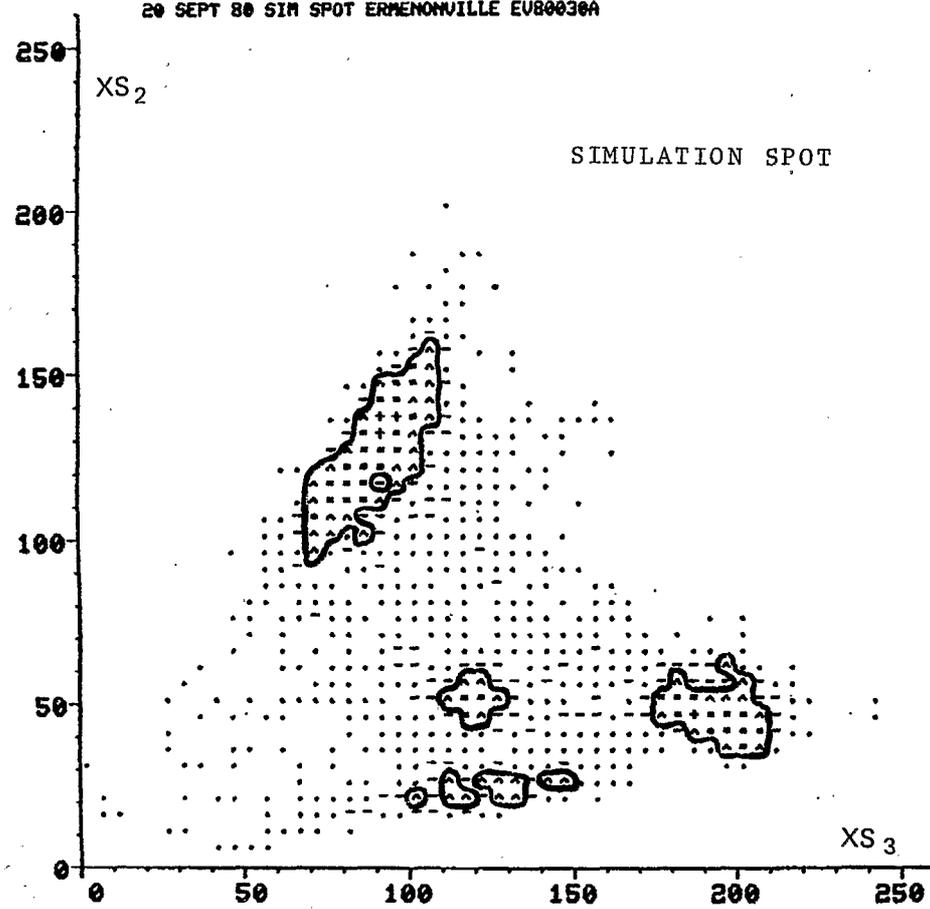
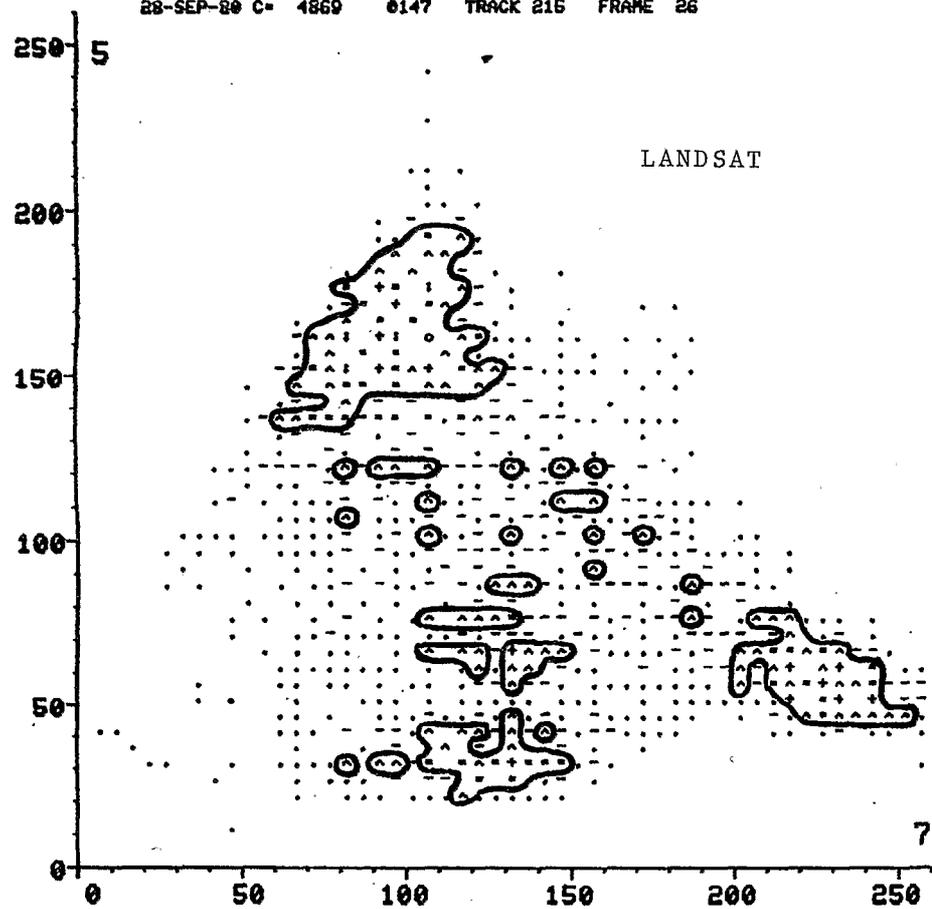
2 - RÉSULTATS DE L'ANALYSE NUMÉRIQUE

a - Remarques sur la précision radiométrique

Lors de l'exposé des résultats d'ensemble de cette opération Simulation Spot, il était apparu logique de présenter en premier lieu les valeurs de luminance obtenues pour chacun des différents thèmes sur les quatre canaux (qui définissent la signature spectrale de ce thème, représenté graphiquement par le «serpent» du thème), puis d'exposer les résultats de la procédure Loterie.

Pour comparer les résultats Landsat - Simulation Spot, il semble préférable d'étudier au préalable les caractéristiques des relations inter-canaux, en s'appuyant essentiellement sur la représentation graphique des luminances des couples XS₂, XS₃ de Spot d'une part, et 5, 7 de Landsat d'autre part. Ces caractéristiques sont représentées sur la figure 21, qui est une juxtaposition de deux photographies d'écran Tektronix exprimant les corrélations de luminance entre ces canaux.

Cette figure fait apparaître immédiatement une différence sensible entre les données des deux opérations : dans le cas de Landsat, la corrélation inter-canaux se traduit par un nuage de points homogène,



Effectif des couples
 de données par point

- . 1 à 5
- 6 à 10
- ^ 11 à 20
- = 21 à 40
- + 41 à 70
- : 71 à 100

Figure 22 - Corrélation inter-canaux avec représentation symbolique des effectifs des points représentatifs et après étalement des données Landsat. Groupement des points comportant plus de 20 couples de données.

alors que, pour Spot, il existe visiblement plusieurs concentrations de points, sous forme de constellations auxquelles il est possible de rattacher les grands thèmes d'occupation du sol : forêt, betteraves, maïs, sols nus. Cette différence de comportement pourrait n'être qu'apparente, du fait de la «densité» des points représentatifs sur le graphique Landsat. Pour s'en assurer, il a été procédé, en premier lieu, à un étalement du graphique Landsat, en vue de l'amener à une échelle comparable à celle de la Simulation 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) ; en second lieu, chaque point du graphique a été affecté d'un signe traduisant l'effectif des couples de données représentées (Fig. 22). Si l'on cerne sur ce graphique les plages à haute densité de points, par exemple celles où chaque point représente plus de 20 couples de données, deux constatations sont possibles :

- 1 - la disposition globale des deux graphiques est la même, et il y a donc bien analogie entre les couples de données des deux opérations,
- 2 - les constellations obtenues pour la simulation Spot, 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 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 XS ₂ Spot : 0,63 - 0,69 μ ,
Canal 7 Landsat : 0,77 - 0,97 μ	Canal XS ₃ 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.

En conséquence, il sera relativement simple de définir pour Spot les bornes de luminance du centre d'un thème donné (sous réserve que ce thème occupe une proportion appréciable de la surface observée) et également de fixer, avec toutefois une certaine part d'arbitraire, les bornes du thème élargi, aux frontières des thèmes radiométriquement voisins. Cette opération s'avère plus délicate pour Landsat, tout au moins dans le cadre des dimensions des parcelles unitaires caractérisant cette région du Bassin Parisien.

Des remarques qui précèdent, on peut déduire qu'il sera plus facile de définir les bornes du «serpent» d'un thème sur Simulation Spot que sur Landsat. C'est effectivement le cas, ainsi qu'il ressort de l'application du Programme de Visualisation des Serpents (VISSER) tel qu'il est applicable sur écran Péricolor : la caractérisation des thèmes sur Spot n'a pratiquement pas posé de problèmes, alors que, sur Landsat, l'effectif des points parasites est systématiquement plus élevé.

Cette remarque soulève toutefois le problème de la détermination «exacte» de la signature spectrale (ou du «serpent de définition») d'un thème : un choix s'avère indispensable entre une définition stricte de cette signature, qui caractériserait le thème à l'état pur (correspondant à une concentration élevée de points sur un graphique du type de ceux des figures 21 et 22) et une définition plus large de cette signature, qui incluerait une partie des pixels de transition avec les thèmes voisins. Dans le premier cas, la cartographie du thème exclurait nécessairement une proportion plus ou moins élevée de pixels de

CADRE :
 L= 93 140
 C= 3210 3305

CODAGE DES LOTS *****

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9									
CANAL 4	0	235	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****									
CANAL 5	16	22	23	23	24	25	26	32	33	36	37	37	38	39	40	44	45	96	*****
CANAL 6	0	255	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
CANAL 7	7	27	28	46	47	47	48	51	52	61	62	62	63	74	75	122	*****	*****	

N	CL	NPIX	ZI1	ZI
1	307	608	0.109	0.109
2	804	452	0.081	0.190
3	207	418	0.075	0.265
4	803	406	0.073	0.338
5	701	399	0.072	0.410
6	4	380	0.068	0.478
7	304	318	0.057	0.535
8	704	281	0.050	0.586
9	801	225	0.040	0.626
10	703	222	0.040	0.666
11	306	210	0.038	0.704
12	406	158	0.028	0.732
13	6	150	0.027	0.759
14	404	131	0.024	0.783
15	107	125	0.022	0.805
16	401	96	0.017	0.822
17	3	80	0.014	0.837
18	301	77	0.014	0.851
19	1	68	0.012	0.863
20	606	68	0.012	0.875
21	601	63	0.011	0.886
22	606	53	0.010	0.896
23	204	45	0.008	0.904
24	407	44	0.008	0.912
25	104	39	0.007	0.919
26	403	39	0.007	0.926
27	706	37	0.007	0.932
28	303	32	0.006	0.938
29	206	31	0.006	0.944
30	603	31	0.006	0.949
31	305	29	0.005	0.955
32	5	23	0.004	0.959
33	106	23	0.004	0.963
34	506	23	0.004	0.967
35	501	21	0.004	0.971
36	503	16	0.003	0.974
37	806	16	0.003	0.976
38	7	15	0.003	0.979
39	504	14	0.003	0.982
40	705	14	0.003	0.984
41	201	12	0.002	0.986
42	0	10	0.002	0.988
43	101	8	0.001	0.990
44	203	8	0.001	0.991
45	405	8	0.001	0.992
46	807	8	0.001	0.994
47	103	6	0.001	0.995
48	205	6	0.001	0.996
49	707	6	0.001	0.997
50	105	4	0.000	0.998
51	505	4	0.000	0.999
52	300	3	0.000	0.999
53	607	3	0.000	1.000
54	400	2	0.000	1.000

REGROUPEMENT DES LOTS		
Thèmes	Lots	% Superficie
Betteraves + Prairies	307, 207, 306, 107, 407, 007, 607	21,7 %
Maïs	304, 404, 403, 603, 305, 503, 504, 405	10,7 %
Engrais vert	406, 606, 506	4,2 %
Sols nus clairs	804, 803, 704, 703, 604, 705	25,9 %
Sols nus foncés	701, 801, 401, 601, 501	16,4 %
Forêt	004, 006, 003, 104, 105, 106, 001	13,6 %
Arrachage Betteraves	706, 806, 807, 707	1,2 %

Laboratoire
 Analyse
 Numérique
 Image
 O.R.S.T.O.M

Figure 23 - Statistique des lots des sols cultivés - Landsat.

bordures, considérés alors comme pixels de transition. Dans le second cas, le choix de la limite «exacte» entre deux thèmes pourra poser des problèmes délicats si l'on ne dispose pas d'une vérité-terrain détaillée et précise. Toutefois, l'appréciation des surfaces sera plus proche de la réalité, grâce à une distribution aléatoire des pixels mixtes. Cette seconde solution s'impose de façon presque obligatoire dans le cas de Landsat, alors que la première paraît valable dans le cas de la Simulation Spot, tout au moins dans les conditions rencontrées sur le site d'Ermenonville.

b - Les résultats de la procédure Loterie

Ces résultats se présentent tout d'abord sous la forme de deux tableaux de statistique des lots : l'un de ces tableaux concerne Spot et il a déjà été étudié (Fig. 10), le second, relatif à Landsat, correspond à la figure 23.

Dans le cas de Spot (Fig. 10), la loterie a été établie à partir de huit échelons sur XS₂ et de sept sur XS₃, elle détermine par conséquent 56 lots dont l'ensemble représente 98,0% de la surface du cadre étudié. On observe toutefois qu'à partir du lot 17, le nombre des pixels de chacun des lots est inférieur à 1% de l'ensemble étudié, et qu'au delà du lot 40, ce pourcentage s'abaisse à 0,1%. Le regroupement de ces lots par thèmes, réalisé en visualisant la loterie sur écran, conduit aux résultats suivants :

Betteraves et Prairies	15 lots couvrant au total 23,8% du cadre étudié, le premier lot (codé 260) représentant à lui seul 18,9% (soit 79,4% du thème betteraves),
Maïs	6 lots couvrant 9,9% du cadre, les trois premiers représentant 8,7%,
Engrais verts	3 lots, soit 2,7% de la surface totale,
Sols nus	4 lots, soit 42,5% de la surface totale,
Forêt	12 lots, soit 11,3% de la surface totale,
Betteraves en cours d'arrachage	4 lots, soit 1,7% de la surface totale,
Divers (secteur bâti, eau, non identifiés)	17,1% de l'ensemble.

Si l'on exprime les résultats en fonction de la superficie cultivée, on peut observer que l'ensemble Betteraves, Prairies et Maïs représente 44,3% du cadre étudié, alors que les sols nus en occupent 52,7%. Ces pourcentages sont à rapprocher du fait que la rotation culturale est approximativement de caractère biennal.

Ces résultats se traduisent par la figure 11 commentée plus haut et complétée par un affinage ultérieur des résultats du secteur des sols nus.

Dans le cas de Landsat (Fig. 23), la loterie a été établie à partir de neuf échelons sur le canal 5, de huit échelons sur le canal 7, soit au total 72 lots mais on constate que les 23 derniers de ces lots sont vides ou ne comportent que moins de 0,1% de la surface totale :

Betteraves et Prairies	7 lots, soit 21,7% de la surface totale, le premier lot représentant 10,9%, soit 50,2% du thème,
Maïs	10 lots couvrant 10,7% de la surface totale,
Engrais verts	3 lots, soit 4,2% de la superficie,
Sols nus	16 lots, soit 42,3% de la surface totale (les cinq premiers lots intervenant pour 35,6%),
Forêt	7 lots, couvrant 13,6% de l'ensemble,
Betteraves en cours d'arrachage	4 lots, représentant 1,2%,
Divers (secteur bâti, eau, non identifiés)	5,9%.

Si l'on rapporte ces pourcentages à la surface cultivée, on constate que l'ensemble Betteraves, Prairies et Maïs représente 41,3% du cadre étudié alors que les sols nus en occupent 52,0%.

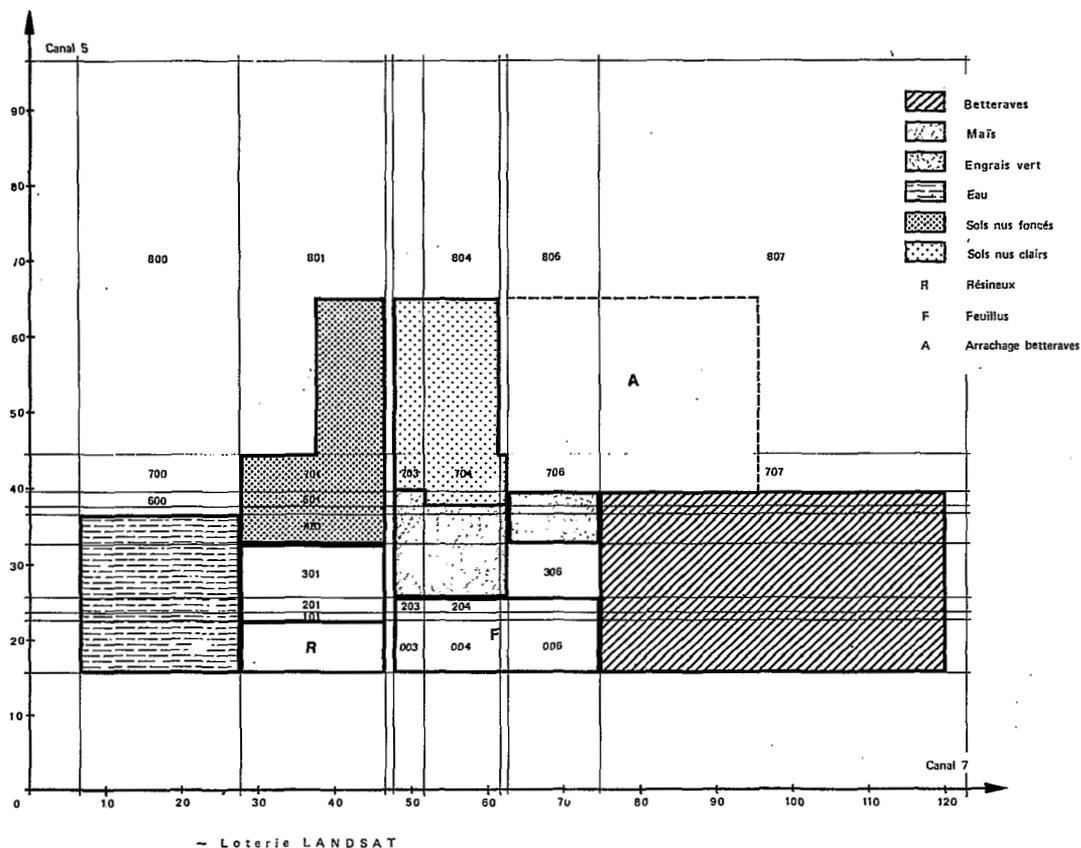


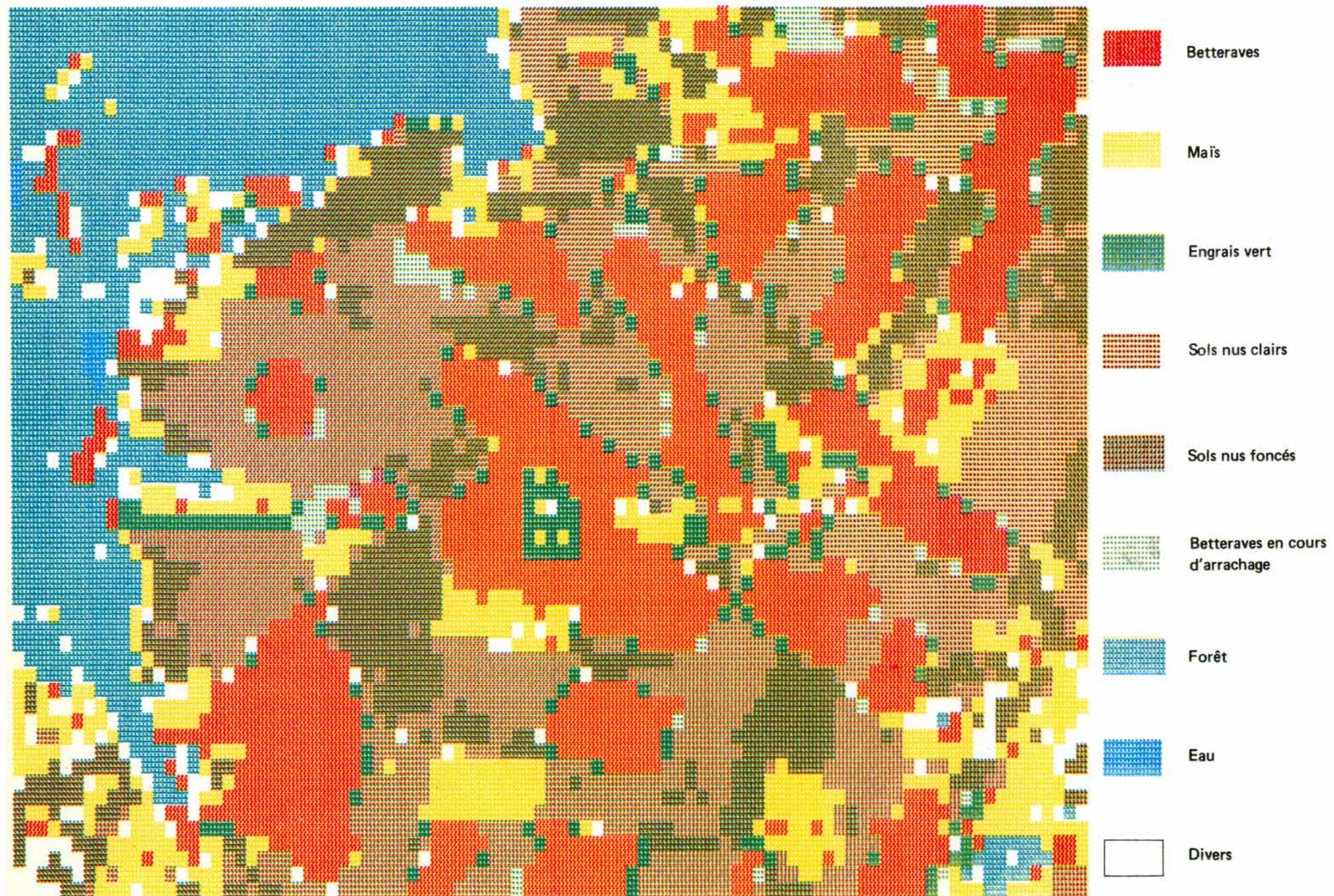
Figure 24 - Loterie Landsat

Ces résultats se traduisent par la figure 24, sur laquelle ont été portées quelques limites complémentaires après étude plus approfondie des zones de contact entre plusieurs thèmes.

La représentation graphique de l'extension des thèmes peut être effectuée sur table traçante ou sur imprimante rapide. Les documents qui en résultent correspondent aux figures 12 et 25, réalisées à des échelles voisines.

En résumé, le gain de précision de la simulation Spot se traduit par une discrimination plus facile des thèmes représentés, et par une représentation cartographique plus satisfaisante ; mais on observe cependant que la précision radiométrique de Landsat est excellente (voir en particulier les parcelles, 3, 3', 14-15, 37, 68, ...) et que, d'autre part, la statistique des superficies couvertes par un thème donné ne diffère pas très sensiblement de celle obtenue dans la simulation Spot. Il est vrai que la bonne connaissance de la vérité terrain dans le cas de cette expérience peut expliquer la relative précision de l'affectation des lots à un thème déterminé, précision qui ne serait pas atteinte dans une étude non supervisée.

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 dans le cas de la simulation Spot 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 m², 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 couleur.
- Les observations basées sur les corrélations entre les canaux XS_2 et XS_3 ont montré le mode d'évolution de la signature spectrale du thème sol nu 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 XS_2 et XS_3 conduisent à un classement assez cohérent de l'activité chlorophyllienne des divers végétaux présents.
- La comparaison Landsat-Simulation Spot établie à partir des images du 28.09.1980 conduit aux conclusions suivantes :
 - 1 - Dans les deux cas, la discrimination des thèmes d'occupation des sols s'est avérée bonne, qu'il s'agisse d'une analyse visuelle des images ou d'une analyse numérique.
 - 2 - Au sein de chacun des thèmes étudiés, il est possible de mettre en évidence des hétérogénéités liées, par exemple, à l'état de la surface des sols. Mais cette possibilité est beaucoup plus grande dans le cas de la Simulation Spot que dans le cas de Landsat, et elle peut même s'étendre alors à l'état de la végétation. Pour ce qui concerne plus spécialement l'analyse numérique des données, il s'est avéré possible de distinguer dans la Simulation Spot six classes d'état de la surface des sols nus et trois classes d'état végétatif du maïs.
 - 3 - Le gain de précision géométrique lié au pouvoir de résolution spatiale de la simulation Spot apparaît considérable. Il se traduit en premier lieu dans la qualité du tracé de la représentation cartographique des thèmes. Il entraîne par ailleurs un gain de précision radiométrique appréciable grâce à une individualisation plus précise de chaque thème, du fait de l'amélioration du rapport surface/périmètre de chacune des parcelles. Le gain de précision radiométrique est probablement dû pour une part à l'étroitesse des bandes spectrales retenues dans cet essai de simulation. Ce gain de précision apparaît clairement lors de la visualisation des corrélations inter-canaux, 5-7 pour Landsat, XS_2 - XS_3 pour Spot.

O.R.S.T.O.M.
Composition - Impression
S.S.C. BONDY

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Direction générale :

24, rue Bayard - 75008 PARIS

Service des Publications :

70-74, route d'Aulnay - 93140 BONDY

O.R.S.T.O.M. Éditeur
Dépôt légal : 1^e trim. 1982
I.S.B.N. : 2-7099-0639-2