

**ÉVOLUTIONS SAISONNIÈRES COMPARÉES DES
SIGNATURES SPECTRALES DE DIVERS MILIEUX PÉRENNES
(FORETS, PRAIRIE, SOLS NUS)
A PARTIR DE DOCUMENTS LANDSAT**

R. CHAUME – A. COMBEAU

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ET TECHNIQUE OUTRE-MER



INITIATION – DOCUMENTATIONS TECHNIQUES

N° 56

TÉLÉDÉTECTION 8

ORSTOM

PARIS

1983

.....

« 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).

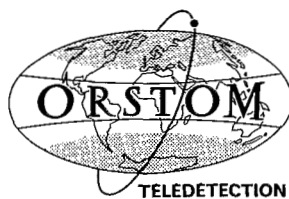
« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon « sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal. »

Remerciements —

Les auteurs remercient vivement les personnes qui ont participé à la réalisation et à la mise au point de ce texte et des illustrations qui l'accompagnent, et plus spécialement Mme A. Aing, du Bureau de Télédétection, Mme E. Driffort, des Laboratoires Communs, et Mme H. Vieillard, du Service des Editions de l'O.R.S.T.O.M.

**ÉVOLUTIONS SAISONNIÈRES COMPARÉES DES SIGNATURES SPECTRALES
DE DIVERS MILIEUX PÉRENNES (FORÊTS, PRAIRIE, SOLS NUS)
À PARTIR DE DOCUMENTS LANDSAT**

R. CHAUME – A. COMBEAU
O.R.S.T.O.M. Bondy



PLAN

Introduction

I – Les milieux étudiés

II – Les méthodes utilisées

III – Résultats

A - Les variations saisonnières de la luminance

B - La variabilité inter-annuelle des luminances

1 - Observations de juin

2 - Observations de septembre

C - L'évolution des signatures spectrales à partir des corrélations et des rapports inter-canaux

1 - Corrélations 5/7

2 - Autres corrélations

D - Les rapports de luminances entre thèmes

1 - Comparaison Feuillus-Résineux

2 - Comparaison Feuillus-Prairie

E - Observations sur la variabilité des données d'origines diverses

F - Observations sur la représentativité des résultats de l'étude

Conclusion

Bibliographie

Annexes

1 - Distributions des luminances

2 - Les rapports inter-canaux

3 - Les rapports de canaux entre thèmes

4 - Aperçu des conditions climatiques de 1975 à 1981

5 - Évolution saisonnière de la luminance par canal

6 - Évolution saisonnière de la luminance par thème

RÉSUMÉ

Sur plusieurs sites de référence représentatifs de cinq milieux différents, les auteurs ont recueilli les données numériques fournies par les satellites Landsat à quinze dates échelonnées sur plusieurs années, mais selon une répartition saisonnière. Les cultures annuelles n'entrent pas dans cette comparaison. L'amplitude et les modalités des variations saisonnières de la luminance sur chacun des quatre canaux sont précisées, et on donne un aperçu de la variabilité des mesures d'une année sur l'autre pour une même saison. La combinaison des résultats obtenus sur les canaux 5 et 7 met en évidence les analogies et les différences de réaction des divers milieux, en fonction de la présence ou de l'absence d'un couvert végétal, et selon la nature de la végétation (forêt feuillue, forêt résineuse, prairie). D'autres associations de canaux deux à deux sont également étudiées, et révèlent des comportements spécifiques se traduisant par des évolutions saisonnières particulières. Les périodes les plus aptes à une discrimination des thèmes sont précisées, ainsi que le choix des canaux les plus efficaces pour opérer cette discrimination dans le cas des milieux étudiés ici.

SUMMARY

Landsat satellites provided the authors with digital data about several reference sites representative of five different environments. Fifteen data gathering operations were conducted over several years on a seasonal basis. Data about annual crops are not given here. Seasonal variations in luminance are specified in each of the four bands and the seasonal variability of measurements is outlined from one year to the other. The results obtained in bands 5 and 7 emphasize the similar and different reactions of the various environments as related to the presence or absence of a vegetation cover and the type of vegetation (hardwood forest, coniferous forest, meadow). Bands are also studied in pairs and show specific behaviours resulting in particular seasonal evolutions. The periods which are best suited for the discrimination of themes are specified and the most efficient bands are selected in order to achieve this discrimination in the environments under consideration.

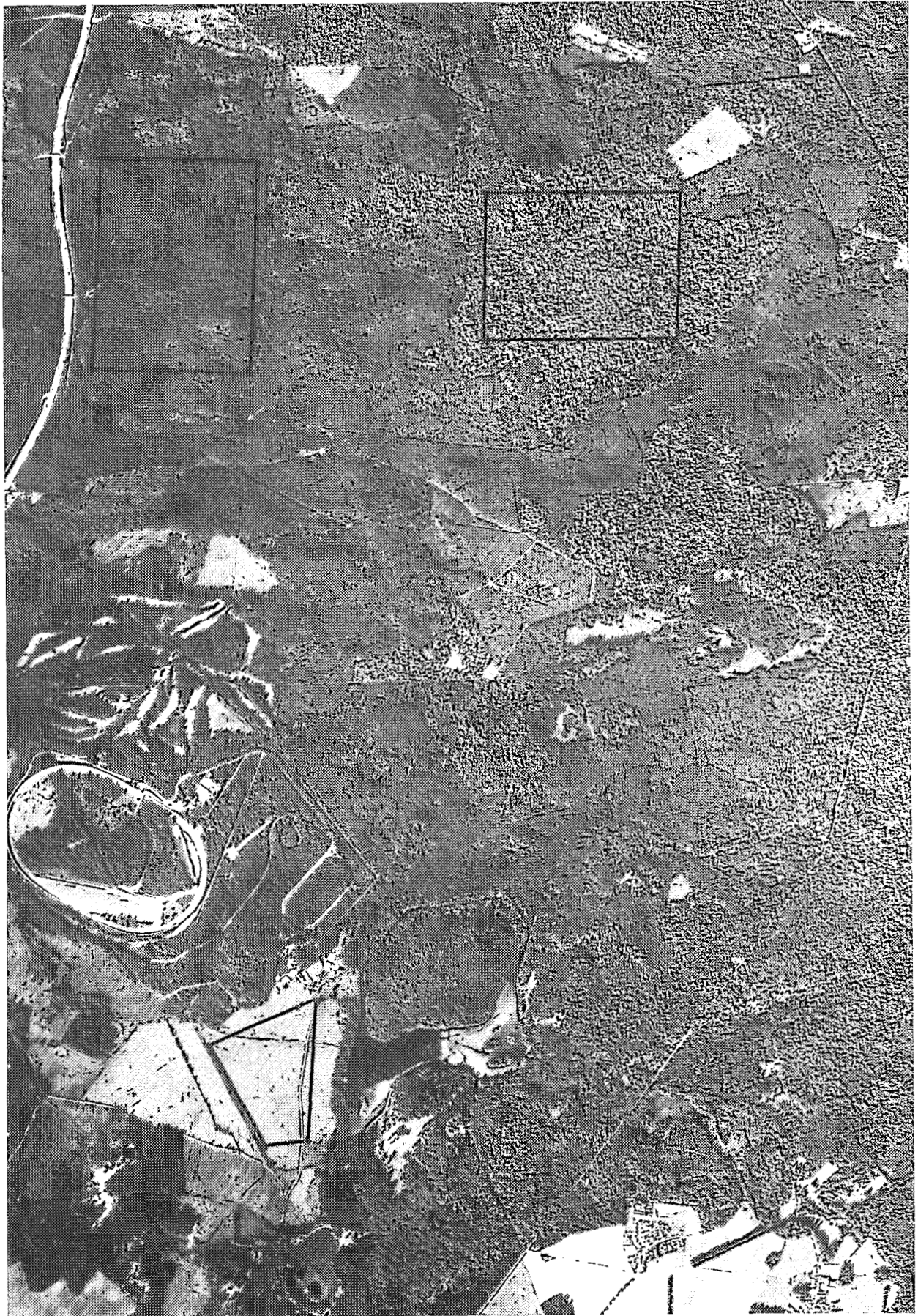


Figure 1 - LE SITE EXPÉRIMENTAL
Photo infrarouge IGN - Mission simulation spot - Ermenonville 80

INTRODUCTION

L'interprétation des résultats fournis par la télédétection soulève, entre autres difficultés, celles imputables à la variation des valeurs de la luminance selon la date de saisie des données. La hauteur du soleil à l'instant précis de cette saisie varie tout au long de l'année, et un milieu déterminé, dont les caractéristiques seraient parfaitement constantes dans le temps, fournirait une signature spectrale variable selon la date de l'enregistrement. Cette cause de variabilité se superpose naturellement aux autres, au premier rang desquelles figurent les variations de la nature et de la densité du couvert végétal, naturel ou non, et les perturbations subies par la surface du sol.

On se propose de caractériser les modalités de l'évolution saisonnière de la signature spectrale de quelques milieux végétaux pérennes, en comparant les données recueillies par le satellite Landsat à des dates différentes. Dans ce but, deux secteurs forestiers différents de la région parisienne, une forêt feuillue à chênes et hêtres, et une forêt résineuse à pins sylvestres, ont été sélectionnés pour servir de point d'appui à ces mesures. Par la suite, il a semblé utile d'adjoindre à ces deux milieux typiques, à titre de comparaison, un autre milieu végétal pérenne, en l'occurrence une prairie de bas-fond, et deux milieux sans végétation : des sols nus au sein d'une sole cultivée, et une dune sableuse.

Cette publication présente les résultats de la comparaison et tente d'interpréter les facteurs des variations enregistrées.

I – LES MILIEUX ÉTUDIÉS.

Les secteurs retenus pour cette étude sont localisés en forêt d'Ermenonville et aux abords immédiats de cette forêt, qui est située à une trentaine de kilomètres au NNE de Paris. Ce secteur a déjà fait l'objet de plusieurs études sous l'angle de la télédétection, plus particulièrement dans le cadre d'une opération de simulation des données du futur satellite Spot, réalisée en 1980 et 1981, et qui comportait une comparaison entre les données Landsat et les données de la simulation Spot (R. Chaume, 1982 ; A. Combeau, 1982 a, b).

Pour ce qui concerne les milieux forestiers, l'objectif était de définir dans chaque cas un périmètre de référence caractéristique, parfaitement repérable sur les images Landsat, aussi homogène que possible, et de superficie constante, afin que les résultats obtenus à des dates différentes soient effectivement comparables. On peut considérer schématiquement que la forêt d'Ermenonville repose sur deux formations géologiques et pédologiques différentes. L'une de ces formations, qui correspond aux points hauts de la forêt, en position de plateau, est le calcaire de Saint-Ouen, d'âge fin tertiaire, sur lequel reposent des sols bruns calcimorphes supportant un taillis sous futaie feuillue en voie de transformation en futaie pure. Chêne et hêtre sont les essences dominantes, le taillis étant constitué essentiellement de charme, de châtaignier, parfois de tilleul et d'orme. La seconde formation géologique, sous-jacente à la précédente, apparaît dans les entailles du plateau ; elle est constituée par les sables de Beauchamp, d'âge également fin tertiaire, formation sur laquelle se sont formés des sols podzoliques chimiquement très pauvres, occupés par les essences caractéristiques de tels milieux : résineux (en l'occurrence pin sylvestre) et bouleau, avec strate basse à base de fougère et bruyère.

Le choix des périmètres d'observation a été guidé par deux critères :

- a - localisation de parcelles aussi homogènes que possible dans leur constitution, et d'une superficie suffisante pour permettre des observations valables (initialement une superficie minimum d'une cinquantaine d'hectares avait été fixée).
- b - choix de parcelles pouvant être localisées grâce à des repères de forme géométrique visibles sans ambiguïté, pour que la superficie étudiée soit pratiquement la même pour toutes les dates d'observation.

Il a été relativement délicat de trouver des périmètres répondant à ces deux exigences : même à l'échelle de la cinquantaine d'hectares, l'homogénéité du couvert végétal des milieux forestiers est aléatoire, et de plus perturbée par la présence de chemins nombreux. Il fallait en outre éliminer les secteurs comportant des clairières.

Deux périmètres ont en définitive été retenus (Fig. 1) : un périmètre rectangulaire de 1000 x 700 mètres environ dans le bois de Borest, l'une des futaies feuillues les plus caractéristiques de la forêt d'Ermenonville et dont la forme permettait d'y inscrire ce rectangle de 70 hectares correspondant à 153 pixels (17 colonnes x 9 lignes) ; et un périmètre rectangulaire de 750 x 1000 mètres environ (12 colonnes x 13 lignes), donc de superficie pratiquement identique (156 pixels), dans le bois de la Butte des Gens d'Armes, perchis résineux assez caractéristique des formations résineuses d'Ermenonville, jouxtant l'autoroute A1. Ce périmètre peut être repéré sans difficulté par rapport au précédent et par rapport à un terre-plein de l'autoroute.

Il a été plus difficile de sélectionner les autres milieux non forestiers ; les prairies permanentes sont rares dans le Bassin parisien, et le plus souvent localisées dans des fonds de vallée étroits où se développent aussi des boqueteaux ou des haies. Une prairie a finalement été retenue, malgré divers inconvénients : elle occupe un bas-fond assez étendu, mais sa forme ne permet pas d'y inscrire un quadrilatère régulier bien défini en lignes et colonnes, et son repérage basé sur la proximité d'un étang et d'une piste d'essais automobiles, n'est pas aussi rigoureux que celui des parcelles forestières. Le nombre de pixels de ce périmètre pourra donc varier quelque peu. Il oscille entre 50 et 60, soit une surface de 22 hectares environ.

En ce qui concerne les milieux sans végétation, il était tentant de choisir la Mer de Sable, dune sableuse parfaitement repérable en forêt d'Ermenonville, sans végétation, dont l'origine est liée à un incendie violent qui a détruit autrefois cette partie de la forêt sans recolonisation ultérieure. Ce milieu, qui constitue actuellement un des éléments d'un parc d'attractions, est identifiable sans problème du fait de sa luminance élevée sur tous les canaux, mais il a pour inconvénients d'avoir une forme irrégulière (quoique grossièrement triangulaire), une superficie un peu restreinte (12 hectares utiles, 30 pixels) et des contours flous (interface plus ou moins progressif avec la grande futaie résineuse proche). Ce milieu « dune sableuse » a toutefois été conservé, bien qu'il présente l'inconvénient d'avoir une superficie quelque peu variable. En ce qui concerne les « sols nus », l'objectif était de sélectionner, dans le secteur agricole, des parcelles cultivées, pendant les périodes où elles ne sont pas encore, ou plus, occupées par la végétation. La difficulté réside alors dans la nécessité de pratiquer les mesures sur des parcelles différentes d'une année à l'autre (la rotation culturale est grossièrement bisannuelle). Les sols nus seront faciles à trouver entre novembre et mai-juin (après la récolte des betteraves et du maïs, et surtout après les labours d'hiver, et jusqu'à la mise en place du couvert des cultures de betteraves et de maïs). Il est plus difficile de les observer de fin juillet à novembre, sur les parcelles moissonnées et déchaumées, car leur surface comporte alors une proportion variable, mais non négligeable, de paille ; il est pratiquement impossible d'observer des parcelles sans végétation en juin et juillet, période capitale pour l'étude de la variation saisonnière de la luminance. En dépit de ces inconvénients, des mesures ont été effectuées sur deux groupes de parcelles cultivées ayant été autrefois l'objet d'études détaillées, au voisinage du terrain d'aviation du Plessis-Belleville. Il s'agit cette fois de sols cultivés, sur limon de plateau, du type sol brun lessivé, typiques du Soissonnais. Un inconvénient majeur réside dans l'ignorance des techniques culturales précisément appliquées à ces sols dans les journées ayant précédé la saisie des données.

C'est donc, en définitive, sur cinq milieux différents que porteront nos observations : trois milieux sous végétation pérenne (forêt feuillue, forêt résineuse, prairie) et deux milieux sans végétation (dune sableuse et sols nus). Seuls les deux périmètres forestiers ont été suffisamment bien caractérisés géographiquement pour donner lieu à des mesures totalement fiables, les trois autres milieux n'étant étudiés qu'à titre de comparaison avec les précédents pour en faciliter l'interprétation.

II – LES MÉTHODES UTILISÉES.

Pour exécuter ce travail, il fallait tout d'abord disposer d'un maximum de données recueillies aux diverses saisons. Le secteur expérimental présente l'avantage d'être situé dans le champ d'observation de deux trajectoires adjacentes du satellite Landsat (214-26 et 215-26) ce qui accroît les chances de collecte des données. Malgré cet avantage, compte-tenu des conditions climatiques de la région parisienne, le nombre des observations de bonne qualité pour la période 1975-1981 est relativement restreint : nous avons pu sélectionner 15 dates d'observations convenablement exploitables (Tableau 1) réparties sur l'ensemble de l'année à l'exception des mois d'octobre, décembre et février.

Tableau 1 - Dates d'acquisition des données.

Date	Scène	Landsat	Date	Scène	Landsat
16-1-79	215-26	3	28-7-78	214-26	2
7-3-76	214-26	1	18-8-78	215-26	2
12-4-76	214-26	1	4-9-81	215-26	2
13-5-79	215-26	2	16-9-79	215-26	2
4-6-78	214-26	2	28-9-80	215-26	2
6-6-76	215-26	1	14-11-78	215-26	2
12-6-75	215-26	1	21-11-75	215-26	1
11-7-76	214-26	1			

La figure 2 permet de localiser les dates d'acquisition des données et de les situer par rapport à la hauteur du soleil au moment de l'observation. Il convient cependant de remarquer que certaines dates comportaient des imperfections : image tronquée en juin 1976, présence de quelques nuages en juillet 1976, traces de gelée blanche au sol en janvier 1979... Mais ces données ont été jugées suffisantes pour permettre une exploitation.

Le fait de faire appel à des données étalées sur plusieurs années d'observation présente à la fois des inconvénients et des avantages : il importe en premier lieu de remarquer que les données ont été recueillies par 3 satellites différents, Landsat 1, 2 et 3 (voir tableau 1), dont les capteurs sont en principe du même type, mais dont les étalonnages ne sont pas nécessairement identiques. Les données de la littérature permettent de corriger les valeurs brutes, telles qu'elles sont restituées par la bande magnétique, pour tenir compte des variations d'étalonnage entre satellites, voire même à des époques différentes pour un même satellite. On peut alors calculer les valeurs physiques correspondant à la luminance énergétique et à la réflectance (Robinove, 1982) et comparer ainsi directement les données de dates différentes et de satellites différents. Cette correction est possible pour les données USGS, mais les paramètres correspondants des données Télésazio n'ont pas été obtenus. En supposant que cette cause de variation ne joue pas un rôle important, les données acquises à des dates voisines, mais au cours d'années différentes, seront fonction non seulement des conditions météorologiques du moment, mais aussi, dans une certaine mesure, des caractères du climat de la période ayant précédé l'acquisition des données.

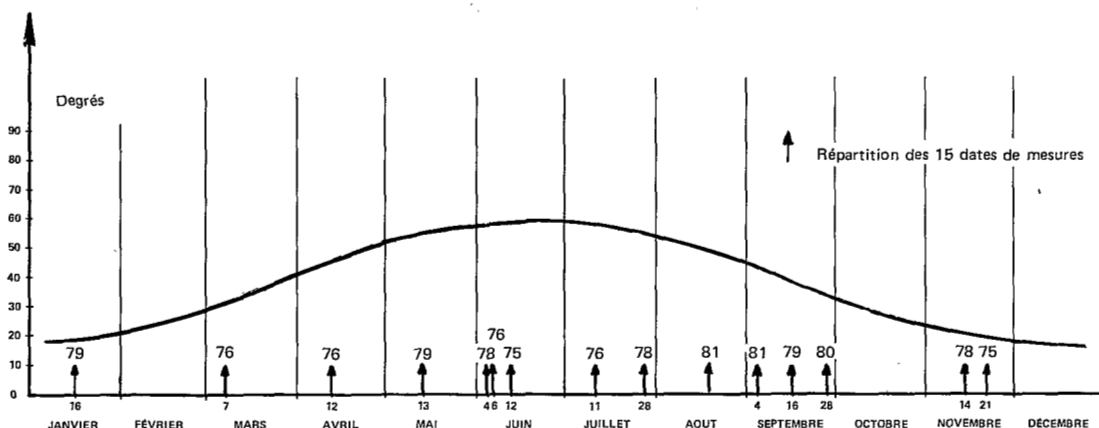


Figure 2 - Hauteur du soleil à 11,15 h locale (10 15 TU) à Paris.

Pour donner au moins un aperçu sommaire de la variabilité des conditions climatiques au cours de la période sur laquelle s'étalent les données recueillies, on peut faire appel à deux critères simples : pluviométrie cumulée et températures journalières cumulées (Annexe 4 - Fig. 18 et 19), par exemple à partir du 1er mars, pour disposer de chiffres susceptibles de s'appliquer pendant la période de développement de la végétation. Les chiffres utilisés sont ceux du poste météorologique de l'ORSTOM à Bondy. Le graphique des pluies cumulées fait clairement ressortir le caractère exceptionnel de la sécheresse de 1976, mais aussi la relative sécheresse de l'été 1979, après un printemps fortement arrosé. Le graphique des températures cumulées montre bien l'existence d'une évolution régulière des températures dans le sens d'une diminution de 1975 à 1979, suivie d'une remontée en 1980 et 1981. L'interprétation de la variabilité inter-annuelle devra donc être prudente.

Ceci étant, et malgré ces sources de difficultés, il a été décidé de traiter les données brutes telles qu'elles sont fournies par le Centre de réception des images de Télésazio, afin de se placer dans les conditions qui sont celles de tout utilisateur.

Les données obtenues sous forme de bandes magnétiques ont été visualisées sur un écran cathodique (Péricolor 1000 de Numelec) et les périmètres de mesure ont été repérés, le plus souvent à partir du canal 5 ou du canal 7. Chaque périmètre était alors cerné au moyen d'un marqueur mobile, de sorte qu'il était possible d'obtenir très facilement l'histogramme de la zone cernée sur chacun des 4 canaux Landsat. C'est à partir de cet histogramme qu'ont été définis les paramètres de la distribution des valeurs de luminance : moyenne, médiane, déciles...

Outre les 15 bandes magnétiques ainsi traitées, nous avons pu disposer d'une bande USGS et de l'image correspondante du secteur étudié, à la date du 23-3-1973. A titre de curiosité, les résultats ont été comparés à ceux obtenus à partir des documents communiqués par Télésazio.

III – RÉSULTATS.

Les résultats obtenus au cours de cette étude peuvent être exprimés sous la forme de la valeur médiane des luminances enregistrées à une date et sur une parcelle déterminées, mesure simple définissant valablement l'évolution dans le temps des grandeurs mesurées. Pour le milieu forestier, chaque médiane

est obtenue à partir de plus de 150 valeurs élémentaires. Elle peut être assortie d'un paramètre simple de distribution, tel que l'écart inter-déciles, obtenu par élimination de 10%, au maximum, des mesures à chaque extrémité de l'histogramme. L'écart inter-déciles regroupe par conséquent 80% des valeurs au minimum (Annexe 1).

Ces résultats peuvent être présentés sous des angles différents :

- a - variations comparées, sur un même canal, de la luminance des différents thèmes au cours de l'année.
- b - variations comparées, pour un même thème, de la luminance des quatre canaux au cours de l'année.
- c - évolution des polynombres médians* de chaque thème au cours de l'année.

C'est cette troisième solution qui est retenue ici, comme synthétisant au mieux l'ensemble des résultats en une seule représentation composite.

Après avoir exposé les variations observées de la luminance, on appréciera la variabilité inter-annuelle de la signature spectrale en comparant les résultats acquis à des dates voisines, mais au cours d'années différentes, ceci canal par canal et thème par thème.

Ces précisions apportées, on envisagera les manifestations d'évolution par le biais des corrélations de canaux, puis en faisant appel aux rapports inter-canaux, 5 et 7 en premier lieu mais aussi par d'autres combinaisons deux à deux.

Les résultats bruts sont présentés en annexe sous forme de tableaux à partir desquels ont été établis les graphiques auxquels le texte fait référence.

A – LES VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA LUMINANCE.

La figure 3 regroupe la totalité des résultats obtenus sous la forme des polynombres médians par thème et par date de mesure. Ces mêmes résultats sont également exprimés par les courbes d'évolution de la luminance par canal (Fig. 20 à 23, en annexe 5), puis par thème (Fig. 24 à 28, en annexe 6).

Ces diverses représentations suscitent les commentaires suivants :

- a - Pour les divers thèmes étudiés, et, dans chacun de ces thèmes, pour chacun des 4 canaux Landsat, on observe une variation saisonnière des valeurs de la luminance, caractérisée par un minimum d'hiver et un maximum d'été. Cette évolution est donc comparable à celle de la hauteur du soleil lors de la collecte des données.
- b - L'amplitude de la variation saisonnière des luminances diffère considérablement selon les thèmes et selon les canaux. Elle dépend en premier lieu de la présence ou de l'absence de végétation au sol. *En présence de végétation*, l'amplitude de variation est minimum sur le canal 5, faible sur le canal 4, plus élevée sur les canaux 6 et 7, mais, dans ce dernier cas, elle est liée à la nature du couvert végétal et croît de façon très sensible lorsque l'on passe des résineux aux feuillus, puis à la prairie. *En l'absence de végétation*, l'amplitude de la variation saisonnière sur les canaux 4 et surtout 5 est plus importante qu'en présence d'un couvert, alors que, sur les canaux 6 et 7, l'amplitude de la variation saisonnière est la même avec ou sans couvert végétal.
- c - La fourchette des valeurs de luminance au minimum d'hiver est toujours relativement étroite de sorte que, a priori, les discriminations entre thèmes devraient être plus aisées au voisinage du maximum d'été.

(*) Les 4 valeurs numériques de la luminance d'un point donné sur les canaux 4, 5, 6 et 7 de Landsat constituent un polynombre. Le polynombre médian d'un thème à une date donnée est défini par les 4 médianes des valeurs de luminance de l'ensemble du périmètre d'observation de ce thème sur les 4 canaux.

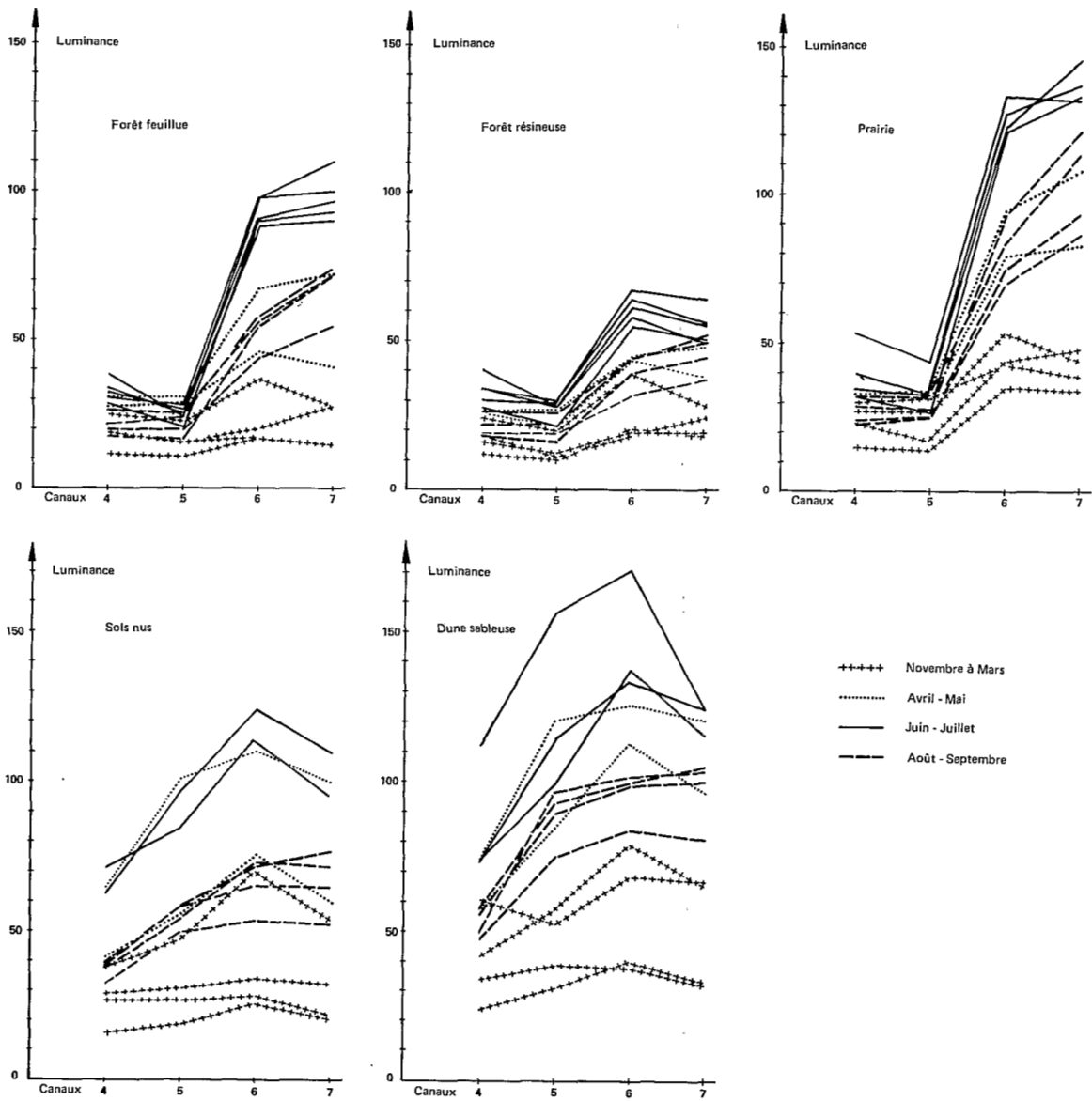


Figure 3 - Évolution comparée des signatures spectrales des différents thèmes.

- d - Il existe naturellement des différences entre les résultats acquis à la même saison au cours d'années différentes. Les données recueillies en juin et en septembre permettront d'avoir un aperçu de la variabilité inter-annuelle. Ce point particulier sera envisagé par la suite.
- e - Plusieurs comportements spécifiques d'un thème ou d'un canal sont perceptibles, non seulement en ce qui concerne l'amplitude de la variation saisonnière, mais aussi quant aux modalités de cette variation, ce qui signifie que la relation entre luminance et hauteur du soleil est elle-même modifiée par certains paramètres. Citons par exemple : le regroupement des polynombres médians en deux familles, avec végétation et sans végétation (la différence entre ces deux familles se situant essentiellement au niveau du canal 5); les analogies feuillus-prairie; les différences entre feuillus et résineux en période estivale, au niveau du canal 5 d'une part, des canaux 6 et 7 d'autre part; le fait que le maximum saisonnier du canal 5 est atteint plus tôt, en règle générale, que celui du canal 4, ou que les maxima d'été des canaux 6 et 7 semblent atteints plus tard pour les résineux que pour les feuillus. Ces différentes remarques doivent être interprétées en fonction de l'état de développement du couvert végétal, de l'absorption du rayonnement par la végétation sur le canal 5, et de sa réflexion sur les canaux 6 et 7.

D'où la nécessité de se pencher sur la non-simultanéité des variations de luminance sur plusieurs canaux et, corrélativement, sur les rapports entre les luminances mesurées sur les diverses longueurs d'onde.

B – LA VARIABILITÉ INTER-ANNUELLE DES LUMINANCES.

Pour les mois de juin et de septembre, on dispose d'ensembles de données recueillies au cours de trois années différentes. Il pouvait être intéressant de comparer ces résultats entre eux pour pallier les inconvénients du recours aux seules valeurs des médianes et évaluer l'ampleur de la variabilité inter-annuelle. Dans un premier temps, cette comparaison a été tentée à partir des écarts inter-déciles, technique simple et rapide. Dans un second temps, une étude statistique plus approfondie est envisagée.

1 - Les données de juin.

Les dates de collecte des données Landsat sont : le 4-06-1978, le 6-06-1976, le 12-06-1975. Il s'agit donc de trois dates peu différentes dans le cycle saisonnier.

Les résultats obtenus sont représentés graphiquement sur la figure 4 qui traduit la dispersion des valeurs de luminance, exprimée par l'écart inter-déciles. On peut formuler plusieurs remarques :

- a - La gamme des valeurs de luminance caractérisant un thème est toujours très étroite sur les canaux 4 et 5, toujours plus étalée sur les canaux 6 et 7, et ce d'autant plus que la valeur moyenne de luminance augmente. Le thème dune sableuse révèle une dispersion des valeurs plus grande que les autres thèmes.
- b - Les différences entre les trois dates étudiées sont faibles et les gammes de valeurs de la luminance sur un canal donné et pour un thème donné se chevauchent le plus souvent. On observe cependant que les valeurs numériques de juin 1975 sur le canal 5 semblent significativement plus faibles pour tous les thèmes. On remarque également que, sur le canal 7, les luminances semblent plus élevées en 1978 qu'en 1976 et 1975. Cette différence pourrait être imputable au type de satellite ou à la transparence de l'atmosphère lors de l'observation, mais il se peut aussi que ces variations soient liées aux variations climatiques : l'année 1976 a laissé le souvenir d'une sécheresse exceptionnelle, mais l'année 1975 n'avait reçu à cette date, elle aussi, que des précipitations anormalement faibles. A titre indicatif, les hauteurs de pluie enregistrées entre le 1er mars et les dates respectives de collecte des données, donc sur une période de 96 à 104 jours, ont été les suivantes : 1975 : 160 mm – 1976 : 65 mm – 1978 : 250 mm. Ces différences sont importantes et les années 1975 et surtout 1976 peuvent être considérées comme déficitaires par rapport à 1978, elle-même un peu supérieure à la moyenne; de telles différences devraient normalement avoir joué un rôle appréciable sur le développement de la végétation (Annexe 4).

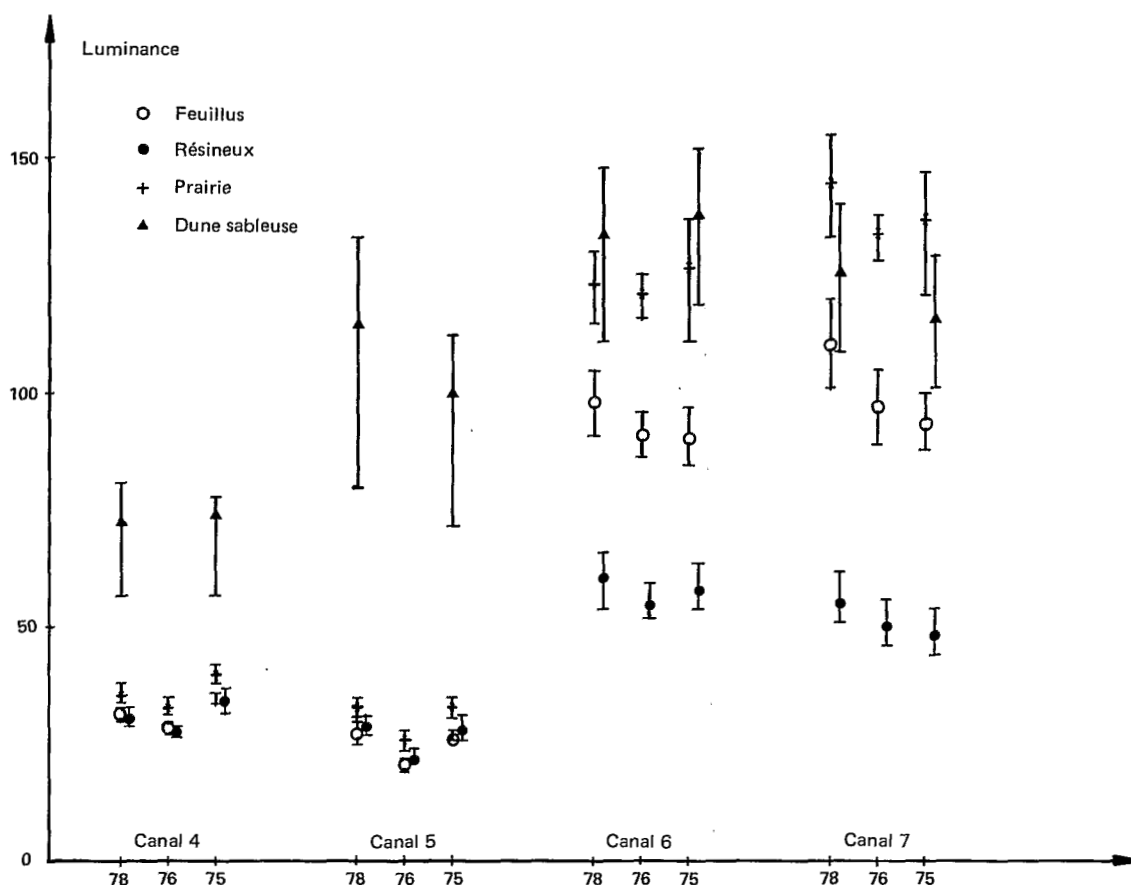


Figure 4 - Variabilité inter-annuelle des luminances - Médianes et écarts inter-déciles.
Juin (4-6-78, 6-6-76, 12-6-75).

2 - Les données de septembre.

Les dates de collecte des données Landsat ont été les suivantes : 4-09-1981, 16-09-1979, 28-09-1980. A la différence de ce qui vient d'être signalé pour les mesures de juin, on observe un étalement de ces trois dates : début, milieu, et fin de mois.

Les résultats correspondent à la figure 5. Ils appellent les commentaires suivants :

- La dispersion des valeurs de luminance en septembre est très comparable à celle obtenue en juin sur les différents canaux et pour les divers thèmes étudiés.
- A la différence de ce qui a été observé en juin, on remarque une variation appréciable entre début et fin de mois. En particulier, les valeurs enregistrées en 1980 sont systématiquement inférieures à celles de 1981. Lorsqu'on replace les données de septembre dans le cadre du cycle annuel, on constate que les variations significatives observées entre début et fin de mois de septembre ne font que traduire la rapidité de l'évolution des luminances dans un sens décroissant (au voisinage de l'équinoxe d'automne).
- On constate l'existence d'une anomalie apparente pour les canaux 4 et 5 en septembre 1979 (luminances apparemment trop faibles). La cause de cette anomalie n'a pas été élucidée, mais on notera que l'été 1979 avait été peu pluvieux, et que les températures moyennes étaient demeurées faibles.

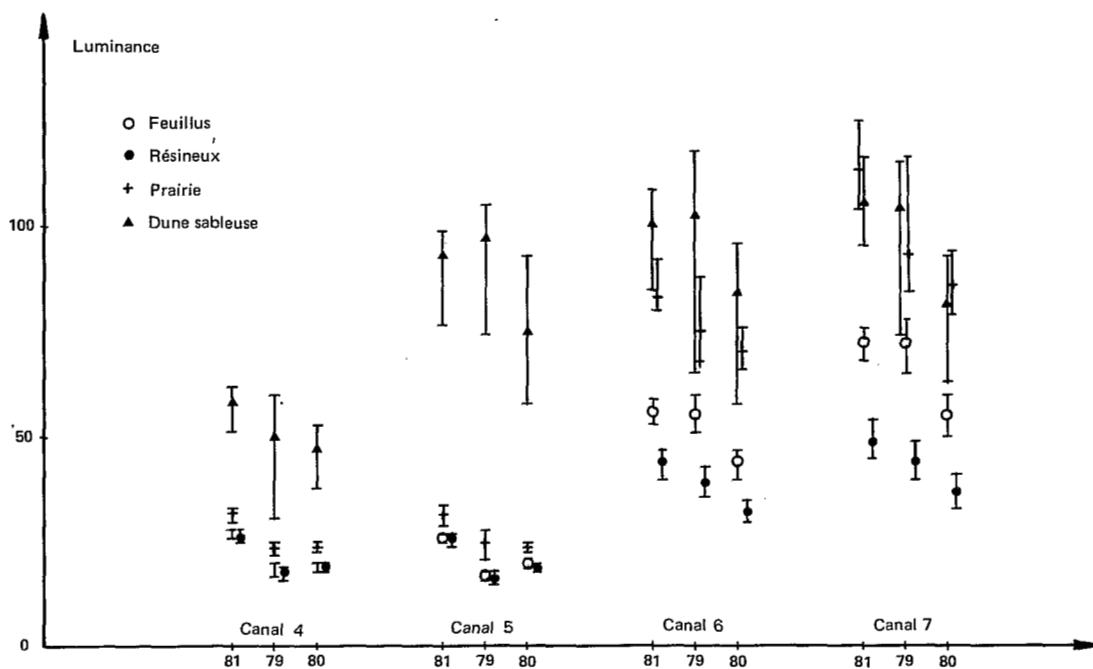


Figure 5 - Variabilité inter-annuelle des luminances - Médianes et écarts inter-déciles.
Septembre (4-9-81, 16-9-79, 28-9-80).

En conclusion, il apparaît que la reproductibilité des mesures d'une année sur l'autre est satisfaisante, bien que ces mesures aient été fournies en partie par Landsat 1, en partie par Landsat 2; l'une des sources de distorsion est probablement constituée par les fluctuations climatologiques des années considérées. Certaines évolutions significatives observées à l'échelle du mois semblent bien traduire l'évolution progressive de la hauteur du soleil, en particulier lors des périodes où cette modification est la plus rapide (équinoxe de septembre, par exemple).

C - L'ÉVOLUTION DES SIGNATURES SPECTRALES À PARTIR DES CORRÉLATIONS ET DES RAPPORTS INTER-CANAU.

L'étude de l'évolution de la luminance par canal a fait apparaître certains comportements spécifiques par thème et par gamme de longueur d'onde. Il était donc intéressant de définir les diverses évolutions observées en combinant les canaux deux à deux, selon le système de représentation utilisé le plus souvent sous l'appellation d'histogramme bi-dimensionnel. Il a semblé logique d'étudier en premier lieu la corrélation des canaux 5 et 7, à laquelle se réfèrent de nombreux auteurs (Andrieu, 1981; Bardin, Monget, 1980; Chaume, 1982; Combeau, 1982), mais on envisagera également d'autres associations de canaux. Les graphiques ont été construits à partir des valeurs médianes utilisées précédemment.

1 - La corrélation canal 5 - canal 7.

Pour définir l'évolution saisonnière de la signature spectrale, on peut représenter les médianes des luminances du canal 5 en fonction de celles du canal 7. L'effectif des couples de valeurs sur les cinq thèmes étudiés étant de l'ordre de 70, il était nécessaire de procéder à un classement pour obtenir une

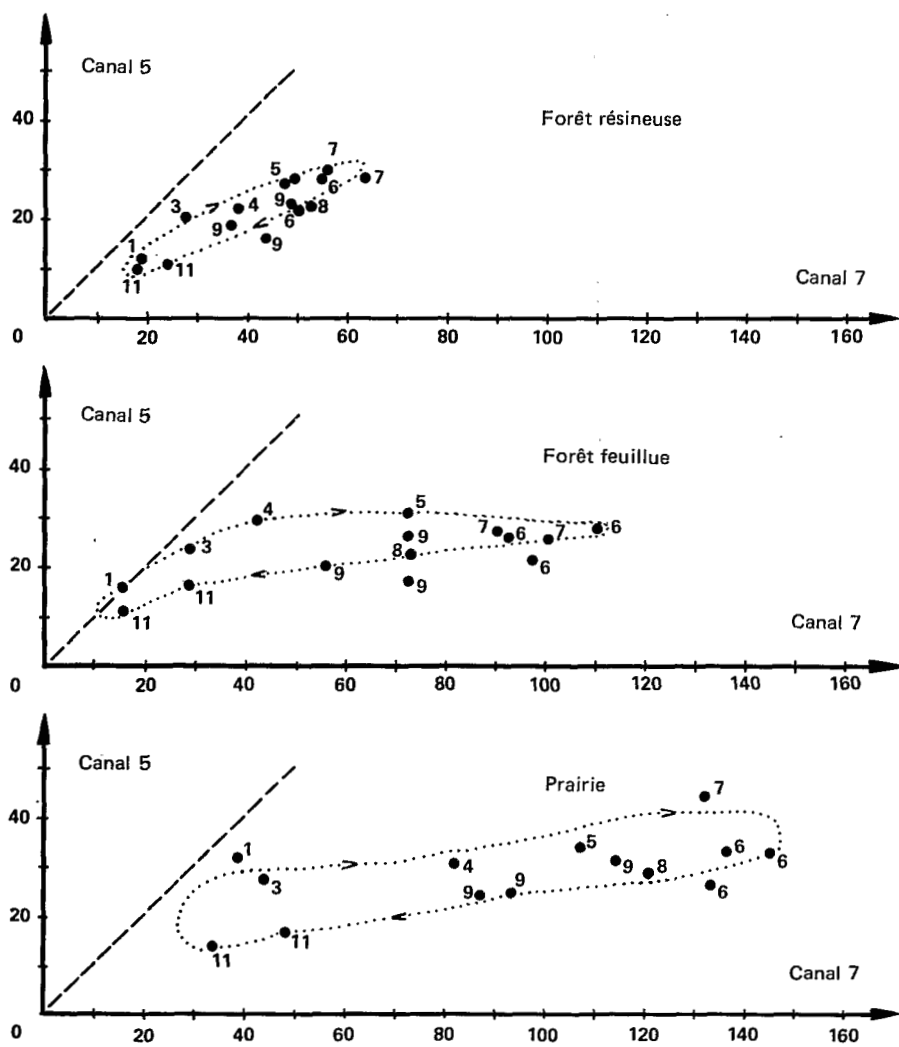


Figure 6 - Récapitulation des évolutions saisonnières par thème – Corrélation inter-canaux (canaux 5 et 7).
 (Les chiffres situés près des points correspondent au numéro d'ordre du mois)

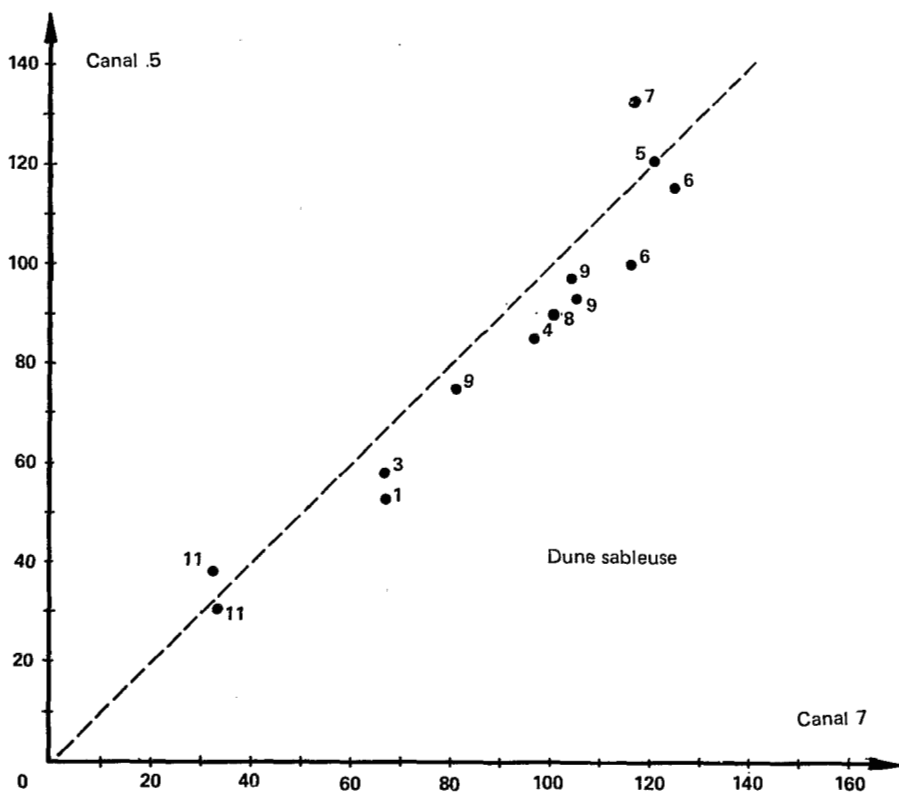
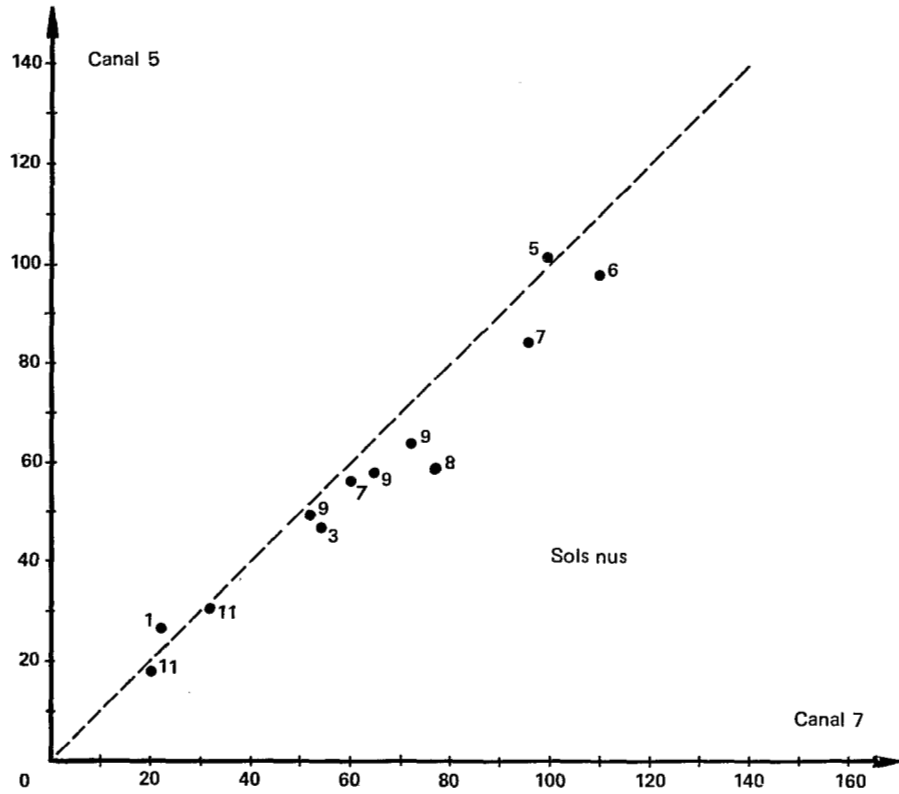


Figure 6 - (suite).

représentation graphique lisible. Deux solutions sont possibles, et complémentaires : la première consiste en une représentation graphique des valeurs obtenues sur un thème donné tout au long de l'année (Fig. 6). Elle exprime l'évolution de la signature de ce thème au cours de l'année. La seconde solution consiste à regrouper les divers thèmes à des dates (en fait des saisons) bien déterminées (Fig. 7). Cette solution traduit graphiquement les possibilités de discrimination des thèmes aux époques considérées. Ces deux types de représentation seront envisagés successivement.

a) *Évolution annuelle de la signature des thèmes étudiés.*

Les résultats de cette étude sont exprimés sous forme de 5 graphiques comparatifs (Fig. 6 a, b, c, d, e). Ces graphiques sont tous à la même échelle et, pour faciliter les comparaisons, la première bissectrice y figure systématiquement. À côté de chacun des points figure le numéro d'ordre du mois correspondant. La ligne fermée figurant sur les graphiques traduit le sens général de l'évolution.

– Les cinq nuages de points sont, en règle générale, disposés à droite de la première bissectrice, donc avec des valeurs de luminance du canal 7 supérieures à celles du canal 5. Ils sont plus ou moins allongés, et plus ou moins écartés de cette bissectrice.

– L'évolution annuelle se fait toujours dans le même sens, les valeurs d'hiver occupant la partie inférieure gauche du nuage, du côté du point origine des coordonnées, les valeurs d'été la partie droite du nuage, en position haute.

– Les cinq graphiques se regroupent en deux familles : milieux avec végétation d'une part, sans végétation de l'autre : sur les *milieux sans végétation*, l'évolution annuelle se déroule au voisinage immédiat de la première bissectrice tout au long de l'année, et l'allongement du nuage de points est maximum. Cette configuration évoque « l'axe des sols nus », identifié par de nombreux auteurs à partir de l'observation d'états de surface très variés à une date déterminée (Saint et al., 1981 ; Combeau, 1982 ; Bardinnet, Monget, 1980) et qui permet entre autres la définition d'un « index de brillance » des sols nus ($IB = \sqrt{(5)^2 + (7)^2}$). Sur les *milieux avec végétation*, les points représentatifs de la période hivernale sont proches de la première bissectrice, mais ils s'en écartent de plus en plus lorsqu'on se rapproche de l'été. L'amplitude totale de la variation annuelle est plus faible que celle des sols sans végétation.

– Les modalités de l'évolution des milieux végétaux sont spécifiques de ces milieux : dans le cas des *résineux*, l'amplitude de la variation annuelle est la plus faible, et les points représentatifs sont localisés grossièrement sur une ellipse dont le grand axe fait un angle de 25 à 30 degrés avec l'horizontale. Dans le cas des *feuillus*, le nuage de points s'étire vers la droite et s'incurve, et ce très rapidement à partir du mois de mai, du fait d'une augmentation de la luminance du canal 7 sans augmentation correspondante sur le canal 5. Dans le cas de la *prairie*, l'amplitude totale de la variation annuelle est plus importante encore que celle des feuillus, les modalités étant analogues.

– Dans tous les cas, sur les milieux avec végétation, l'évolution décrit un cycle plus ou moins accusé, les valeurs de luminance enregistrées d'août à novembre sur le canal 5 étant plus faibles que celles du premier semestre, à luminance égale sur le canal 7. Ce cycle n'est pas perceptible sur les sols sans végétation, les itinéraires accomplis dans les deux sens étant pratiquement superposés.

Il découle de ces observations que, si les différents nuages de points sont plus ou moins confondus ou partiellement superposés en hiver, ils sont nettement distincts les uns des autres en été. D'où l'intérêt d'un autre mode de représentation visant à mettre en évidence les périodes de discrimination des thèmes étudiés.

b) Comparaison des différents thèmes à certaines périodes de l'année.

Les résultats précédemment commentés sont regroupés cette fois de façon différente sur la figure 7 (a, b, c, d) pour comparer les situations à des saisons déterminées. Quatre périodes ont été retenues : de novembre à mars, pour caractériser la situation d'hiver; en avril et mai, période d'intense activité de la végétation et de croissance rapide de l'angle solaire; en juin et juillet, période d'été où se localisent les luminances élevées; enfin en août et septembre, période de décroissance rapide de ces luminances.

— En période d'hiver (Fig. 7 a), de novembre à mars, les divers milieux sont plus ou moins confondus dans la zone des faibles luminances des canaux 5 et 7. Toutefois, une évolution de type cyclique se dessine assez clairement de début novembre à début mars dans le cas des milieux avec végétation. On remarque en outre que le milieu prairie semble se distinguer de la forêt, même en hiver, et que, dès le début mars, l'évolution des sols nus est bien amorcée. Enfin, on observe que, si feuillus et résineux sont apparemment confondus, leurs évolutions respectives sont parallèles, et que les feuillus révèlent, à époque identique, une valeur de luminance du canal 5 plus élevée, et une valeur du canal 7 le plus souvent faible, que les résineux. Cette remarque peut être interprétée en fonction de la persistance des tissus chlorophylliens des résineux, et de la transparence partielle du couvert de chênes-hêtres en hiver.

— En avril et mai (Fig. 7 b), on note la rapidité de l'évolution et son sens : en oblique pour les résineux, parallèlement à la première bissectrice pour les sols sans végétation, pratiquement à l'horizontale pour feuillus et prairie.

— En juin-juillet (Fig. 7 c), les situations sont bien tranchées et la discrimination des thèmes semble aisée.

— En août et septembre enfin (Fig. 7 d), on assiste à une migration générale des points représentatifs en direction de l'origine des 2 axes de coordonnées, conduisant au regroupement final de novembre.

Cette représentation exprime de façon claire les possibilités de discrimination des thèmes. L'utilisation des canaux 5 et 7 doit conduire à des possibilités optima d'identification en juin-juillet de façon générale, mais parfois plus tôt, par exemple pour les prairies. On retiendra également que la disposition relative des 2 thèmes dans le plan des canaux 5 et 7 peut s'inverser au cours de l'année, comme c'est le cas pour les feuillus et les résineux.

Toutes ces observations sont interprétables en fonction de la réflectance des milieux végétaux : accroissement des valeurs du canal 7 parallèlement à une stagnation ou une régression des valeurs du canal 5, au fur et à mesure du développement du couvert végétal.

c) Les rapports inter-canaux 5 et 7.

Les remarques qui précèdent ont incité de nombreux auteurs à étudier les rapports de luminance entre canaux. On a pu ainsi définir des « indices de végétation » ou « de biomasse » associant de façons diverses les valeurs de luminance sur les canaux 5 et 7. Le rapport le plus fréquemment utilisé s'exprime sous la forme $7 - 5/7 + 5$ (ou sous la forme équivalente $7/5$). Les résultats obtenus pour ces deux rapports figurent en annexe et sont représentés graphiquement pour ce qui concerne $7 - 5/7 + 5$ sur la figure 8. Ces résultats se résument ainsi :

— La gamme des valeurs du rapport $7 - 5/7 + 5$ s'étale entre $-0,10$ et $0,64$, ce qui correspond pour $7/5$ à l'intervalle de variation $(0,7 - 5,1)$. Dans quelques rares cas, la luminance du canal 7 est donc légèrement inférieure à celle du canal 5. En fait, on peut considérer que la gamme de $7 - 5/7 + 5$ évolue en pratique entre 0 et 0,64.

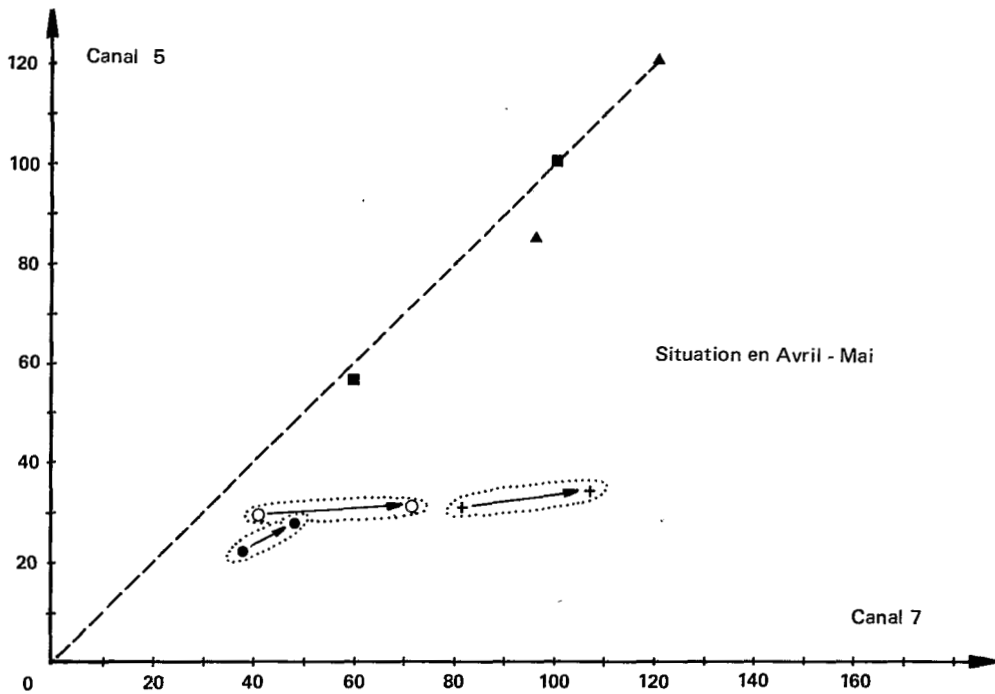
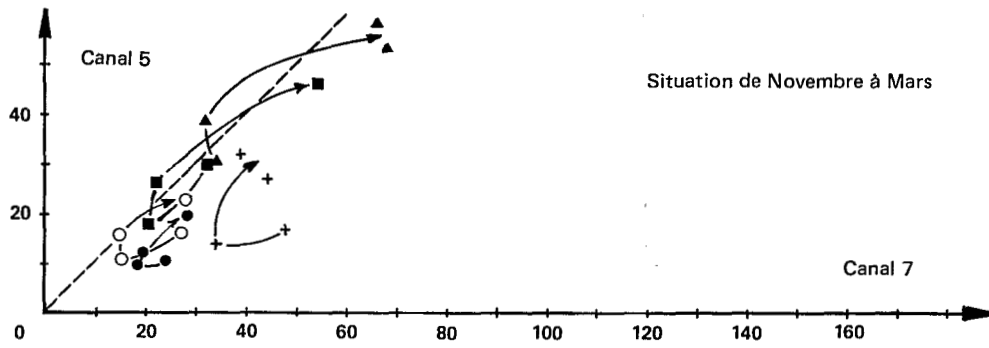


Figure 7 - Récapitulation des évolutions saisonnières par période - Corrélation inter-canaux (canaux 5 et 7).

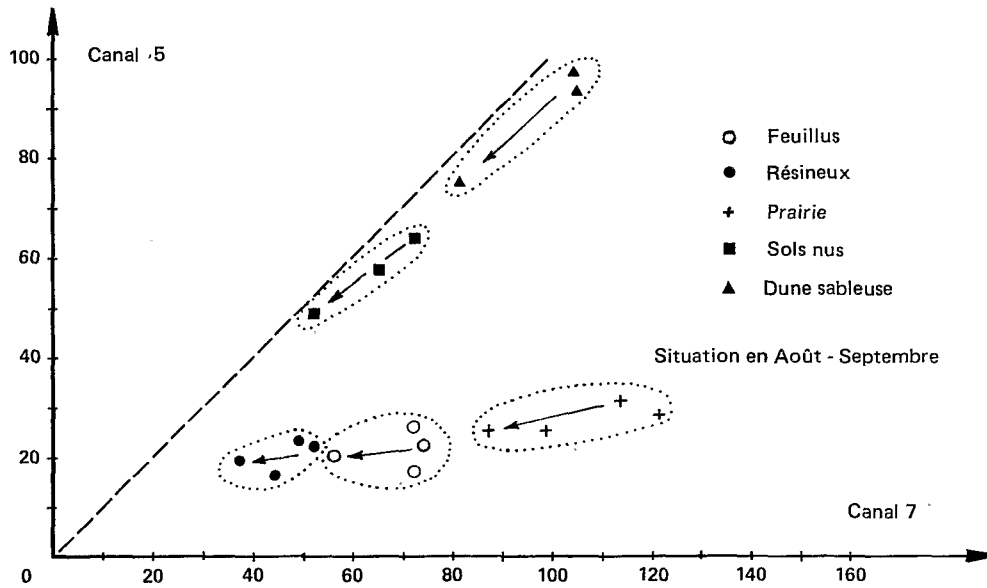
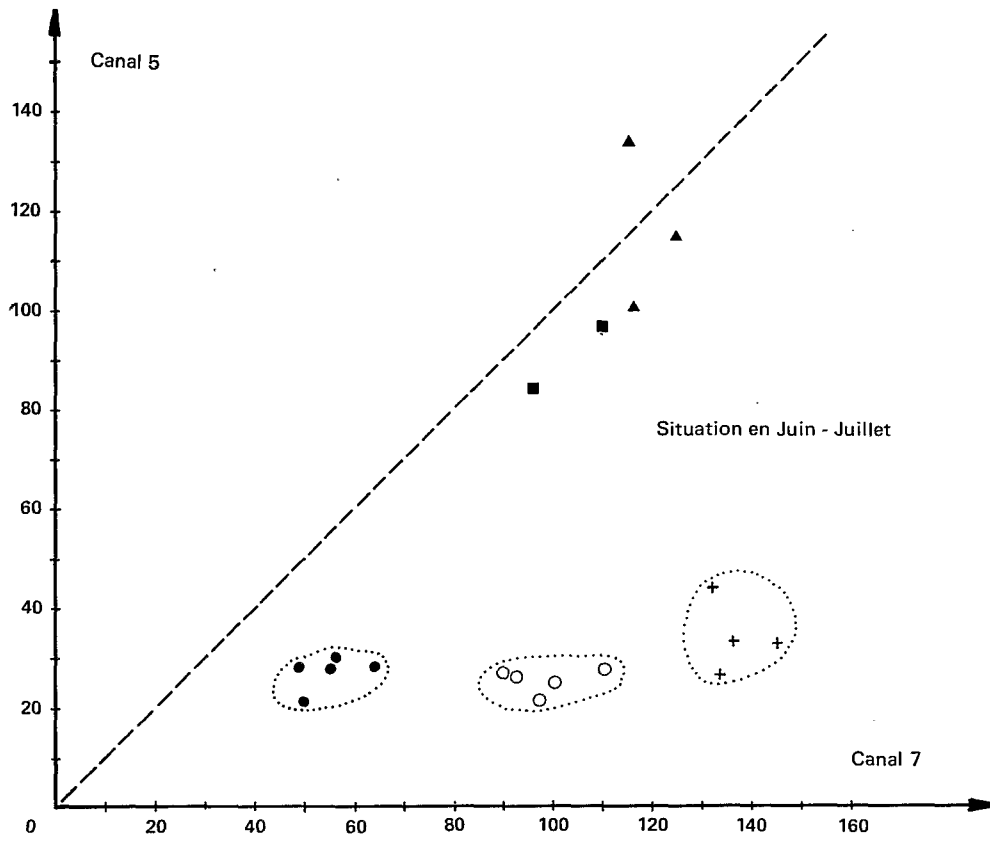


Figure 7 - (suite).

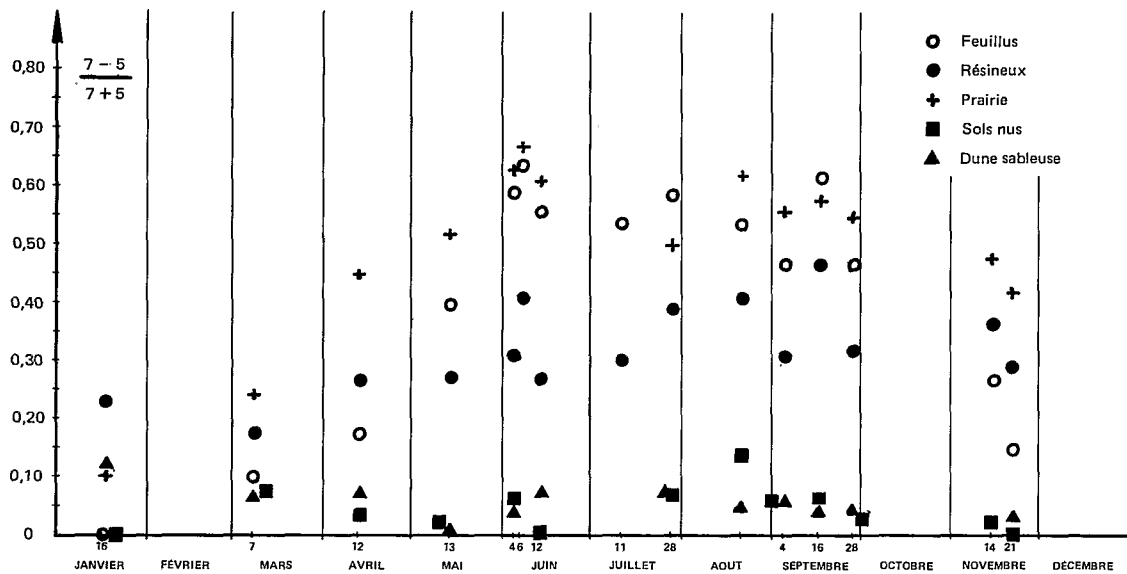


Figure 8 - Évolution saisonnière du rapport $\frac{\text{Canal 7} - \text{Canal 5}}{\text{Canal 7} + \text{Canal 5}}$

-- La construction graphique révèle l'existence de 3 situations distinctes :

- Les sols sans végétation : les valeurs du rapport sont systématiquement faibles, inférieures à 0,10 (sauf l'exception de la dune sableuse en janvier 1979), et le graphique ne met en évidence aucune variation saisonnière.
- La forêt feuillue et la prairie : les valeurs du rapport, basses pendant la période hivernale, et ce surtout dans le cas de la forêt feuillue, s'élèvent progressivement au printemps. Elles atteignent un maximum début juin (0,50 à 0,70), semblent décroître très légèrement de juin à septembre, puis chutent brutalement en novembre.
- La forêt résineuse : elle révèle un comportement distinct des 2 familles précédentes : le rapport est initialement plus élevé en hiver (probablement de l'ordre de 0,20 à 0,25), mais son évolution saisonnière est à peine perceptible (valeurs d'été comprises entre 0,27 et 0,40).

Il convient encore d'ajouter que, dans la famille des « sols sans végétation », il n'y a aucune différence significative entre sols nus et dune sableuse ; par contre, dans la famille « feuillus-prairie », on observe que le rapport $7 - 5 / 7 + 5$ est dans la plupart des cas plus élevé pour la prairie que pour les feuillus (l'exception relevée fin juillet suggère la possibilité d'une fauche ou d'une exploitation du pâturage avec diminution du canal 7). En outre, l'accroissement de valeur du rapport au printemps semble intervenir un mois ou six semaines plus tôt pour la prairie que pour les feuillus.

On peut concrétiser ces observations en mettant en corrélation les valeurs du rapport $7/5$ des feuillus et celles des résineux ou de la prairie. Dans le premier cas (feuillus-résineux, Fig. 9), le nuage de points obtenus s'ordonne autour d'une droite d'équation approximative : $Y = 5 X - 7$ et montre bien l'inversion relative des valeurs de ce rapport vers début mai et en octobre. Dans le second cas (feuillus-prairie, Fig. 10), on retrouve bien le fait que le rapport $7/5$ de la prairie est en général légèrement supérieur à celui de la forêt feuillue (et plus spécialement en novembre et en avril).

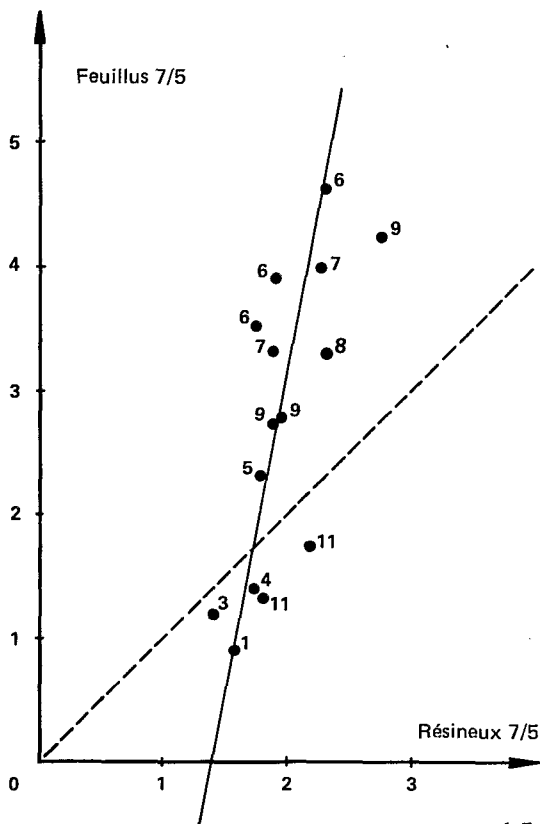


Figure 9 - Évolution comparée des rapports $\frac{\text{canal 7}}{\text{canal 5}}$ pour les feuillus et les résineux.

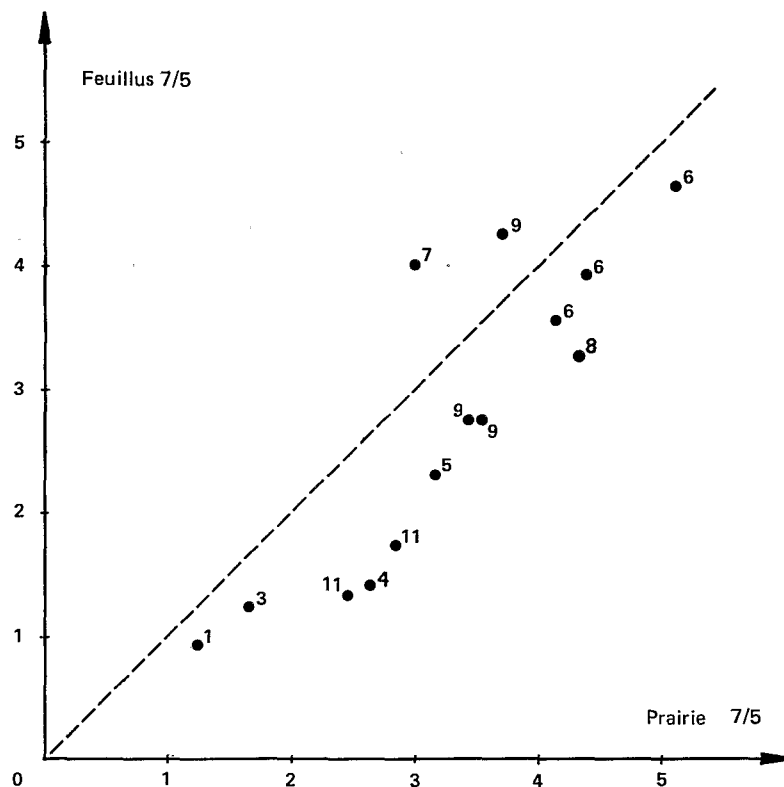


Figure 10 - Évolution comparée des rapports $\frac{\text{canal 7}}{\text{canal 5}}$ pour les feuillus et la prairie.

L'ensemble de ces remarques confirme l'intérêt du rapport $7 - 5/7 + 5$ (ou $7/5$) comme indice de végétation, même lorsqu'il est utilisé sous sa forme brute : constance de cette valeur pour les sols nus au cours de l'année ; distinction entre le couvert végétal à haute réflectance de la prairie et des feuillus et le couvert à réflectance plus faible des résineux, le premier à forte évolution saisonnière, le second à faible amplitude de variation ; perception du couvert résineux en hiver.

2 - Les autres corrélations de canaux.

Les combinaisons deux à deux de canaux autres que 5 et 7 ne semblent pas avoir fait l'objet d'études systématiques exception faite des travaux de Bardinet et Monget (1980). Nous avons testé certaines d'entre elles. Signalons quelques particularités observées à cette occasion.

a) Les canaux 4 et 5.

La représentation graphique (Fig. 11) montre que les points représentatifs de la corrélation canal 4-canal 5 s'ordonnent en familles distinctes de part et d'autre de la première bissectrice, mais selon des modalités différentes : pour les *résineux*, tous les points sont situés au-dessus de la bissectrice (rapport canal 5/canal 4 < 1) ; les *feuillus* occupent une situation tout à fait comparable ; dans le cas de la *prairie*, le nuage de points s'abaisse sensiblement et occupe une position axée sur cette bissectrice ; par contre, les deux thèmes *sols sans végétation* sont nettement situés au-dessous de la bissectrice (rapport $5/4 > 1$), et ceci d'autant plus que l'on s'éloigne de la période hivernale (une exception : mesure de janvier 1979 pour le thème « dune sableuse »). Le passage d'un sol nu à une végétation herbacée puis à un couvert arboré se traduit par une réduction du rapport $5/4$, conséquence de la diminution de réflectance sur le canal 5 sans évolution correspondante sur le canal 4.

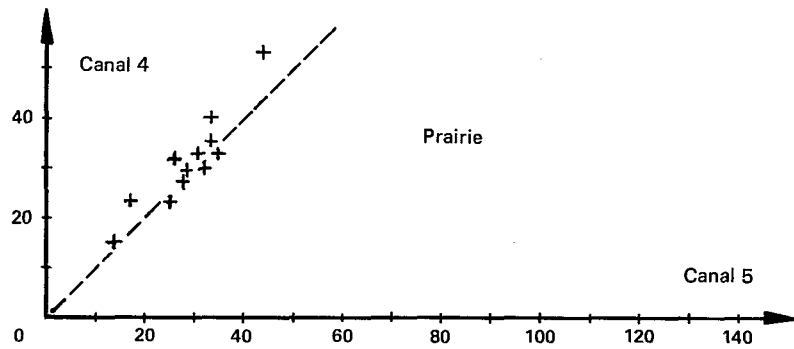
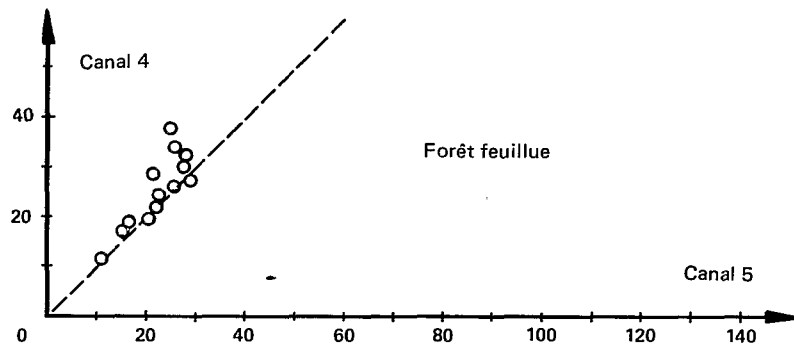
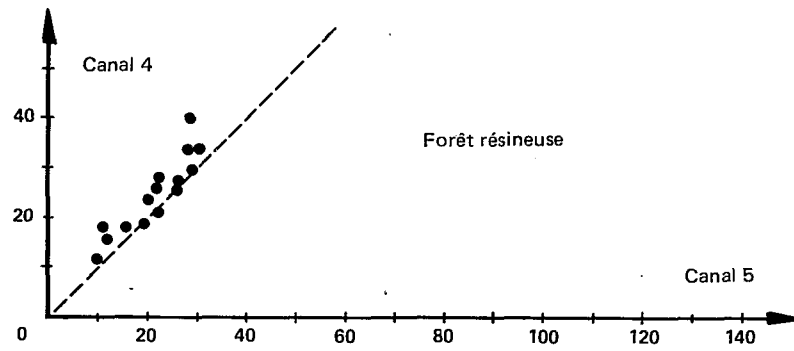


Figure 11 - Corrélation inter-canaux (canaux 4 et 5) - Comparaison des thèmes.

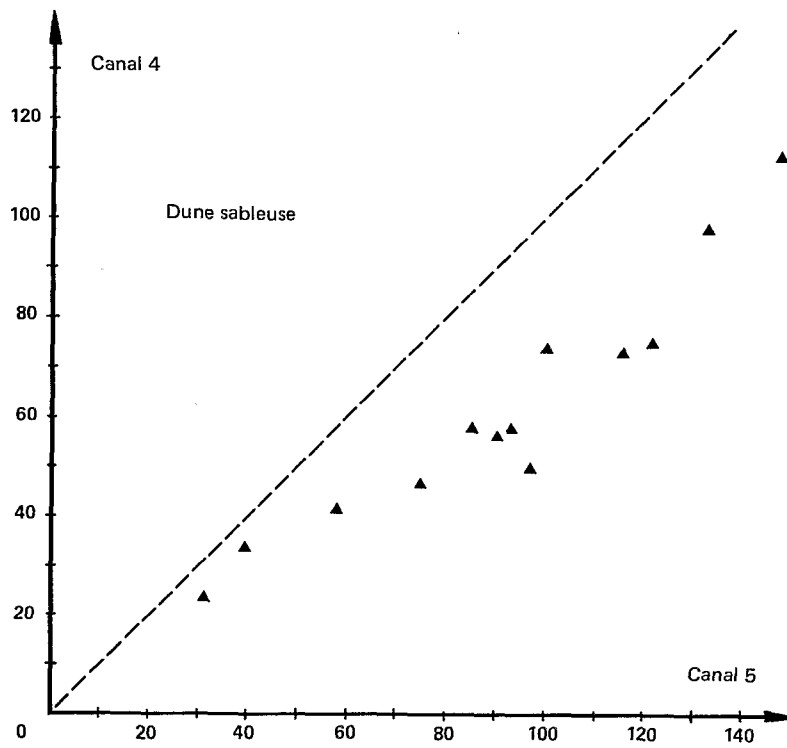
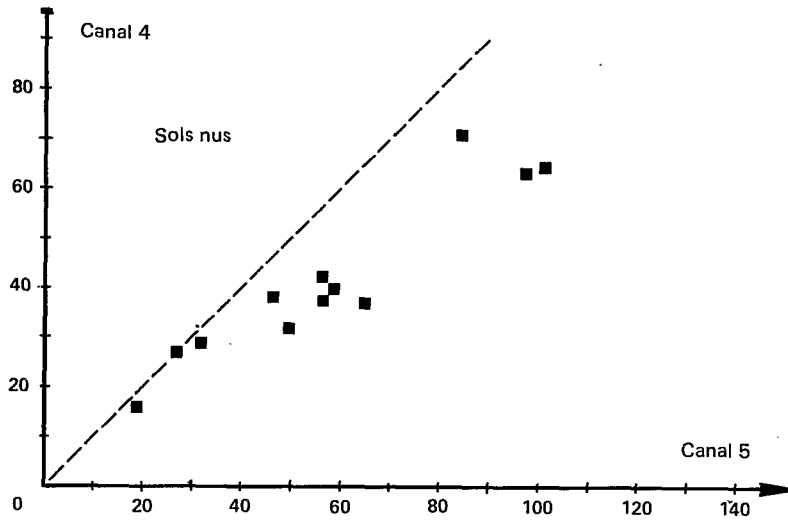


Figure 11 - (suite).

Ces observations incitent à étudier la variation saisonnière du rapport 5/4. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 12.

— Deux familles de courbes sont nettement individualisées, l'une correspondant aux sols sans végétation vers les valeurs élevées du rapport 5/4, l'autre aux sols avec végétation. Pour les sols sans végétation, le rapport 5/4 est pratiquement toujours supérieur à 1,1, alors qu'il est systématiquement inférieur à cette valeur pour tous les thèmes avec végétation.

— L'évolution saisonnière révélée par ces courbes, identique pour les deux familles, est nettement distincte de celles observées jusqu'à présent : il s'agit cette fois d'une courbe à 2 maxima : l'un en avril-mai, l'autre en septembre, et deux minima : l'un en décembre, l'autre fin juillet. Cette forme de courbe résulte nécessairement d'un non-synchronisme des évolutions respectives des canaux 5 et 4, phénomène signalé précédemment lors de l'étude du comportement des luminances par canal. La diminution observée à partir de fin mai est associée au fait que la luminance sur le canal 5 a alors atteint un palier, tandis que la luminance sur le canal 4 continue de croître.

L'interprétation de ce résultat est délicate : la présence de végétation se traduit bien par une valeur systématiquement plus faible du rapport 5/4, et on est alors tenté de penser que la diminution de ce rapport entre avril et juillet sous végétation pourrait traduire la diminution progressive de la surface de sol nu perceptible à travers la voûte foliaire ; mais on peut alors se demander pourquoi l'allure de l'évolution est la même pour les deux thèmes sans végétation. En outre, il paraît difficile d'attribuer la remontée observée entre juillet et septembre à une restriction du couvert.

Il sera donc nécessaire d'approfondir ce point, par exemple en étudiant les modalités de développement, entre mai et octobre, d'une végétation sur un sol initialement nu. Dans le cadre géographique de ce travail, la betterave ou le maïs pourraient être utilisés comme végétaux-types.

b) Les canaux 6 et 7.

La littérature fait apparaître certaines divergences entre les auteurs quant au choix des canaux 6 ou 7 pour traduire au mieux l'effet de la végétation. Dans le cas étudié ici, un système de représentation graphique analogue à celui des figures 6 et 11 fait apparaître que les points représentatifs de la corrélation canal 6-canal 7 sont toujours très proches de la première bissectrice. Ils s'ordonnent grossièrement selon un cycle elliptique ayant pour grand axe cette bissectrice. Mais on observe que cette symétrie peut disparaître : par exemple, les points obtenus pour l'été (mois de juin et juillet) se situent au-dessus de cette bissectrice pour les résineux et les sols sans végétation, au-dessous pour les feuillus et la prairie. La présence d'une chlorophylle « active » entraînerait par conséquent une élévation faible, mais apparemment significative, du rapport canal 7/canal 6 (Fig. 13).

Par ailleurs, dans le cas du thème « dune sableuse », c'est pratiquement la totalité de la courbe qui se situe au-dessus de la première bissectrice, c'est-à-dire dans le domaine des rapports canal 7/canal 6 > 1.

L'étude des variations saisonnières du rapport canal 7/canal 6 (Fig. 14) révèle une évolution rappelant, quoique moins nettement, celle signalée pour le rapport 5/4 : présence de deux maxima en mai-juin et en septembre-octobre, et de deux minima en février-mars et en juillet. Le minimum d'hiver serait donc retardé de deux mois par rapport à la courbe précédente. L'élévation du rapport 7/6 de février à juin est naturellement liée à l'augmentation rapide de la luminance sur le canal 7, en particulier pour les thèmes avec végétation. La baisse enregistrée en juillet est associée au rattrapage du canal 7 par le canal 6. Quant au maximum d'automne, il est imputable à la diminution rapide des luminances du canal 6 à cette période.

On remarque que les valeurs élevées du rapport 7/6 sont obtenues pour les thèmes à végétation « active », forêt feuillue et prairie, que les valeurs faibles sont celles des thèmes « sans végétation » pour lesquels le rapport 7/6 ne dépasse pratiquement jamais la valeur 1, et que les résineux se trouvent en position intermédiaire. Enfin, pour tous les thèmes, les valeurs maxima du rapport 7/6 se situent au voisinage de septembre. On notera toutefois une anomalie apparente en forêt en novembre.

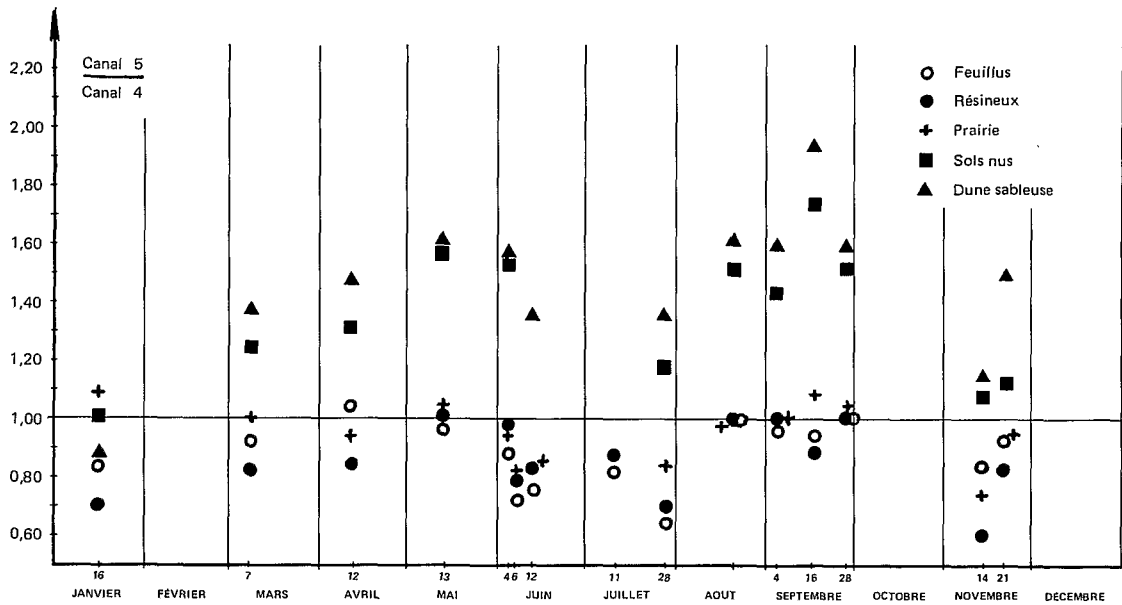


Figure 12 - Évolution saisonnière du rapport $\frac{\text{Canal 5}}{\text{Canal 4}}$

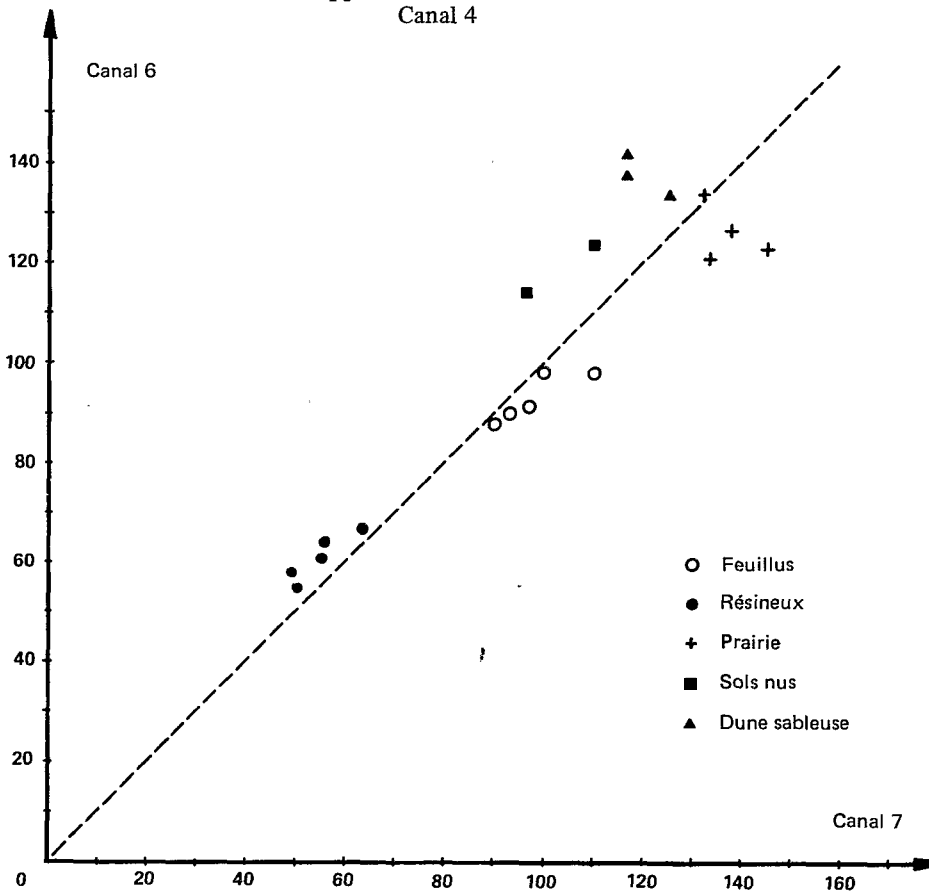


Figure 13 - Corrélation inter-canaux. Canaux 6 et 7. Situation en juin-juillet.

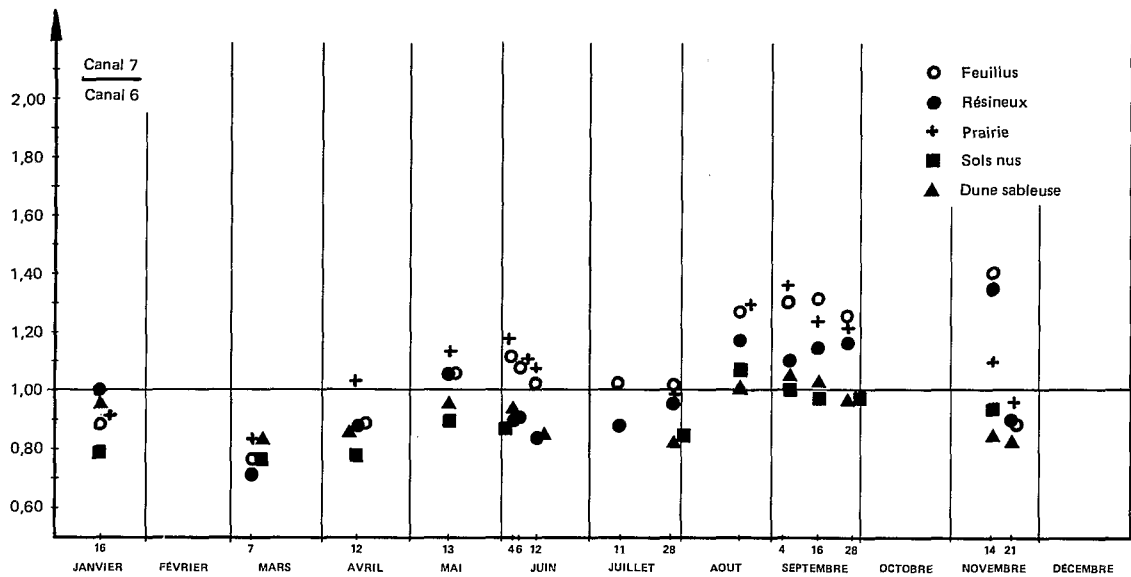


Figure 14 - Évolution saisonnière du rapport $\frac{\text{Canal 7}}{\text{Canal 6}}$

c) Les canaux 7 et 4.

Le rapport $7 - 4 / 7 + 4$ est rarement utilisé dans la littérature. Il pourrait être intéressant de le comparer au rapport $7 - 5 / 7 + 5$ pour juger de la validité de ce dernier comme indice de végétation. Les résultats présentés sur la figure 15 conduisent aux conclusions suivantes :

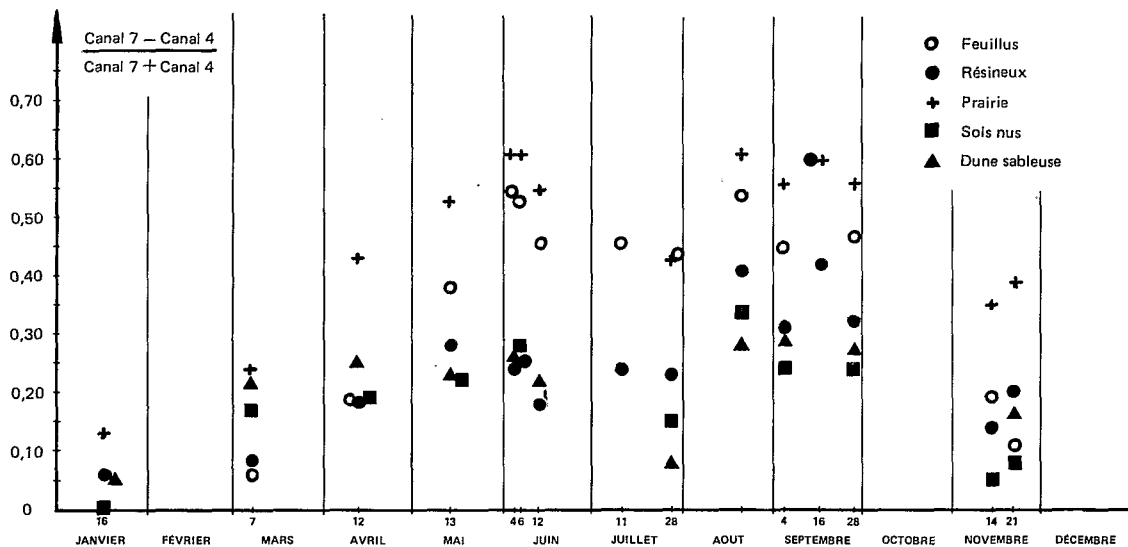


Figure 15 - Évolution saisonnière du rapport $\frac{\text{Canal 7} - \text{Canal 4}}{\text{Canal 7} + \text{Canal 4}}$

- a - Les 3 situations décrites à propos du rapport $7 - 5/7 + 5$ ne se retrouvent pas avec $7 - 4/7 + 4$: si la situation du groupe feuillus-prairie n'a pas varié, on constate toutefois que le thème résineux a un comportement proche de celui des sols sans végétation dont il se différencie à peine.
- b - Par ailleurs, la distribution des valeurs du rapport pour les thèmes « sols sans végétation » est plus dispersée, avec certaines manifestations d'une amorce d'évolution saisonnière.
- c - Enfin, l'effet hivernal du couvert végétal résineux est sensiblement moins apparent que celui décrit à propos du rapport $7 - 5/7 + 5$.

Compte-tenu des résultats de ces comparaisons de canaux, on peut considérer que le choix du rapport $7 - 5/7 + 5$ (ou $7/5$) pour exprimer le développement d'un couvert végétal est justifié. Il le serait sans doute plus encore si les observations rapportées ici avaient pris pour base non pas les valeurs numériques brutes, mais les valeurs de la luminance énergétique corrigée et celles de la réflectance correspondante. Faute de données de base, cette correction n'a pu être apportée.

D - LES RAPPORTS DE LUMINANCES ENTRE THÈMES.

Les rapports de luminances envisagés jusqu'à présent visaient à caractériser, à partir de longueurs d'onde différentes, les variations observées dans un thème déterminé. Il peut être utile d'étudier également les rapports de luminance entre thèmes différents sur une même longueur d'onde, les résultats étant susceptibles d'apporter des informations sur le pouvoir discriminant de ces longueurs d'onde pour les thèmes envisagés. Il a semblé intéressant de se livrer à cette expérience pour comparer les thèmes dont les signatures spectrales peuvent présenter des analogies : feuillus et résineux d'une part, feuillus et prairie d'autre part.

1 - Comparaison feuillus-résineux.

Nous avons constaté précédemment que les luminances des feuillus et des résineux étaient le plus souvent très proches sur les canaux 4 et 5, mais distinctes à certaines périodes sur les canaux 6 et 7. Il était donc logique d'étudier les variations des deux rapports Canal 7 Feuillus / Canal 7 Résineux et Canal 6 Feuillus / Canal 6 Résineux. Les résultats sont représentés sur la figure 16. On constate :

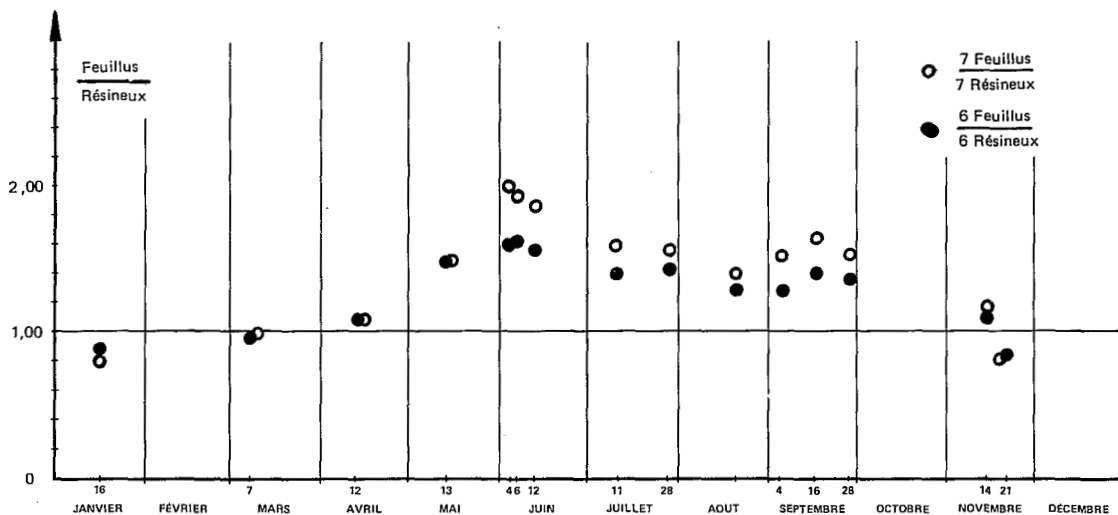


Figure 16 - Évolution saisonnière comparée des rapports $\frac{\text{Canal 7 Feuillus}}{\text{Canal 7 Résineux}}$ et $\frac{\text{Canal 6 Feuillus}}{\text{Canal 6 Résineux}}$

- a - que ces rapports subissent une évolution saisonnière, caractérisée par le fait que leur valeur est inférieure à 1 en hiver, supérieure à 1 de mars à novembre.
- b - que les valeurs maxima des deux rapports, ou plus exactement celles qui s'écartent le plus de la valeur 1, sont atteintes en juin. Le mois de juin constitue donc la date optimum de discrimination des deux thèmes à partir des canaux 6 et 7. Par contre, en hiver, la discrimination feuillus-résineux à partir de ces mêmes canaux ne s'avère pas possible.
- c - que le rapport 7 Feuillus / 7 Résineux atteint des valeurs sensiblement plus élevées que celles du rapport 6 Feuillus / 6 Résineux. C'est donc à partir du canal 7 que les possibilités de discrimination des deux thèmes sont les meilleures.
- d - A titre de curiosité, on a testé également le rapport 5 Feuillus / 5 Résineux, malgré la grande analogie observée entre les deux milieux sur cette longueur d'onde. On constate là encore l'existence d'une variation saisonnière, moins caractéristique que les précédentes, mais cependant perceptible : ce rapport varie entre 0,89 et 1,45, toutes les valeurs obtenues du 1er juin au 30 septembre étant inférieures à 1,1 (et plus spécialement < 1,0 du 1-6 au 4-9) et toutes les valeurs du 30 septembre au 1er juin supérieures à 1,1. En d'autres termes, pendant les mois d'été, les valeurs de la luminance des feuillus sur le canal 5 passent au-dessous de celles obtenues pour les résineux. Par ailleurs, cette observation confirme que, si la discrimination feuillus-résineux à partir des canaux 6 et 7 n'est pas possible en hiver (voir b - ci-dessus), par contre, une certaine discrimination des deux thèmes s'avère parfois possible à partir du canal 5, en avril 1976 par exemple.

2 - Comparaison feuillus-prairie.

Il a déjà été signalé que ces deux thèmes présentaient parfois des analogies, en particulier sur les canaux 6 et 7, mais aussi certains comportements spécifiques. D'où l'intérêt de l'étude des variations des rapports Canal 7 Feuillus / Canal 7 Prairie et Canal 6 Feuillus / Canal 6 Prairie. Les résultats correspondent à la figure 17. On constate que :

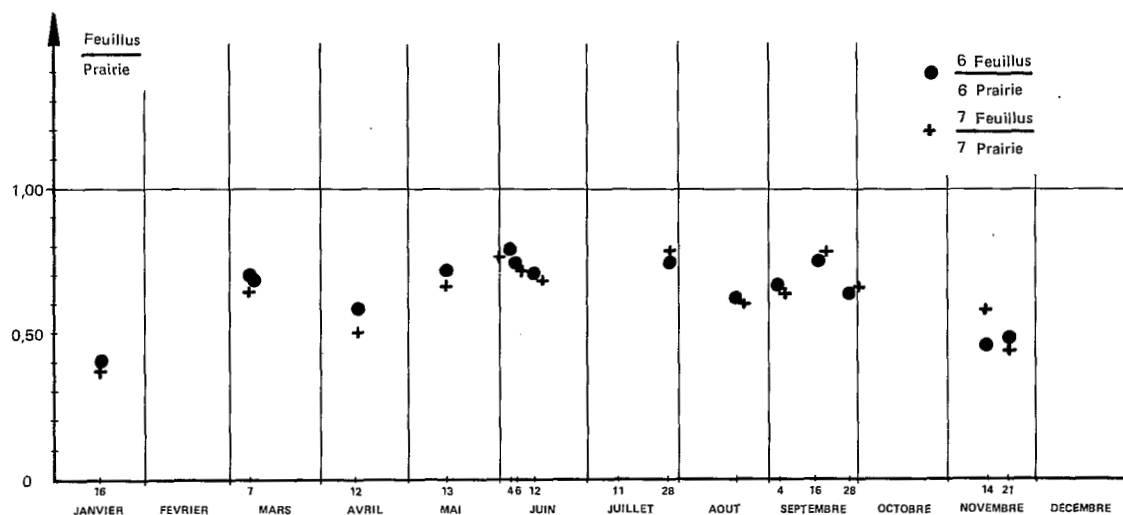


Figure 17 - Évolution saisonnière comparée des rapports $\frac{\text{Canal 7 Feuillus}}{\text{Canal 7 Prairie}}$ et $\frac{\text{Canal 6 Feuillus}}{\text{Canal 6 Prairie}}$

- a - les deux rapports sont constamment inférieurs à 1,00, c'est-à-dire que la luminance de la prairie sur les deux longueurs d'onde est toujours plus élevée que celle de la forêt feuillue.
- b - l'allure de l'évolution saisonnière est du même type que celle étudiée précédemment Feuillus / Résineux avec un maximum d'été et un minimum d'hiver. Mais la discrimination prairie-feuillus (sur la base d'un écart maximum par rapport à la valeur 1) est plus facile en hiver qu'en été, résultat qui s'oppose donc au précédent.
- c - la courbe d'évolution semble présenter un accident en avril. Il ne s'agit pas d'un phénomène fortuit, mais de la période de démarrage de la végétation herbacée, dont nous avons vu qu'elle était identifiable sur les courbes de variation des luminances de 6 et 7. Le mois d'avril est donc, lui aussi, une période favorable pour la discrimination des deux thèmes.
- d - les valeurs des rapports sont très voisines pour les canaux 6 et 7, mais dans la majorité des cas les plus faibles sont celles obtenues avec 7. C'est donc le canal 7 qui doit de préférence être utilisé pour la discrimination des prairies et des feuillus.
- e - Comme précédemment, on a testé le rapport 5 Feuillus / 5 Prairie à titre indicatif. Ce rapport est toujours compris entre 0,50 et 0,94. Si l'on excepte la valeur aberrante de janvier, l'allure de l'évolution est analogue à celle enregistrée pour le rapport 5 Feuillus / 5 Résineux, avec un minimum d'été. Mais le classement semble plus flou dans ce cas.

E – OBSERVATIONS SUR LA VARIABILITÉ DES DONNÉES D'ORIGINES DIVERSES.

Il a été signalé dès le début de ce texte que les données utilisées pour cette étude avaient été recueillies par des satellites différents, essentiellement Landsat 1 et Landsat 2, accessoirement Landsat 3 pour janvier 1979.

Les données n'ont pas permis de mettre en évidence l'existence d'une distorsion systématique liée à cette cause possible de variation : les mesures de janvier 1979 révèlent bien une anomalie, mais celle-ci ne concerne apparemment qu'un thème, ou peut-être deux, et il est de plus apparu possible d'en donner une explication plausible (présence de givre consécutive à une période de gel intense pendant deux semaines).

Les autres mesures, toutes effectuées par Landsat 1 ou Landsat 2, n'ont pas révélé de décalage évident, ni dans les courbes d'évolution de la luminance ni dans les rapports entre canaux. Il conviendrait toutefois de vérifier qu'il n'y a pas de distorsion systématique entre les capteurs des différents satellites, cette vérification étant apparemment facile à effectuer expérimentalement à partir d'enregistrements réalisés dans les régions où les conditions climatiques sont plus favorables que celles dont bénéficie habituellement la région tempérée.

Une autre source de variabilité possible réside dans le traitement subi par les données entre leur réception au sol et leur diffusion sous forme de bande magnétique. En plus des 15 bandes utilisées tout au long de cette étude, et fournies par le Centre de réception de Télésazio, nous disposons d'une bande magnétique USGS de la scène 214-26, en date du 23-03-1973 (Landsat 1). Les résultats fournis par cette bande n'ont pas été utilisés, du fait de leur distorsion systématique par rapport au reste des données. A titre indicatif, ces résultats sont présentés dans le tableau suivant et comparés aux valeurs entre lesquelles ils devraient logiquement s'insérer. On constate que les distorsions sont considérables, et qu'il ne suffirait pas d'une opération simple pour les faire disparaître, et pouvoir ainsi utiliser des données d'origines différentes.

Tableau 2 - Comparaison des données USGS et Télésazio.

	Dates	Or.	Luminances				Rapports						
			4	5	6	7	$\frac{7-5}{7+5}$	$\frac{7}{5}$	$\frac{7-4}{7+4}$	$\frac{7}{4}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{6}{4}$	5
Feuillus	7-3-76	T	25	23	37	28	0,10	1,22	0,06	1,12	0,76	0,92	1,61
	23-3-73	U.S	24	17	19	10	0,26	0,59	-0,41	0,42	0,53	0,71	1,12
	12-4-76	T	28	29	46	41	0,17	1,41	0,19	1,46	0,89	1,04	1,59
Résineux	7-3-76	T	24	20	39	28	0,17	1,40	0,08	1,17	0,72	0,83	1,95
	23-3-73	U.S	22	14	19	9	-0,22	0,64	-0,42	0,41	0,47	0,64	1,36
	12-4-76	T	26	22	43	38	0,27	1,73	0,19	0,46	0,88	0,85	1,95

T : Télésazio, Italie

U.S : Eros Data Center, U.S.A.

F – OBSERVATIONS SUR LA REPRÉSENTATIVITÉ DES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE.

A l'issue de cette étude, on peut se demander dans quelle mesure les périmètres choisis pour caractériser chacun des thèmes étudiés sont représentatifs de ce thème dans son ensemble. S'il n'en était pas ainsi, les conclusions n'auraient évidemment qu'une valeur limitée à un cadre restreint, sans généralisation possible.

Pour tester cette représentativité, la solution la plus simple consistait à définir la signature spectrale du thème par les bornes du spectre de luminance obtenu dans le cadre restreint du périmètre expérimental, et à vérifier la validité de cette signature à l'échelle d'une surface plus étendue. En prenant pour aire de vérification l'ensemble du cadre de l'écran de visualisation (256 x 256 pixels), on passe ainsi de 150 à 65 000 pixels environ. Les bornes du spectre de luminance, ou « serpent » du thème, nous étaient connues (voir tableau en annexe), et la vérification s'avérait donc simple, par exemple par comparaison de la visualisation du thème avec la carte de l'O.N.F.

Un premier essai tenté sur l'image du 28-9-1980 nous a montré que le choix des périmètres feuillus et résineux conduisait à une cartographie très satisfaisante de ces deux thèmes dans le cadre de la forêt d'Ermenonville dans son ensemble. En d'autres termes, les deux périmètres de mesure retenus sont bien représentatifs des thèmes plus généraux forêt feuillue et forêt résineuse d'Ermenonville. Ne sont exclus de la représentation que les zones de clairières, les zones de taillis, et certains secteurs de forêt à faible densité de plantation, ce qui était prévisible. Des essais analogues ont été tentés sur les autres dates : ils conduisent à une conclusion du même ordre pour toutes les vues comprises entre avril et septembre. Pour les vues d'hiver, la qualité de la généralisation par thème est moins satisfaisante, mais l'ensemble du thème forêt (feuillus + résineux) est toujours correctement restitué. Il est donc justifié de considérer que la représentativité des périmètres de mesure était très satisfaisante.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Cette étude a été conduite sur des données brutes du satellite Landsat obtenues à partir de 15 dates d'observation sur un même secteur géographique du Bassin parisien. La répartition de ces dates dans le temps a permis d'avoir un aperçu de l'évolution saisonnière de la signature spectrale de deux milieux forestiers bien définis (une futaie à chênes-hêtres, et un perchis de pins sylvestres) en y adjoignant, à titre de comparaison, des observations du même type sur des milieux pérennes différents : prairie, sols nus, dune sableuse.

En ce qui concerne les valeurs de la luminance, sur les 5 thèmes étudiés, et sur chacun des 4 canaux Landsat, on observe une variation saisonnière caractérisée par un minimum d'hiver et un maximum d'été. Cette évolution est donc comparable à celle de la hauteur du soleil au moment de la saisie des données. Toutefois, plusieurs comportements spécifiques d'un thème ou d'un canal au niveau de l'amplitude de variation des luminances ou de ses modalités impliquent que la liaison entre luminance et hauteur du soleil est modifiée par certains paramètres. L'amplitude de cette variation diffère considérablement selon les thèmes et les canaux. En présence de végétation, elle est faible sur les canaux 4 et 5, plus élevée sur les canaux 6 et 7, mais, dans ce cas, elle est liée à la nature du couvert végétal, avec une augmentation marquée lorsqu'on passe des résineux aux feuillus, puis à la prairie. En l'absence de végétation, l'amplitude de la variation sur les canaux 4 et surtout 5 est nettement plus accusée qu'en présence d'un couvert végétal, alors que, sur les canaux 6 et 7, cette différence s'atténue, ou même disparaît, par exemple dans le cas du canal 7. L'étroitesse de la gamme des valeurs de luminance au minimum d'hiver a pour corollaire que les discriminations entre thèmes sont plus aisées en règle générale au voisinage du maximum d'été.

En ce qui concerne la variabilité inter-annuelle des luminances, il est apparu que, dans le cas présent, elle ne revêtait pas une grande importance et que les différences enregistrées à l'échelle du mois pouvaient même traduire les modifications de l'angle solaire, en particulier lors des périodes où cette modification est rapide (équinoxe de septembre par exemple). Il est apparu que certains phénomènes météorologiques particuliers pouvaient permettre d'interpréter certaines des variations observées tout au moins à titre d'hypothèse.

En ce qui concerne les combinaisons de canaux, la combinaison 5/7 fait apparaître des évolutions saisonnières bien différentes des cinq thèmes étudiés et illustre les raisons pour lesquelles la discrimination des thèmes est facilitée en été. Il a également été montré, par exemple pour le couple feuillus-résineux, que la signature spectrale de deux thèmes différents pouvait s'inverser en cours d'année. « L'axe des sols nus », bien identifiable, s'est avéré pratiquement constant dans l'année. Certains traits spécifiques ont été observés à partir des combinaisons 6/7 et 4/5.

L'étude des rapports de luminances entre canaux montre une variation saisonnière caractéristique du rapport $7 - 5/7 + 5$ (ou $7/5$) dans le cas des thèmes feuillus et prairie, une variation moins accusée des résineux, et une constance relative pour les thèmes « sans végétation ». Les variations du rapport $7 - 4/7 + 4$ sont du même type, mais semblent moins caractéristiques. Plusieurs autres observations confirment la validité du choix des canaux 7 et 5 pour définir des « indices de végétation ». Les rapports 5/4 et 7/6 montrent également des évolutions saisonnières apparemment complexes qu'il conviendrait d'élucider.

En ce qui concerne les rapports de luminances entre thèmes, il est apparu que, dans la comparaison feuillus-résineux, la meilleure discrimination était obtenue sur le canal 7 et en juin, les performances du canal 6 étant moins satisfaisantes. De plus, la discrimination feuillus-résineux n'est pas possible en hiver à partir des canaux 6 et 7, mais elle s'avère parfois réalisable à partir du canal 5. Dans la comparaison forêt feuillue-prairie, c'est le canal 7 qui conduit aux meilleurs résultats, mais cette fois en période hivernale, ou pendant le mois d'avril.

Parmi les observations accessoires, il convient de signaler la distorsion considérable relevée entre les données des bandes USGS et Télésazio.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRIEU B. (1981) – Évaluation de méthodes de traitements multibandes de scènes Landsat appliquées à l'inventaire et à la surveillance d'un massif forestier composite. 4e Colloque International du GDTA, Toulouse, juin 1981, pp. 363-375.
- BARDINET Cl., MONGET J.-M. (1980) – Lanchad. Télédétection et géographie appliquée en zone sahélienne du Tchad. Coll. Ec. Norm. Sup. J.F. n° 12, Paris, 1980.
- CHAUME R. (1982) – Comparaison Simulation Spot-Landsat en milieu forestier, Ermenonville 1980. Actes du Symposium International de la Commission VII de la Société Internationale de Photogrammétrie et Télédétection, Toulouse, 13-17 septembre 1982, GDTA, pp. 357-366.
- CHAUME R., COMBEAU A. (1983) – Évolutions saisonnières comparées des signatures spectrales de feuillus et de conifères à partir des données Landsat. VIIIe Symposium Canadien de Télédétection, Montréal, 3-6 mai 1983 (sous presse).
- COMBEAU A. (1982) – Simulation des données du futur satellite Spot, Ermenonville 1980. Résultats dans le domaine de l'occupation des sols et comparaison Landsat-Simulation Spot. ORSTOM, Télédétection 7, Paris, 1982, pp. 1-41.
- ROBINOVE C.J., (1982) – Computation with physical values from Landsat Digital data. *Photogr. Eng. Rem. Sens.*, mai 1972, vol. 48, n° 5, pp. 781-784.
- SAINT G., PODAIRE A., ANGLADE I. (1981) – Simulation radiométrique de Spot : résultats d'expérimentation sur la végétation et les sols. Signatures Spectrales d'Objets en Télédétection, Avignon, 8-11 septembre 1981, GI 4, pp. 73-83.
- TUCKER J.C. (1977) – Distinguishing vegetation from soil background. *Photogr. Eng. Rem. Sens.*, 1977, vol. 45, n° 6, pp. 1541-1550.

ANNEXES

ANNEXE 1 – DISTRIBUTION DES LUMINANCES – FEILLUS

Dates	Canal	Mini	1er décile	Médiane	9e décile	Maxi	Moyenne	Dates	Canal	Mini	1er décile	Médiane	9e décile	Maxi	Moyenne
16-1-79	4	16	18	19	21	28	19	28-7-78	4	35	36	39	40	46	38
	5	12	14	16	19	23	15		5	20	23	25	28	35	25
	6	11	16	17	21	27	17		6	84	89	98	105	118	97
	7	11	13	15	19	24	15		7	88	91	100	108	112	99
7-3-76	4	22	24	25	26	28	24	8-81	4	20	22	22	24	25	22
	5	21	22	23	25	27	23		5	20	21	22	24	26	22
	6	32	35	37	40	42	37		6	47	52	57	60	66	56
	7	24	26	28	32	36	28		7	60	68	73	78	81	73
12-4-76	4	25	26	28	29	31	27	4-9-81	4	24	26	27	28	30	27
	5	26	27	29	31	34	28		5	24	25	26	27	29	26
	6	40	43	46	49	55	45		6	49	53	56	59	63	55
	7	34	37	41	45	49	40		7	64	68	72	76	80	71
13-5-79	4	28	29	31	32	33	30	16-9-79	4	16	17	18	20	20	18
	5	27	29	31	33	36	30		5	14	16	17	18	20	16
	6	54	61	67	72	76	66		6	47	51	55	60	63	55
	7	61	65	72	77	83	71		7	61	65	72	78	87	71
4-6-78	4	28	30	31	33	33	31	28-9-80	4	18	18	20	20	21	19
	5	23	25	27	30	32	27		5	18	19	20	21	22	19
	6	87	91	98	106	111	98		6	36	40	44	47	50	43
	7	93	101	110	120	126	110		7	48	49	55	60	65	54
6-6-76	4	26	27	29	29	31	28	14-11-78	4	12	16	19	22	23	18
	5	17	19	21	22	24	20		5	10	13	16	19	21	15
	6	79	87	93	100	108	93		6	12	15	20	23	28	19
	7	85	93	101	112	117	101		7	16	24	28	32	36	27
12-6-75	4	31	34	34	36	37	34	21-11-75	4	11	12	12	13	14	12
	5	23	26	26	28	29	26		5	9	10	11	12	13	11
	6	77	85	90	97	102	90		6	14	16	17	19	20	17
	7	80	88	93	100	105	92		7	10	12	15	17	20	15
11-7-76	4	30	31	33	34	36	32								
	5	23	25	27	29	33	27								
	6	79	82	88	94	100	88								
	7	77	85	90	98	101	90								

DISTRIBUTION DES LUMINANCES – PRAIRIE

Dates	Canal	Mini	1er décile	Médiane	9e décile	Maxi	Moyenne	Dates	Canal	Mini	1er décile	Médiane	9e décile	Maxi	Moyenne
16-1-79	4	25	28	30	34	39	30	28-7-78	4	48	49	53	58	59	52
	5	20	23	32	36	44	30		5	35	37	44	51	55	43
	6	30	37	43	46	49	41		6	110	117	133	146	156	132
	7	29	34	39	43	45	38		7	100	112	132	140	148	128
7-3-76	4	25	26	27	28	30	27	8-81	4	29	30	32	33	35	31
	5	28	29	31	34	36	31		5	28	29	32	34	36	31
	6	52	65	79	87	91	77		6	71	80	83	92	94	85
	7	54	71	82	88	93	80		7	89	105	113	125	130	113
13-5-79	4	30	31	33	35	39	33	16-9-79	4	21	22	23	25	25	23
	5	29	31	34	38	40	34		5	16	22	25	28	32	24
	6	86	86	94	99	104	93		6	64	69	75	88	92	76
	7	96	100	107	116	123	107		7	75	84	93	116	123	96
4-6-78	4	33	35	35	38	38	35	28-9-80	4	22	23	24	25	25	23
	5	30	31	33	35	37	32		5	22	23	25	25	28	25
	6	112	115	123	129	138	122		6	57	66	70	75	77	70
	7	128	133	145	154	159	144		7	73	80	86	93	99	86
6-6-76	4	31	31	32	35	37	33	14-11-78	4	19	21	23	24	27	22
	5	22	24	26	28	31	25		5	13	13	17	20	25	17
	6	109	116	121	127	132	120		6	31	38	44	53	55	45
	7	115	128	133	138	141	132		7	36	40	48	56	60	48
12-6-75	4	37	38	40	42	45	39	21-11-75	4	14	14	15	16	18	15
	5	29	31	33	35	37	33		5	12	12	14	16	17	14
	6	93	111	127	137	138	125		6	29	32	35	38	40	35
	7	103	121	137	147	149	135		7	29	32	34	36	40	34
11-7-76	4														
	5														
	6														
	7														

Nuages

DISTRIBUTION DES LUMINANCES – DUNE SABLEUSE

Dates	Canal	Mini	1er décile	Médiane	9e décile	Maxi	Moyenne	Dates	Canal	Mini	1er décile	Médiane	9e décile	Maxi	Moyenne	
16-1-79	4	46	55	61	70	83	61	28-7-78	4	58	70	98	121	128	96	
	5	32	42	53	65	73	51		5	58	76	133	164	178	123	
	6	46	52	69	82	93	68		6	91	106	142	180	192	145	
	7	27	45	67	82	89	64		7	84	91	116	136	144	114	
7-3-76	4	33	38	42	45	45	41	8-81	4	41	49	56	62	64	55	
	5	40	49	58	61	63	55		5	55	74	90	103	108	88	
	6	61	71	80	90	92	79		6	73	86	99	110	119	99	
	7	48	56	66	75	79	66		7	80	93	100	106	120	102	
12-4-76	4	38	45	58	63	65	56	4-9-81	4	42	51	58	62	62	56	
	5	53	72	85	97	103	83		5	61	74	93	99	101	88	
	6	61	99	113	128	134	110		6	53	80	100	110	112	93	
	7	71	84	97	109	113	95		7	85	93	105	119	119	105	
13-5-79	4	64	66	75	81	83	73	16-9-79	4	25	28	50	60	64	48	
	5	99	103	121	131	134	118		5	50	74	97	105	116	91	
	6	106	114	126	143	148	129		6	51	65	102	118	123	97	
	7	107	111	121	138	143	123		7	59	73	104	115	120	98	
4-6-78	4	52	57	73	81	84	71	28-9-80	4	29	38	47	53	56	45	
	5	69	80	115	133	142	112		5	41	58	75	93	96	75	
	6	104	111	134	148	164	133		6	52	58	84	96	104	81	
	7	100	109	125	140	144	123		7	58	63	81	93	101	80	
6-6-76	4							14-11-78	4	22	26	34	39	43	33	
	5								5	25	29	39	48	52	38	
	6			Vue tronquée						6	18	26	38	48	52	37
	7								7	24	28	32	41	44	34	
12-6-75	4	51	57	74	78	78	69	21-11-75	4	19	20	24	26	29	23	
	5	66	72	100	112	113	97		5	24	27	31	36	42	31	
	6	109	119	138	152	155	135		6	30	36	40	49	53	41	
	7	96	101	116	129	133	115		7	26	29	33	39	48	33	
11-7-76	4															
	5															
	6			Nuages												
	7															

ANNEXE 2 – RAPPORTS INTER-CANAUX – FEUILLUS

Date	7/5	7/6	7/4	6/5	5/4	$\frac{7-5}{7+5}$	$\frac{7-4}{7+4}$
16-1-79	0,94	0,88	0,79	1,06	0,84	-0,03	-0,12
7-3-76	1,22	0,76	1,12	1,61	0,92	0,10	0,06
12-4-76	1,41	0,89	1,46	1,59	1,04	0,17	0,19
13-5-79	2,32	1,07	2,25	2,16	0,97	0,40	0,38
4-6-78	3,93	1,12	3,44	3,50	0,88	0,59	0,55
6-6-76	4,81	1,09	3,48	4,43	0,72	0,66	0,55
12-6-75	3,58	1,03	2,74	3,46	0,76	0,56	0,46
11-7-76	3,33	1,02	2,73	3,26	0,82	0,54	0,46
28-7-78	4,00	1,02	2,56	3,92	0,64	0,60	0,44
18-8-81	3,32	1,28	3,32	2,59	1,00	0,54	0,54
4-9-81	2,77	1,29	2,67	2,15	0,96	0,47	0,45
16-9-79	4,24	1,31	4,00	3,23	0,94	0,62	0,60
28-9-80	2,75	1,25	2,75	2,20	1,00	0,47	0,47
14-11-78	1,75	1,40	1,47	1,25	0,84	0,27	0,19
21-11-75	1,36	0,88	1,25	1,55	0,92	0,15	0,11

RAPPORTS INTER-CANAUX – RÉSINEUX

Date	7/5	7/6	7/4	6/5	5/4	$\frac{7-5}{7+5}$	$\frac{7-4}{7+4}$
16-1-79	1,58	1,00	1,12	1,58	0,71	0,23	0,06
7-3-76	1,40	0,72	1,17	1,95	0,83	0,17	0,08
12-4-76	1,73	0,88	1,46	1,95	0,85	0,27	0,19
13-5-79	1,78	1,07	1,78	1,67	1,00	0,28	0,28
4-6-78	1,90	0,90	1,83	2,10	0,97	0,31	0,29
6-6-76	2,38	0,91	1,85	2,62	0,78	0,41	0,30
12-6-75	1,75	0,84	1,44	2,07	0,82	0,27	0,18
11-7-76	1,87	0,88	1,65	2,13	0,88	0,30	0,24
28-7-78	2,29	0,96	1,60	2,39	0,70	0,39	0,23
18-8-81	2,36	1,18	2,36	2,00	1,00	0,41	0,41
4-9-81	1,88	1,11	1,88	1,69	1,00	0,31	0,31
16-9-79	2,75	1,13	2,44	2,44	0,89	0,47	0,42
28-9-80	1,95	1,16	1,95	1,68	1,00	0,32	0,32
14-11-78	2,18	1,33	1,33	1,64	0,61	0,37	0,14
21-11-75	1,80	0,90	1,50	2,00	0,83	0,29	0,20

RAPPORTS INTER - CANAUX – PRAIRIE

Date	7/5	7/6	7/4	6/5	5/4	$\frac{7-5}{7+5}$	$\frac{7-4}{7+4}$
16-1-79	1,22	0,91	1,30	1,34	1,07	0,10	0,13
7-3-76	1,63	0,83	1,63	1,96	1,00	0,24	0,24
12-4-76	2,65	1,04	2,48	2,55	0,94	0,45	0,43
13-5-79	3,15	1,14	3,24	2,76	1,03	0,52	0,53
4-6-78	4,39	1,18	4,14	3,73	0,94	0,63	0,61
6-6-76	5,12	1,10	4,16	4,65	0,81	0,67	0,61
12-6-75	4,15	1,08	3,43	3,85	0,83	0,61	0,55
11-7-76							
28-7-78	3,00	0,99	2,49	3,02	0,83	0,50	0,43
18-8-81	4,32	1,30	4,17	3,32	0,97	0,62	0,61
4-9-81	3,53	1,36	3,53	2,59	1,00	0,56	0,56
16-9-79	3,72	1,24	4,04	3,00	1,09	0,58	0,60
28-9-80	3,44	1,23	3,58	2,80	1,04	0,55	0,56
14-11-78	2,82	1,09	2,09	2,59	0,74	0,48	0,35
21-11-75	2,43	0,97	2,27	2,50	0,93	0,42	0,39

RAPPORTS INTER - CANAUX – SOLS NUS

Date	7/5	7/6	7/4	6/5	5/4	$\frac{7-5}{7+5}$	$\frac{7-4}{7+4}$
16-1-79	0,81	0,79	0,81	1,04	1,00	-0,10	-0,10
7-3-76	1,15	0,77	1,42	1,49	1,24	0,07	0,17
12-4-76	1,07	0,79	1,43	1,36	1,33	0,03	0,18
13-5-79	0,99	0,91	1,56	1,09	1,58	0,01	0,22
4-6-78	1,13	0,89	1,75	1,28	1,54	0,06	0,27
6-6-76							
12-6-75							
11-7-76							
28-7-78	1,14	0,84	1,35	1,36	1,18	0,07	0,15
18-8-81	1,33	1,07	2,03	1,24	1,53	0,14	0,34
4-9-81	1,12	1,00	1,63	1,12	1,45	0,06	0,24
16-9-79	1,13	0,99	1,95	1,14	1,73	0,06	0,32
28-9-80	1,06	0,98	1,63	1,08	1,53	0,03	0,24
14-11-78	1,03	0,94	1,10	1,10	1,07	0,02	0,05
21-11-75	1,18	0,80	1,33	1,47	1,13	0,08	0,14

RAPPORTS INTER - CANAUX – DUNE SABLEUSE

Date	7/5	7/6	7/4	6/5	5/4	$\frac{7-5}{7+5}$	$\frac{7-4}{7+4}$
16-1-79	1,26	0,97	1,10	1,30	0,87	0,12	0,05
7-3-76	1,14	0,83	1,57	1,38	1,38	0,06	0,22
12-4-76	1,14	0,86	1,67	1,33	1,47	0,07	0,25
13-5-79	1,00	0,96	1,61	1,04	1,61	0	0,23
4-6-78	1,09	0,93	1,71	1,17	1,58	0,04	0,26
6-6-76							
12-6-75	1,16	0,84	1,57	1,38	1,35	0,07	0,22
11-7-76							
28-7-78	1,17	1,07	1,62	1,09	1,39	0,08	0,24
18-8-81	1,11	1,01	1,79	1,10	1,61	0,05	0,28
4-9-81	1,13	1,05	1,81	1,08	1,60	0,06	0,29
16-9-79	1,07	1,02	2,08	1,05	1,94	0,04	0,34
28-9-80	1,08	0,96	1,72	1,12	1,60	0,04	0,27
14-11-78	0,82	0,84	0,94	0,97	1,15	-0,10	-0,03
21-11-75	1,06	0,83	1,38	1,29	1,29	0,03	0,16

ANNEXE 3 – RAPPORTS INTER - THÈMES

Date	<u>7 Feuillus</u>	<u>6 Feuillus</u>	<u>5 Feuillus</u>	<u>7 Feuillus</u>	<u>6 Feuillus</u>	<u>5 Feuillus</u>
	7 Résineux	6 Résineux	5 Résineux	7 Prairie	6 Prairie	5 Prairie
16-1-79	0,79	0,89	1,33	0,38	0,40	0,50
7-3-76	1,00	0,95	1,15	0,64	0,70	0,85
12-4-76	1,08	1,07	1,32	0,50	0,58	0,94
13-5-79	1,50	1,49	1,15	0,67	0,71	0,91
4-6-78	2,00	1,61	0,97	0,76	0,79	0,85
6-6-76	2,02	1,69	1,00	0,76	0,77	0,81
12-6-75	1,90	1,55	0,93	0,68	0,71	0,79
11-7-76	1,61	1,38	0,90	—	—	—
28-7-78	1,56	1,46	0,89	0,76	0,74	0,57
18-8-81	1,40	1,30	1,00	0,60	0,61	0,79
4-9-81	1,47	1,27	1,00	0,64	0,68	0,81
16-9-79	1,64	1,41	1,06	0,78	0,74	0,68
28-9-80	1,49	1,38	1,05	0,64	0,63	0,80
14-11-78	1,17	1,11	1,45	0,58	0,45	0,94
21-11-75	0,83	0,85	1,10	0,44	0,49	0,79

ANNEXE 4 – APERÇU DES CONDITIONS CLIMATIQUES DE 1975 À 1981

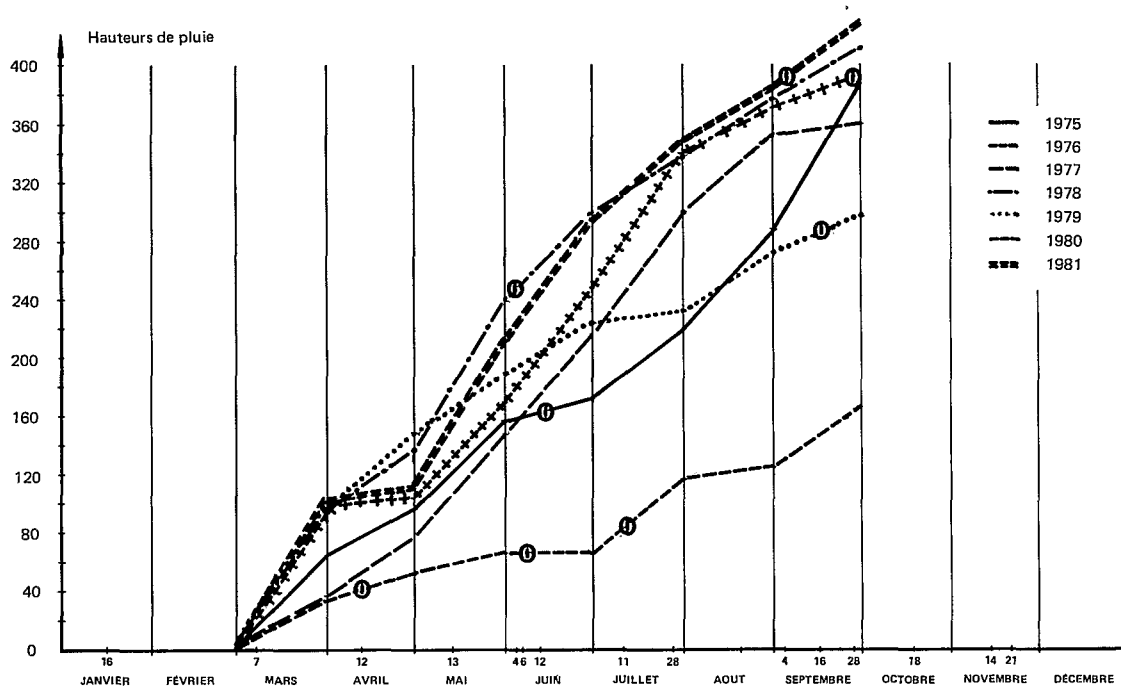


Figure 18 - Hauteurs de pluie cumulées (mars à octobre).

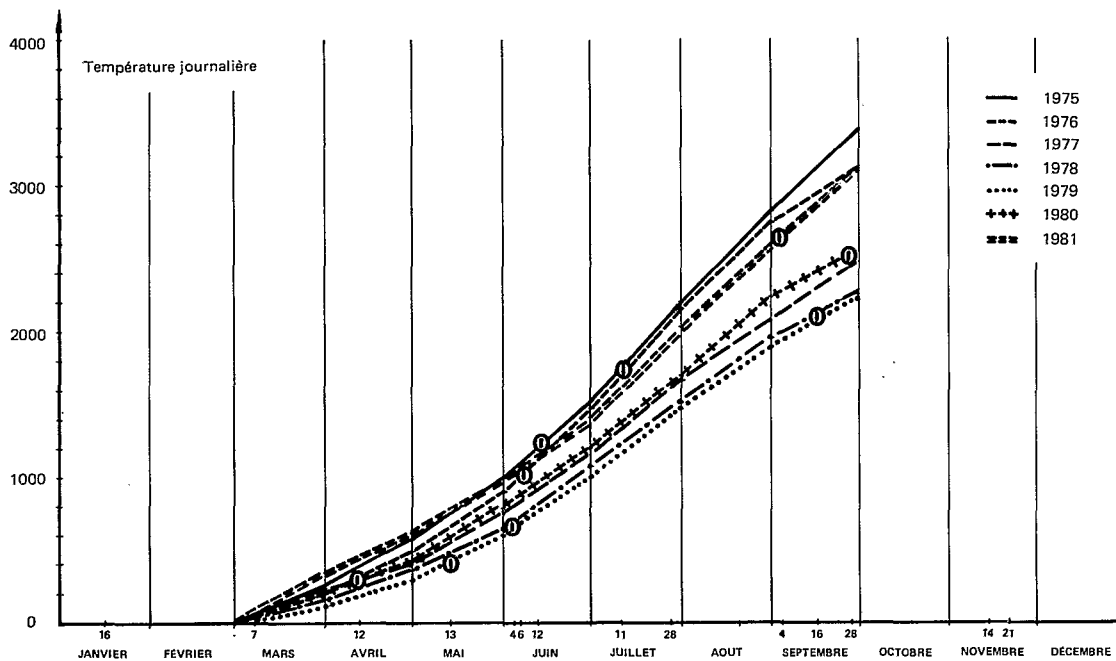


Figure 19 - Températures journalières cumulées (mars à octobre).

ANNEXE 5 – ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DE LA LUMINANCE PAR CANAL

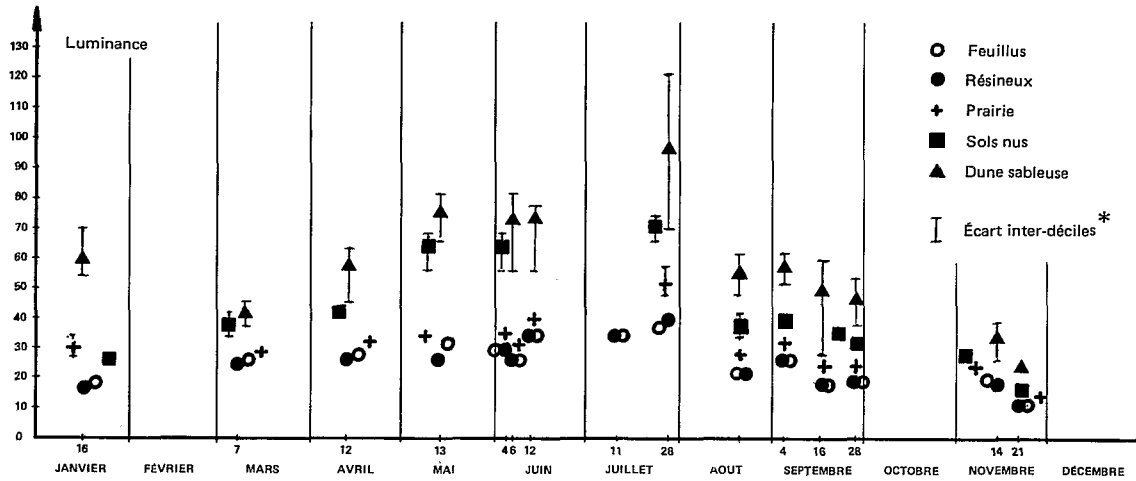


Figure 20 - Canal 4.

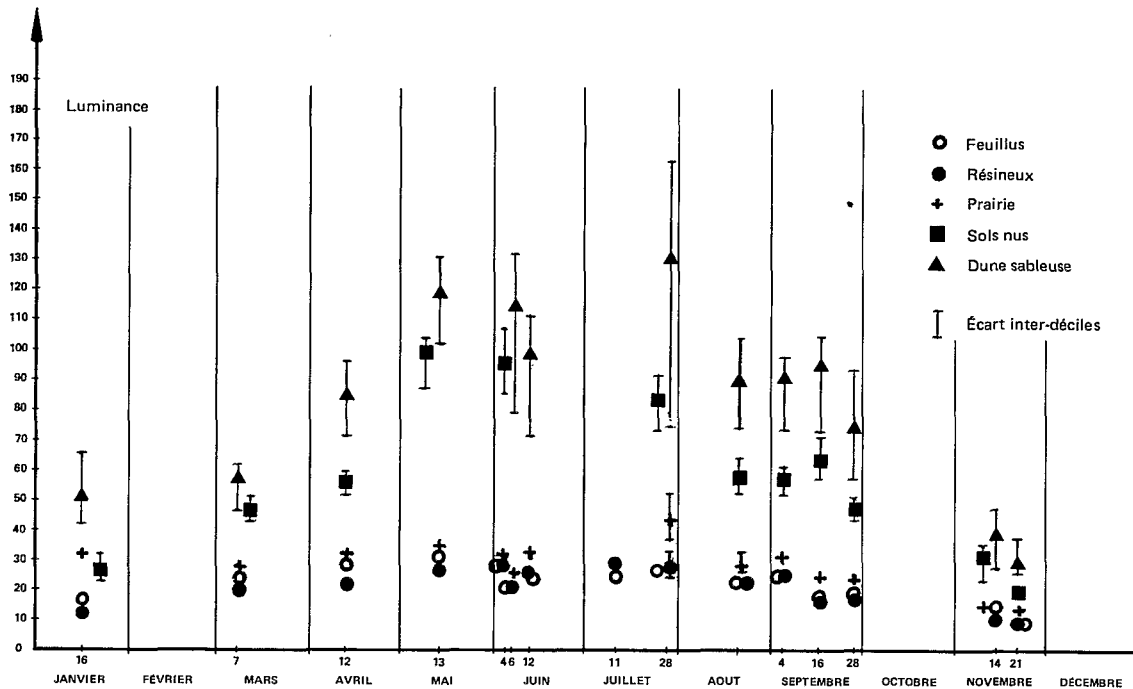


Figure 21 - Canal 5.

* Le segment représentatif de l'écart inter-déciles n'est pas représenté sur les figures lorsque sa longueur est du même ordre que le diamètre des signes typographiques utilisés pour la médiane.

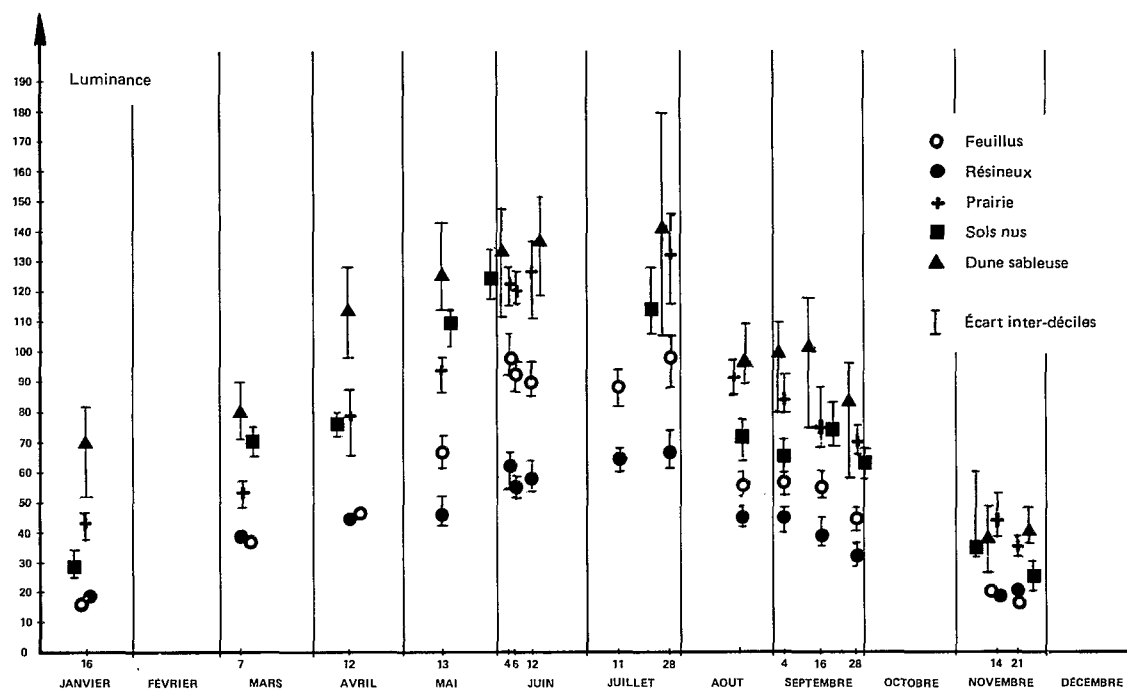


Figure 22 - Canal 6.

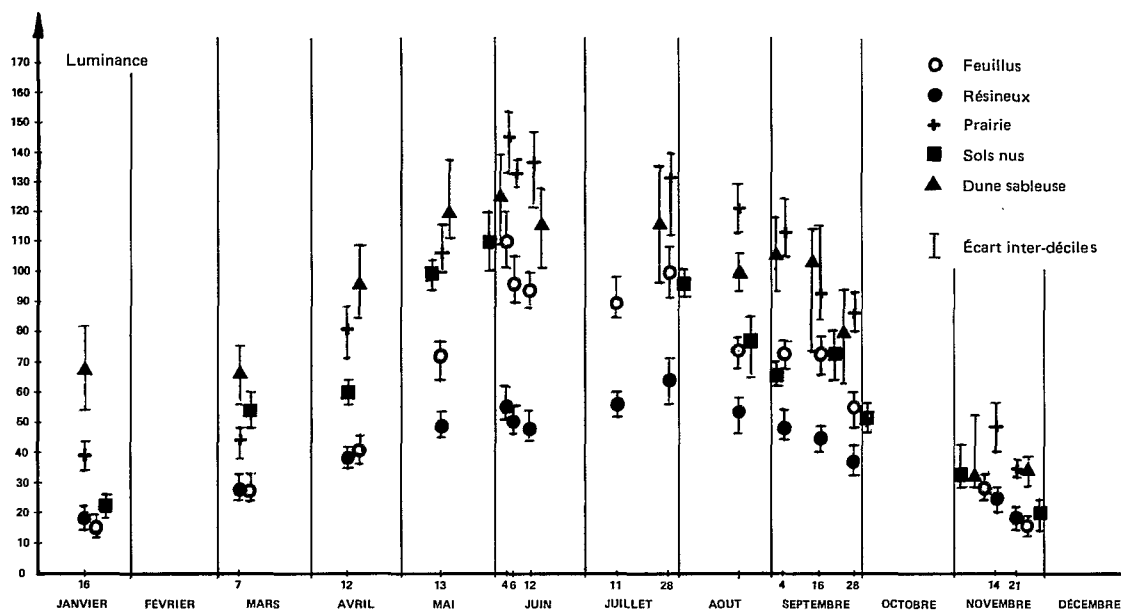


Figure 23 - Canal 7.

ANNEXE 6 – ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DE LA LUMINANCE PAR THÈME

Figure 24 - Forêt feuillue.

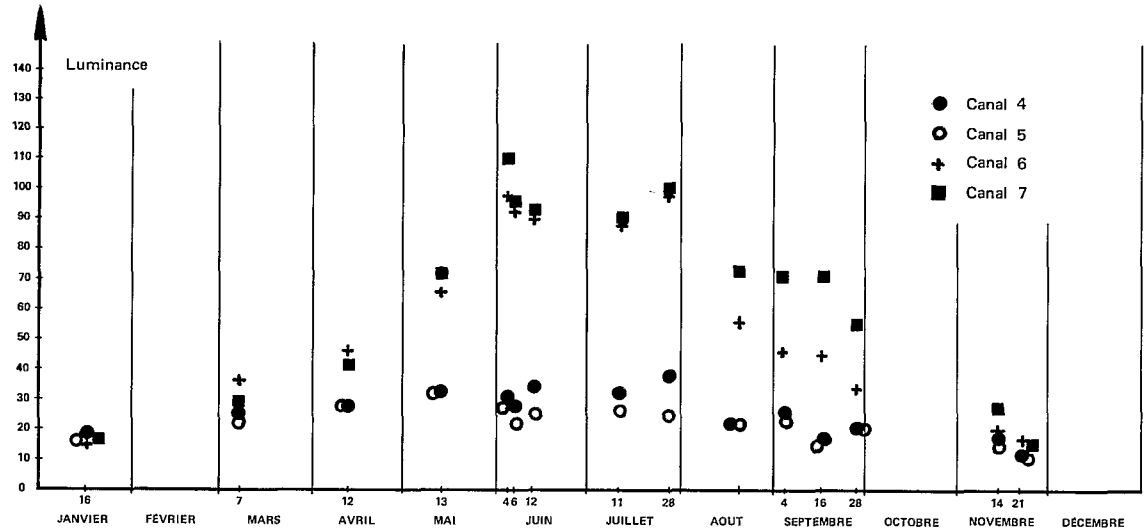


Figure 25 - Forêt résineuse.

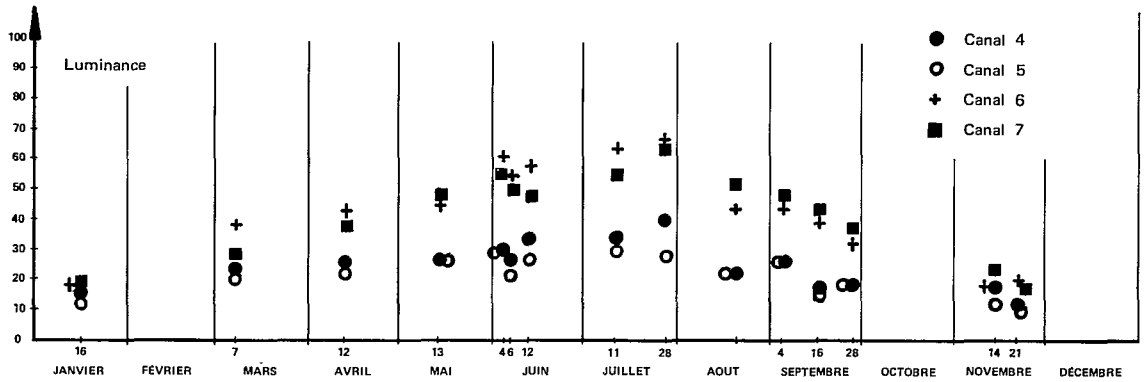
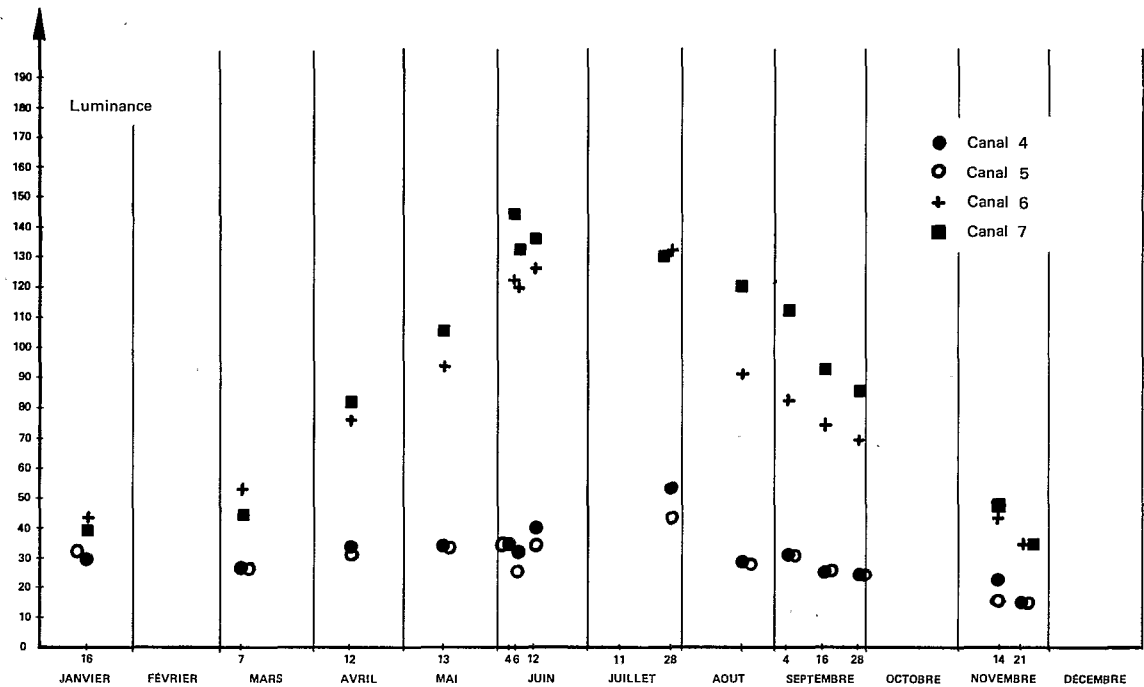


Figure 26 - Prairie.



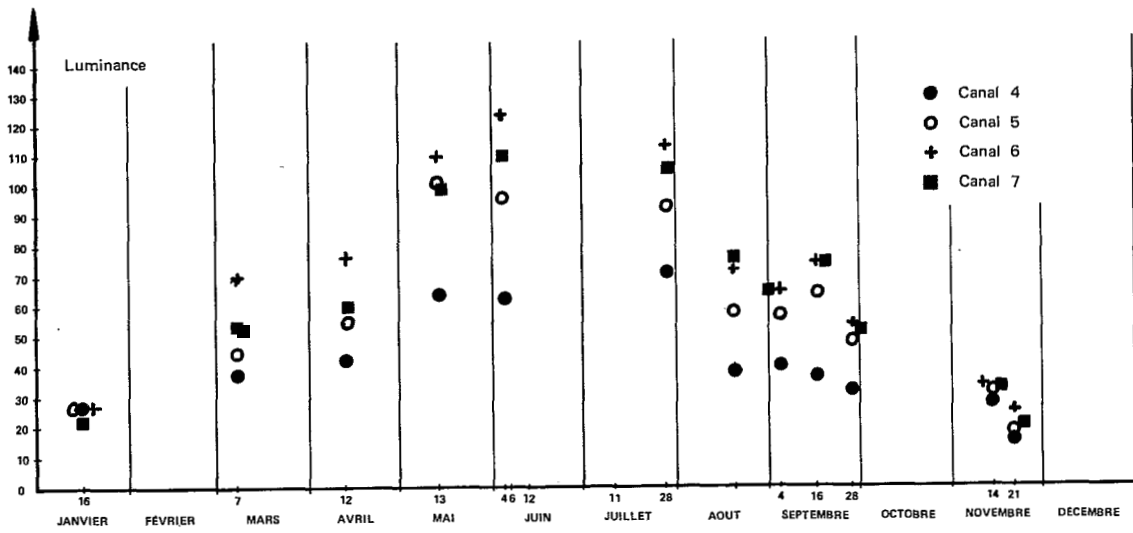


Figure 27 - Sols nus.

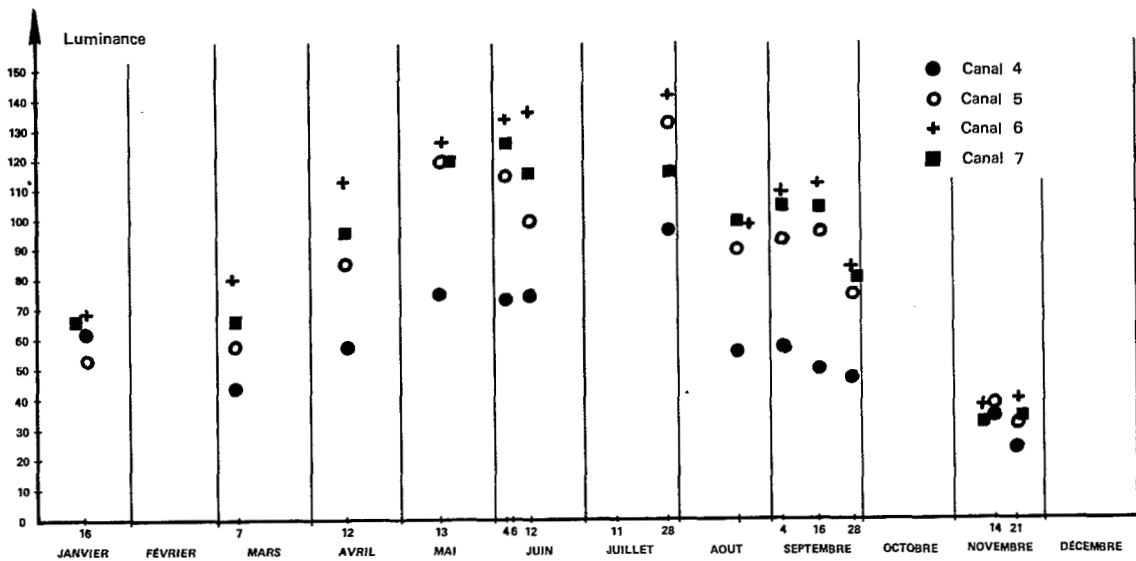


Figure 28 - Dune sableuse.

Achévé d'imprimer
sur les presses de COPÉDITH
Dépôt légal n° 5465

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 : 4^e trim. 1983
I.S.B.N. : 2-7099-0695-3

Évolutions saisonnières comparées des signatures spectrales de divers milieux
pérennes (forêts, prairie, sols nus) à partir de documents landsat.

I.D.T. TELEDETECTION 8

56