



HAL
open science

Analyse critique des possibilités de traitement des données numériques LANDSAT 1 s'appliquant à un enregistrement du 26 janvier 1973 du Bas-Languedoc (France)

Geneviève Debussche, Bernard Lacaze

► To cite this version:

Geneviève Debussche, Bernard Lacaze. Analyse critique des possibilités de traitement des données numériques LANDSAT 1 s'appliquant à un enregistrement du 26 janvier 1973 du Bas-Languedoc (France). [Rapport de recherche] Centre d'études phytosociologiques et écologiques (CEPE). 1976, 122 p. hal-02382076

HAL Id: hal-02382076

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02382076>

Submitted on 27 Nov 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Geneviève DEBUSSCHE et Bernard LACAZE
Département d'Écologie Générale - C.E.P.E. Louis EMBERGER
C.N.R.S. MONTPELLIER

ANALYSE CRITIQUE DES POSSIBILITÉS
DE TRAITEMENT DES DONNÉES NUMÉRIQUES
LANDSAT 1 S'APPLIQUANT
À UN ENREGISTREMENT DU 26 JANVIER 1973
DU BAS-LANGUEDOC (FRANCE)

Montpellier Janvier 1976

Document N° 82

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE D'ÉTUDES PHYTOSOCIOLOGIQUES ET ÉCOLOGIQUES Louis EMBERGER
B.P. 5051 - 34033 MONTPELLIER CEDEX. - Tél. 63 91 30

Ce travail a été réalisé en partie avec l'aide financière du Centre National d'Etudes Spatiales, dans le cadre de la Convention 75/CNES/221 passée entre le Centre National d'Etudes Spatiales et le Centre National de la Recherche Scientifique.

Résumé

Les auteurs décrivent et expérimentent la procédure "d'apprentissage dirigé" qui est l'une des méthodes d'analyse des données numériques issues des enregistrements du satellite LANDSAT 1.

Caractérisée par l'introduction dès le début du traitement de données terrain acquises sur des sites de référence, cette méthode offre l'intérêt d'entraîner une intervention fréquente des thématiciens pour valider les résultats intermédiaires et initialiser les phases suivantes de l'analyse des données de la télédétection spatiale des ressources terrestres.

Le processus de traitement-visualisation, choix des zones d'apprentissage ainsi que les problèmes techniques qui interviennent tout au long de la procédure sont décrits.

Une grande part du mémoire est consacrée à l'analyse des réponses spectrales des sites de référence qui sont considérés d'abord en tant qu'échantillons, puis regoupés en classes d'objets définis (classes thématiques). Après avoir testé la constance des réponses spectrales, les possibilités de discrimination des échantillons-et des classes thématiques les regroupant-sont étudiées dans le but de définir des algorithmes de classement. Pour cela on propose la comparaison des histogrammes et des courbes des réponses spectrales, et des diagrammes de dispersion des valeurs de luminance dans deux canaux, ou selon une combinaison donnée de canaux. Plusieurs méthodes de classement ont été ainsi expérimentées. Les résultats obtenus sont commentés, en particulier pour ce qui concerne la reconnaissance du couvert végétal.

Les pourcentages de reconnaissances-exactes des sites de référence, puis de zones distinctes connues, ont permis d'évaluer l'efficacité des algorithmes de classement proposés.

Les auteurs insistent alors sur le caractère provisoire des conclusions que l'on peut dégager de l'étude, qui sont fortement liées aux caractéristiques de la zone d'étude et à la date des enregistrements ; ils soulignent la nécessité de ne pas limiter de telles analyses à un seul enregistrement, en particulier pour l'étude des biogéocénoses.

Par ailleurs, les auteurs procèdent également à une évaluation de la nature et de l'importance des systèmes informatiques nécessaires pour résoudre les problèmes qui se posent selon les stratégies d'analyse proposées. Ils indiquent les conditions de l'amélioration des systèmes d'exploitation des données de la télédétection spatiale se présentant sous forme numérique.

TABLE DES MATIERES

	PAGES
1. INTRODUCTION	
2. PRESENTATION SOMMAIRE DE LA ZONE D'ETUDE	1
3. SOURCE ET DESCRIPTION DES DONNEES ORIGINALES	4
3.1. Caractéristiques sommaires des données numériques	5
3.2. Les données "images"	8
4. L'ANALYSE PAR APPRENTISSAGE A PARTIR DE SITES-TEST	8
4.1. Objet	8
4.2. La visualisation des données numériques	10
4.2.1. Le choix des niveaux de visualisation	10
4.2.1.1. Choix des bornes basé sur l'équirépartition des valeurs de luminance	11
4.2.1.2. Choix basé sur la hiérarchisation des niveaux	11
4.2.2. La visualisation simple à l'imprimante	13
4.2.3. La visualisation après augmentation de contraste	18
4.3. Choix des zones d'apprentissage	24
4.3.1. Problématique	24
4.3.2. Les documents de base	25
4.3.3. Le repérage des écotopes : procédure	27
4.3.4. Inventaire descriptif des écotopes	27
4.3.5. Le choix et les caractéristiques des classes thématiques	38
4.4. Techniques d'apprentissage	40
4.4.1. Description	40
4.4.2. Résultats de l'apprentissage par zones	41
4.4.3. Résultats de l'apprentissage par classes	48
4.4.3.1. Les histogrammes des fréquences absolues	48
4.4.3.2. Les courbes des réponses spectrales	57
4.4.3.2.1. Courbes de réponse spectrale moyenne des classes	64
4.4.3.2.2. Comparaison des réponses spectrales des sous-classes	66

4.4.3.3. Les diagrammes de dispersion	75
4.4.3.3.1. Rapport de deux canaux	76
4.4.3.3.2. Combinaisons canal/somme des canaux	77
4.4.3.3.3. Cosinus-directeurs	87
5. METHODES DE CLASSEMENT	87
5.1. Méthode des niveaux	90
5.1.1. Tests de reconnaissance par canal	91
5.1.2. Tests de reconnaissance utilisant des combinaisons de canaux	96
5.1.3. Tests de reconnaissance utilisant les 4 canaux	96
5.2. Méthodes utilisant moyennes et écarts-types	96
5.3. Méthodes basées sur l'analyse en composantes principales	103
5.4. Méthode basée sur l'hypothèse multigaussienne	108
5.5. Amélioration des programmes de classification	116
CONCLUSION	117
BIBLIOGRAPHIE	121

LISTE DES FIGURES

N° de figure	PAGES
1 Régions écologiques du territoire-test.	2
2 Localisation du territoire-test et découpage géographique (1,2,3,4) correspondant aux quatre bandes magnétiques.	3
3 Schéma de fonctionnement du balayage pour le système MSS du satellite LANDSAT-1.	7
4 Histogramme des valeurs de luminance du canal 5 (ensemble de la bande magnétique n° 3).	12
5 Typologie des niveaux. Diagramme indiquant la hiérarchisation des niveaux de luminance des 109 écotopes.	14
6 Visualisation en dix niveaux du canal 5 (une partie seulement du territoire-test). Le choix des bornes de visualisation est basé sur le principe de <i>l'équirépartition des valeurs de luminance</i> (d'après l'histogramme général).	16
7 Visualisation en dix niveaux du canal 5. Le choix des bornes est basé sur le principe de <i>l'équirépartition des valeurs de luminance</i> d'après l'histogramme <i>limité aux valeurs de la zone-test, s.s.</i>	17
8 Visualisation en dix niveaux, du canal 5. Le choix des bornes est basé sur le principe de <i>la hiérarchisation des niveaux de luminance.</i>	19
9 Histogramme des valeurs de luminance selon une combinaison de canaux : 4+5+6+7 de la bande magnétique n° 3.	20
10 Visualisation en dix niveaux de la combinaison des canaux 4+5+6+7.	21
11 Histogramme des valeurs de luminance selon une combinaison de canaux : $\frac{5 - 7}{5 + 7}$ de la bande magnétique n° 3.	22
12 Visualisation en 10 niveaux de la combinaison de canaux $\frac{5 - 7}{5 + 7}$.	23
13 Extrait de la carte des formations végétales combustibles (L. TRABAUD <u>et al.</u> , 1973).	28
14 Visualisation en dix niveaux (canal 5) de la région de Grabels et Nord-Ouest de Montpellier.	29
14 bis Exemple de localisation de quelques écotopes. (<i>Calque superposé à la figure 14</i>).	29

N° de figure	PAGES
15	Caractérisation de la formation végétale . 30
16	Extrait de la légende de la carte des formations végétales combustibles de L. TRABAUD, 1973. Sigles des espèces dominantes. 31
17	Agrandissement au 1/250 000 de l'image du canal 5 correspondant au territoire-test. 34
18	Agrandissement au 1/250 000 de l'image du canal 7 correspondant au territoire-test. 35
19	Localisation des écotopes (échelle au 1/250 000) <i>Calque mobile.</i>
20	Liste des écotopes du Bas-Languedoc. 36
21	Sigles utilisés pour la description géologique des écotopes du Bas-Languedoc. 37
22 à 30	Exemples de résultats statistiques de l'apprentissage (écotope n° 7). 42 à 46
31	Comparaison des moyennes des distributions des niveaux de luminance des 109 écotopes de référence. 47
32	Exemple d'histogrammes des valeurs de luminance dans les canaux 5 et 7 de quelques écotopes. 49
33	Mise en évidence de l'influence des zones d'ombre dans la réponse spectrale d'un écotope. 50
34	Histogramme des valeurs de luminance dans les 4 canaux. Zones aquatiques : classe 1. 52
35	Histogramme des valeurs de luminance dans les 4 canaux. Zones urbaines : classe 2. 53
36	Histogramme des valeurs de luminance dans les 4 canaux. Zones de roche affleurante : classe 3. 54
37	Histogramme des valeurs de luminance dans les 4 canaux. Zones de sol nu (vignes en hiver) : classe 4. 55
38	Histogramme des valeurs de luminance dans les 4 canaux. Zones de végétation : classe 5. 56
39	Comparaison des courbes des réponses spectrales obtenues à partir des moyennes, modes et médianes des 5 classes d'écotopes. 58
40	Comparaison des courbes des réponses spectrales obtenues à partir des moyennes, modes et médianes des sous-classes d'écotopes. Zones aquatiques, classes 1. 59

N° de figure	PAGES
41	Comparaison des courbes des réponses spectrales obtenues à partir des moyennes, modes et médianes des sous-classes d'écotopes. Zones urbaines, classe 2. 60
42	Comparaison des courbes des réponses spectrales obtenues à partir des moyennes, modes et médianes des sous-classes d'écotopes. Zones de végétation, classe 5. 61
43	Comparaison des courbes des réponses spectrales obtenues à partir des moyennes, modes et médianes des sous-classes d'écotopes. Zones de végétation, classe 5. 62
44	Comparaison des courbes des réponses spectrales obtenues à partir des moyennes, modes et médianes des sous-classes d'écotopes. Zones de végétation, classe 5. 63
45	Valeurs moyennes des réponses spectrales des 5 classes d'écotopes. 65
46	Valeurs moyennes des réponses spectrales des sous-classes d'écotopes. Classe 1 : zones aquatiques. 68
47	Valeurs moyennes des réponses spectrales des sous-classes d'écotopes. Classe 2 : zones urbaines. 69
48	Valeurs moyennes des réponses spectrales des écotopes. Classe 3 : zones de roche affleurante. 70
49	Valeurs moyennes des réponses spectrales des écotopes. Classe 4 : zones de sol nu. 71
50	Valeurs moyennes des réponses spectrales des sous-classes d'écotopes. Classe 5 : zones de végétation. 72
51	Valeurs moyennes des réponses spectrales des sous-classes d'écotopes. Formations végétales. 73
52	Valeurs moyennes des réponses spectrales de 8 écotopes de Chêne vert (avec indication de l'indice de biovolume). 74
53	Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes. (comparaison Canal/Canal). 79
54	Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes. (comparaison Canal/Canal). 80
55	Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes. Comparaison : valeur de luminance dans un canal par rapport à la somme des valeurs dans les 4 canaux. 81
56	Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes. Comparaison des rapports : valeur de luminance dans un canal/la somme des valeurs dans les 4 canaux. 82

N° de figure	PAGES
57	Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes. Comparaison des rapports : valeur de luminance dans un canal/ la somme des valeurs dans les 4 canaux. 83
58	Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes. Comparaison : valeur de luminance dans un canal/racine carrée de la somme des carrés des valeurs dans les 4 canaux. 84
59	Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes. Comparaison des rapports : valeur de luminance dans un canal/racine carrée de la somme des carrés des valeurs dans les 4 canaux. 85
60	Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes. Comparaison : valeur de luminance dans un canal/racine carrée de la somme des carrés des valeurs dans les 4 canaux. 86
61	Dispersion des réponses spectrales des 5 classes d'écotopes. 88
62	Dispersion des réponses spectrales des 5 classes d'écotopes. 89
63	Classification par les niveaux moyens (canal 5). 92
64	Classification par les niveaux moyens (canal 6). 93
65	Pourcentage de reconnaissance des écotopes. Résultats de la classification par les niveaux moyens (exemple du canal 5). 94
66	Pourcentage de reconnaissance des écotopes. Résultats de la classification par les niveaux moyens (exemple du canal 6). 95
67	Valeurs moyennes des réponses spectrales des sous-classes d'écotopes. 97
68	Diagramme de dispersion des réponses spectrales des écotopes. Comparaison des combinaisons de canaux : canal 6 - canal 5 et canal 4 - canal 5. 98
69	Fragment de la classification hiérarchique descendante basée sur la comparaison des combinaisons de canaux. [Canal 4 - Canal 5] = Y et [Canal 6 - Canal 5] = X. 99
70	Pourcentage de reconnaissance des écotopes. Résultats de la classification descendante hiérarchique basée sur la comparaison des combinaisons de canaux [Canal 4 - Canal 5] et [Canal 6 - Canal 5]. 100

N° de figure		PAGES
71	Classification d'après la combinaison de canaux 4 - 5 / 6 - 5.	101
72	Résultats de classification (méthode des niveaux).	102
73	Résultats de classification (méthode utilisant une distance euclidienne).	104
74	Diagramme résultant de l'analyse en composantes prin- cipales des 109 écotopes.	105
75	Résultats de classification. Méthode basée sur l'ana- lyse en composantes principales (exemple 1).	106
76	Résultats de la classification basée sur l'analyse en composantes principales (exemple 2).	107
77	Exemple de résultat pour un écotope.	109
78	Matrice de confusion résultats de la méthode de clas- sification basée sur l'analyse en composantes principales.	110
79	Résultats obtenus par la méthode de classification basée sur l'hypothèse multigaussienne.	111
80	Résultat de classification. Méthode basée sur l'analyse en composantes principales, avec référence au dernier point classé.	113
81	Classification basée sur l'analyse en composantes prin- cipales, par zones de 4 éléments (non recouvrement des zones).	114
82	Classification basée sur l'analyse en composantes prin- cipales, par zones de 4 éléments (recouvrement des zones).	115

1. INTRODUCTION

Plusieurs méthodes d'analyse des données numériques issues des enregistrements du satellite LANDSAT-1 (données du système multispectral à balayage) ont été expérimentées au C.E.P.E. - Louis.Emberger.

Différentes techniques de traitement ont été testées sur les enregistrements du 26 janvier 1973 relatifs au Languedoc-Roussillon (référence NASA E.1 E1187 - 10025), concernant le territoire allant, du sud au nord, des étangs côtiers de Vic, Thau et Mauguio, jusqu'aux premiers contreforts des Cévennes (collines de Ganges), soit une superficie de 300 000 hectares environ (*figure 1*).

Si ce territoire ne représente qu'une assez faible partie de la zone couverte par l'enregistrement (*figures 1 et 2*), il a été choisi comme *zone-test* pour les raisons suivantes :

- proximité du lieu de travail, et facilité d'accès pour tous les travaux de vérification ou d'enquête sur le terrain ;
- existence de photographies aériennes et de documents cartographiques nombreux ;
- présence d'un grand nombre de formes de végétation propice au choix de *sites-test* diversifiés.

Il était nécessaire de commencer les analyses des données numériques sur un territoire restreint pour tester la validité des méthodes de classification et, ensuite, envisager la généralisation des observations sur l'ensemble de la zone couverte par l'enregistrement.

Nous nous proposons ici, d'exposer la procédure "*d'apprentissage dirigé*" mise en oeuvre sur le territoire décrit précédemment.

A la différence des méthodes "*d'apprentissage non-dirigé*" réalisées à partir des seules données multispectrales, sans introduction de

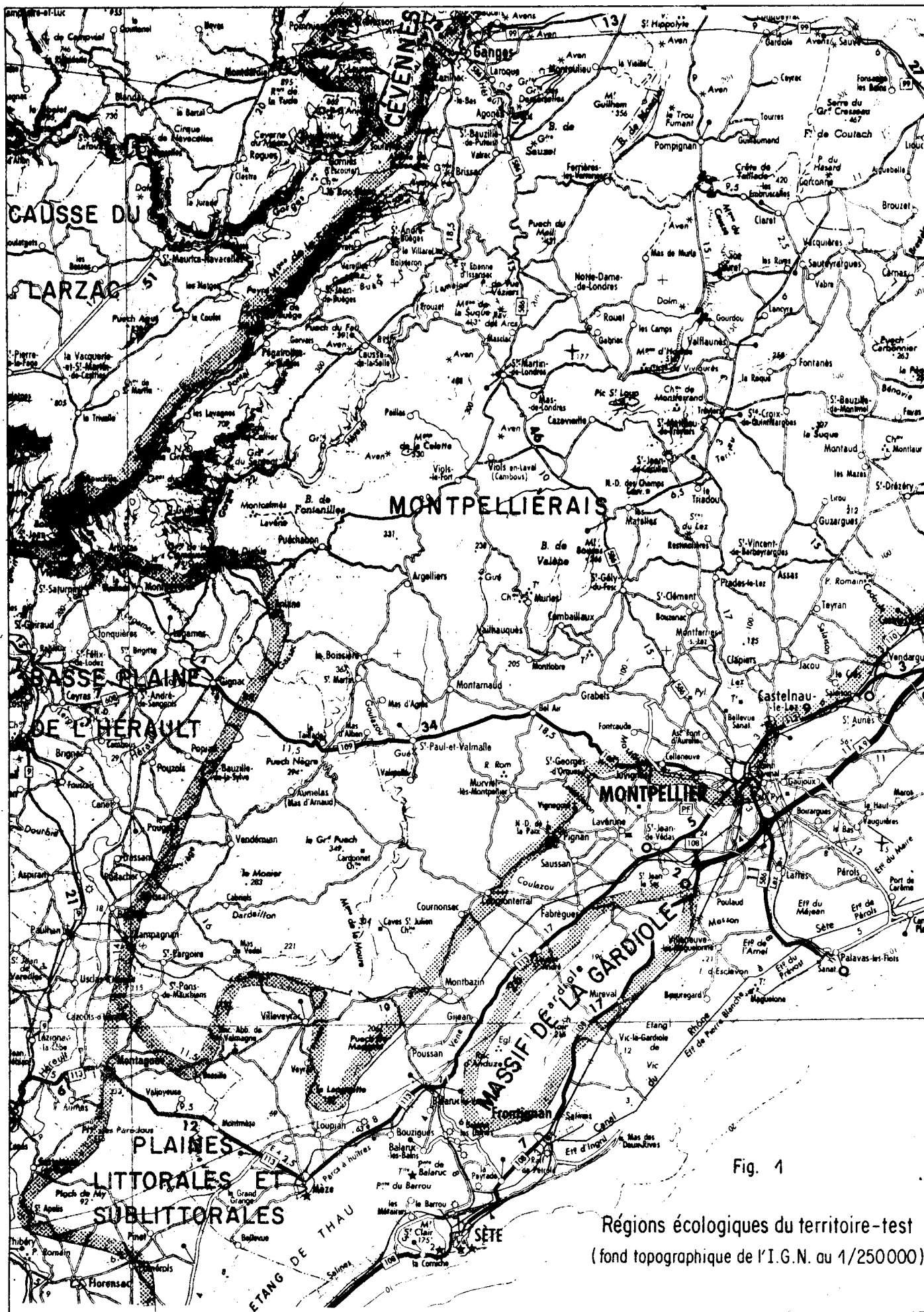


Fig. 1

Régions écologiques du territoire-test
(fond topographique de l'I.G.N. au 1/250000)

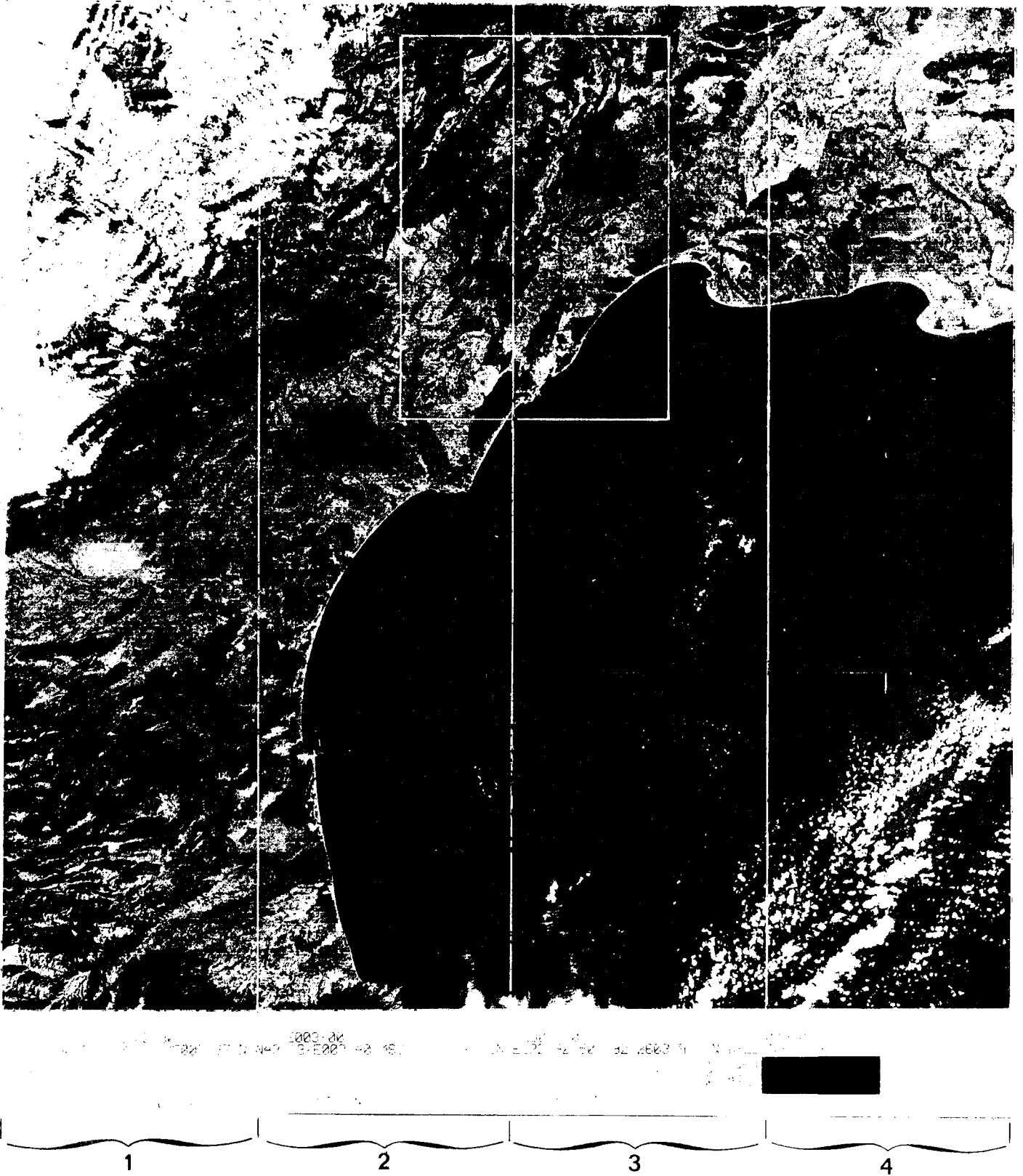


Figure 2

Localisation du territoire-test et découpage géographique (1,2,3,4)

correspondant aux quatre bandes magnétiques

(données du 26 Janvier 1973 : référence NASA : E 1187 - 10025).

données-terrain, cette méthode nécessite l'introduction dès le début du traitement, d'informations acquises sur des sites de référence dont les caractéristiques, écologiques ou autres, sont connues.

Faisant appel à de fréquentes interventions des thématiciens pour contrôler les résultats, à des confrontations avec les données "images" issues de la visualisation sur film des enregistrements, le processus de traitement comporte plusieurs phases essentielles, qui sont décrites selon leur ordre chronologique de déroulement :

- la visualisation des données
- le choix des sites d'apprentissage
- l'analyse des réponses spectrales
- la récolte des paramètres statistiques
- la classification des données

2. PRESENTATION SOMMAIRE DE LA ZONE D'ETUDE

Du Golfe du Lion aux contreforts des Cévennes se rencontrent (*figure 1*) :

- un cordon dunaire reliant les collines de Sète et de Maguelone ;
- les étangs côtiers de Thau, de Vic et de Mauguio ;
- une série de plaines alluviales ou colluviales, et de côteaux, essentiellement occupés par de la vigne, dont l'altitude croissante du sud au nord varie entre 10 et 200 mètres ;
- un ensemble de collines calcaires où domine le Chêne vert (à l'ouest du territoire : Argelliers, Combaillaux), de buttes gréso-marneuses occupées par du Pin d'Alep et du Chêne kermès (à l'est du territoire : Guzargues, St Clément), d'affleurements de conglomérats et de brèches, où domine le Chêne blanc (au centre du territoire : St Martin de Londres), et dont l'altitude varie entre 100 et 400 mètres ;
- une barrière montagneuse calcaire (la montagne de la Séranne) de 950 m d'altitude à l'ouest du territoire où le Chêne vert abonde en versant sud, et à l'est du

territoire, les contreforts des Cévennes schisteuses caractérisés par le Châtaignier.

Le territoire considéré se rattache donc à deux *ensembles physiographiques* :

- l'ensemble des collines et moyennes montagnes de l'Hérault et du Gard
- l'ensemble des plaines du Languedoc méditerranéen et du Roussillon

Ceux-ci englobent plusieurs *régions écologiques* (figure 1) :

- la région écologique du Montpelliérais : massif de la Gardiole et zone des garrigues
- les régions écologiques des plaines littorales et sublittorales de l'Hérault et du Gard et de la basse plaine de l'Hérault

La région écologique la plus importante en superficie dans le territoire d'étude est celle du Montpelliérais : cette région de garrigues est d'une grande complexité écologique sous une apparente uniformité de terrain, de nature de roches-mères et de sols, de formations végétales ; l'aspect toujours vert et buissonnant de ces dernières masque en fait, une structure et une composition floristique très complexes qui sont en grande partie la conséquence, comme le souligne R. DUGRAND (1964), des multiples oscillations de l'appropriation des terres dans cette zone.

3. SOURCE ET DESCRIPTION DES DONNEES ORIGINALES

3.1. Caractéristiques sommaires des données numériques

Les données sont issues du système à balayage multispectral ("*MSS*" : *multispectral scanner*) qui analyse la surface terrestre suivant des lignes perpendiculaires à l'orbite décrite par le satellite.

Le balayage se fait par oscillation dans le sens ouest-est simultanément suivant 6 lignes qui correspondent à 6 détecteurs (*figure 3*).

Chaque enregistrement (ou "image"), correspond à un losange de 185 km de côté ; il compte 2340 lignes de balayage qui comprennent chacune 3240 éléments de résolution, répartis en 4 bandes magnétiques (9 pistes, 800 caractères par pouce), livrées par le Centre E.R.O.S., Sioux Falls, Etats-Unis.

Le découpage géographique des données des 4 bandes magnétiques du 26 janvier 1973 est indiqué sur la *figure 2*.

La largeur au sol de chaque bande élémentaire est d'environ 79 mètres et une unité élémentaire de résolution correspond à une surface d'environ 0,5 hectare (79 m x 57 m).

Lors de l'enregistrement, chaque unité élémentaire de résolution est caractérisée par une série de valeurs numériques indicatrices de la luminance énergétique dans les quatre bandes spectrales suivantes :

Canal 4 : 500- 600 nanomètres
Canal 5 : 600- 700 nanomètres
Canal 6 : 700- 800 nanomètres
Canal 7 : 800-1100 nanomètres

Il faut signaler que la discrétisation du signal enregistré s'effectue sur une gamme de 128 niveaux d'intensité pour les canaux 4, 5 et 6 et de 64 niveaux pour le canal 7.

Les données disponibles sur bandes magnétiques sont exploitables, soit directement par calcul numérique, soit sous forme d'images lorsqu'elles sont visualisées sur film photographique.

Ce sont ces deux types de données qui ont été utilisés dans cette étude, car celles issues des 3 premiers canaux affectés au système RBV (*Return Beam Vidicon*) ont fait défaut.

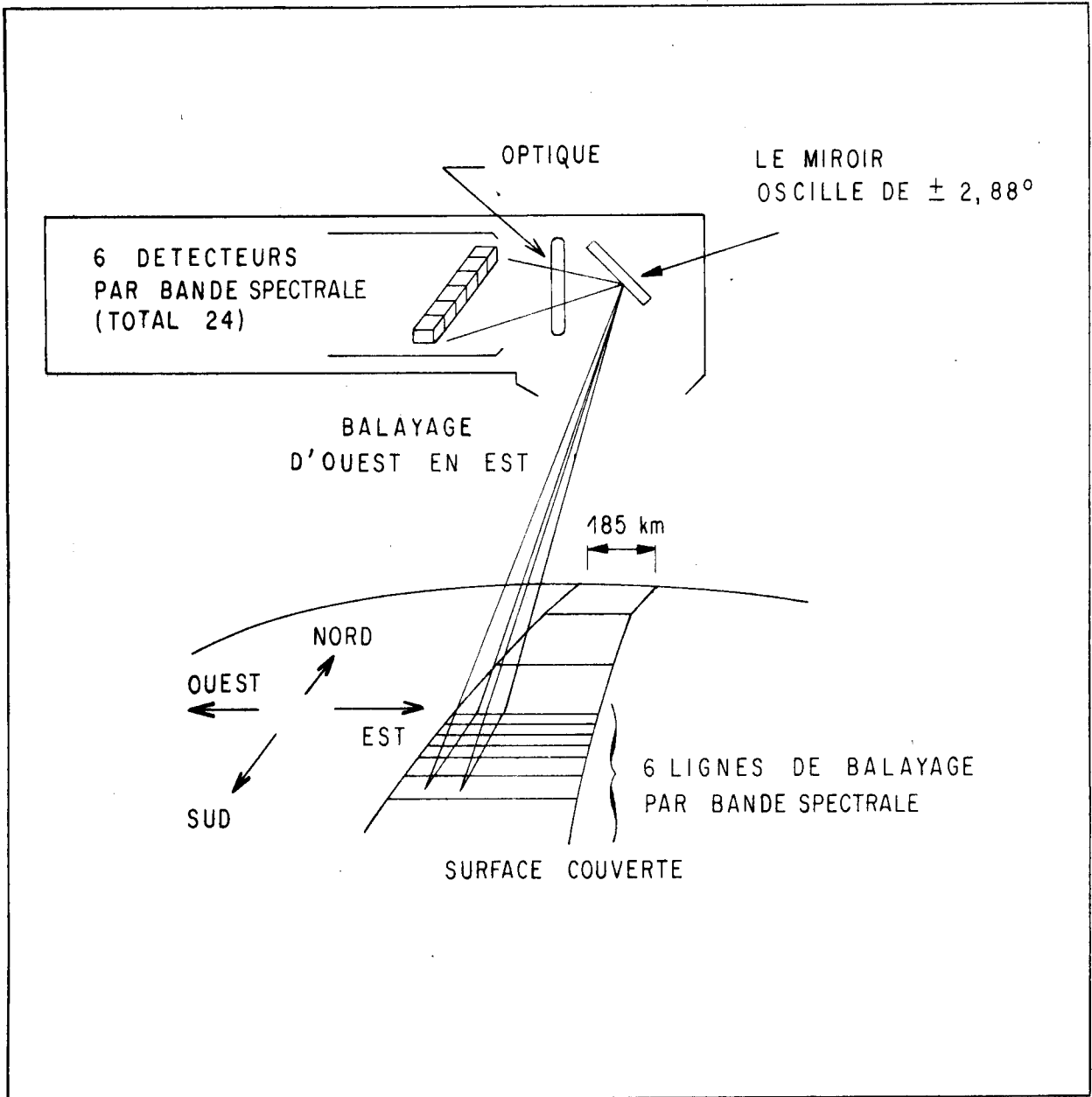


Fig. 3

Schéma de fonctionnement du balayage pour le système M.S.S. du satellite LANDSAT_1; d'après NASA, 1972.

3.2. Les données "images"

Celles-ci résultent de la visualisation sur film des enregistrements électromagnétiques.

Les documents originaux utilisés sont des négatifs et des positifs transparents sur film 70 mm : le format réel de l'image est de 55 mm x 55 mm. L'échelle de ces films, livrés par le centre E.R.O.S., est le 1/3 369 000.

Pour la même surface géographique couverte par les enregistrements, et à un instant donné, on possède 4 images qui correspondent aux 4 canaux du système MSS (cf. ci-dessus).

A partir des films négatifs on peut obtenir des agrandissements sur papier pouvant aller jusqu'au 1/200 000, sans détérioration trop grave de la qualité.

A partir des films négatifs et des films positifs, on peut réaliser, par superposition des images des 4 canaux et par intercalation de filtres colorés (système du visionneur I2S), des compositions colorées qui combinent l'ensemble des informations élémentaires figurant sur les documents initiaux.

Les agrandissements noir et blanc sur papier servent de support de repérage des unités lors de la localisation des sites-test d'apprentissage : les compositions colorées peuvent guider l'étude de certains thèmes par voie numérique.

4. L'ANALYSE PAR APPRENTISSAGE A PARTIR DE SITES-TEST

4.1. Objet

Compte tenu des données-terrain disponibles, nous avons décidé d'utiliser des méthodes d'analyse des données numériques basées sur un *apprentissage* à partir de sites-test.

En chaque site-test, nous considérons la portion de l'espace définie par une même combinaison d'éléments biotiques et d'éléments physiques. Une telle unité de milieu, localisée, que nous pouvons appeler *écotope* (TROLL, 1939 et 1966 ; SCHMITHÛSEN, 1948) est donc caractérisée par un certain degré d'homogénéité globale de la végétation et des caractères topographiques et géomorphologiques.

Nous nous proposons alors de préciser le degré d'homogénéité de chaque écotope, en considérant la constance du niveau de luminance des éléments de l'écotope, constitués par les unités élémentaires de résolution du système d'analyse multispectrale. La récurrence d'écotopes de définition identique dans le territoire considéré permet ensuite de tester la validité des réponses spectrales locales.

L'apprentissage (*apprentissage par zones*) consiste à caractériser chaque écotope par :

- l'histogramme des valeurs de luminance dans les quatre canaux
- un certain nombre de paramètres statistiques relatifs à l'ensemble des unités élémentaires de résolution qui composent l'écotope.

Une fois l'homogénéité testée, les écotopes sont alors regroupés en classes suivant plusieurs techniques :

- *le classement dirigé* : - un certain nombre de classes d'écotopes sont définies *a priori* d'après la taxonomie en vigueur pour une étude thématique donnée ; le nombre de classes étant fonction du niveau de précision que l'on souhaite porter à l'analyse. Une fois ces classes définies, l'analyse statistique est réalisée sur l'ensemble des unités élémentaires de résolution de tous les écotopes appartenant à la même classe (*apprentissage par classes*). On se sert des paramètres obtenus pour déterminer les critères de différenciation et de séparabilité des classes d'écotopes retenues.
- *le classement non-dirigé* : - une fois les écotopes définis, seules les informations multispectrales interviennent dans le processus de détermination des classes qui peut s'effectuer selon plusieurs méthodes d'ordination ou de hiérarchisation.

Les données de base de ces méthodes sont les paramètres statistiques bruts et les niveaux de luminance observés dans chaque écotope obtenus par un *apprentissage par zones*.

L'ensemble du processus d'apprentissage doit donc permettre la caractérisation spectrale des classes d'écotopes à discriminer.

L'étape suivante est celle du classement proprement dit ; la validité des algorithmes de classement est testée d'une part par le pourcentage de reconnaissance exacte des écotopes de référence, d'autre part par celui correspondant à d'autres zones-test connues, pour aboutir à la généralisation à l'ensemble d'une zone d'étude et d'un enregistrement.

Il faut donc noter qu'en définitive le succès de la généralisation de la classification repose sur la définition adéquate d'un ensemble d'écotopes d'apprentissage (échantillon de base), et d'un ensemble d'écotopes-test (échantillon test).

4.2. La visualisation des données numériques

Nous ne parlerons ici que de la visualisation des niveaux de luminance sur imprimante d'ordinateur. Bien qu'elle ne représente qu'une phase intermédiaire du traitement des données, elle constitue en fait le support du repérage et du choix des sites-test.

4.2.1. Le choix des niveaux de visualisation

Pour visualiser les données d'un canal, il est nécessaire d'établir au préalable un histogramme des valeurs d'intensité (valeurs de luminance) dans le canal choisi.

Cet histogramme montre que parmi les niveaux théoriquement possibles (128 ou 64 suivant les cas), seulement une quarantaine sont généralement représentés avec une fréquence significative.

Toutefois, il est nécessaire de regrouper ces niveaux de luminance en classes (10 à 15), afin que l'oeil humain puisse percevoir nettement les niveaux de gris correspondants sur la visualisation.

Le choix des bornes des classes de luminance peut s'effectuer selon plusieurs techniques, dont nous donnons deux exemples ci-dessous.

4.2.1.1. Choix des bornes basé sur l'équirépartition des valeurs de luminance

Le programme de calcul utilisé ici (programme HISTO 2 ; DERINK et LACAZE, 1976) analyse systématiquement la zone étudiée avec un pas variable choisi au préalable (1 élément de résolution sur 2, une ligne sur 10 par exemple). Il fournit l'histogramme des fréquences absolues, ainsi que les valeurs des bornes de visualisation, calculées de telle façon que pour les 10 classes d'intensité retenues, les fréquences des niveaux de luminance soient égales. (principe d'équirépartition).

L'exemple présenté sur la *figure 4* correspond à l'histogramme des données de la bande magnétique n° 3 dont la localisation est représentée sur la *figure 2*. Le pas d'analyse est de 1 point sur 10 et 1 ligne sur 20 : l'expérience montre qu'un tel échantillon ($1/200^{\text{ème}}$ des points) est suffisant pour caractériser la dispersion des valeurs de luminance. Les bornes des 10 classes de luminance indiquées sur cet exemple ont été utilisées pour réaliser la visualisation présentée à la *figure 6*.

Cette méthode permet de garantir un minimum de contraste sur la visualisation et s'avère en pratique satisfaisante : c'est pourquoi son utilisation peut être envisagée de façon systématique.

4.2.1.2. Choix basé sur la hiérarchisation des niveaux

Sachant que des niveaux d'énergie voisins fournissent une information très proche, il est possible d'en réduire le nombre en les regroupant en fonction de leur proximité, et en utilisant le critère de l'information mutuelle ou celui de la distance du χ^2 . Le programme utilisé (programme JAMBU/BAOBAB : DERINK et LACAZE, 1976 d'après BENZECRI, 1973) permet de construire une classification ascendante hiérarchique des niveaux de luminance, visualisée sur un diagramme arborescent. Contrairement à la méthode précédente, celle-ci est basée sur l'analyse

ZONE TRAITEE 10 2300 20 10 800 10

BORNES 6 8 9 10 11 12 13 14 15 16 128 Canal 5

8720. VALEURS ACQUISES IH REPRESENTE 28

- 6	2	I	
- 7	16	I	
- 8	338	I	
- 9	2332	I	
- 10	5377	I	
- 11	6115	I	
- 12	6251	I	
- 13	6514	I	
- 14	6836	I	
- 15	7242	I	
- 16	7704	I	
- 17	8088	I	
- 18	8238	I	
- 19	8317	I	
- 20	8320	I	
- 21	8475	I	
- 22	8558	I	
- 23	8610	I	
- 24	8625	I	
- 25	8631	I	
- 26	8631	I	
- 27	8643	I	
- 28	8656	I	
- 29	8661	I	
- 30	8661	I	
- 31	8661	I	
- 32	8662	I	
- 33	8662	I	
- 34	8666	I	
- 35	8668	I	
- 36	8668	I	
- 37	8668	I	
- 38	8670	I	
- 39	8670	I	
- 40	8675	I	
- 41	8675	I	
- 42	8676	I	
- 43	8678	I	
- 44	8678	I	

Figure 4

Histogramme des valeurs de luminance du canal 5
(ensemble de la bande magnétique n° 3, cf. figure 2).

préalable d'un certain nombre de zones-échantillon. Une matrice de correspondances est alors constituée, à partir des zones-échantillon et des fréquences des niveaux de luminance qui les caractérisent. Les zones étant de superficies variées, on fait intervenir un élément de pondération pour contrôler cette inégalité.

La recherche des niveaux ou des groupes de niveaux qui apportent la même information est alors réalisée ; les ressemblances sont visualisées sous la forme d'un diagramme arborescent qu'il suffit de "couper" au niveau approprié afin d'obtenir une partition correspondant au nombre de classes de visualisation.

Le diagramme présenté sur la *figure 5* a été établi d'après l'analyse de 109 échantillons. La coupe établie en AA' détermine les 10 classes de niveaux qui sont visualisées.

Cette méthode permet d'obtenir une visualisation plus adaptée à la discrimination des zones étudiées. Toutefois le surcroît de calcul requis n'est pas justifié au niveau de la visualisation ; il ne devient utile que si l'on se sert des résultats obtenus pour bâtir une taxinomie des zones-échantillon à partir de leurs valeurs de luminance.

4.2.2. La visualisation simple à l'imprimante

Pour un canal donné, et à partir des bornes calculées au préalable, la visualisation des données consiste à affecter à un niveau de luminance, ou à une classe de valeurs de luminance, un symbole élémentaire ou complexe. L'ensemble des caractères symbolise, en allant du plus foncé au plus clair, des niveaux de luminance de plus en plus élevés et donne une impression visuelle proche des images qui est propice à l'identification et au repérage des zones que l'on souhaite étudier (programme VISU 3 et 4 : DERINK et LACAZE, 1976).

Les visualisations ainsi obtenues sont analogues en principe aux équidensités photographiques ou électroniques ; elles se présentent sous la forme d'une matrice dont chaque symbole - élémentaire ou provenant de la superposition de deux caractères alphanumériques - est représentatif d'une valeur de luminance (ou d'une classe de valeurs) et repéré par un numéro de ligne (correspondant à la ligne de balayage) et un numéro de colonne (correspondant à chaque élément de résolution).

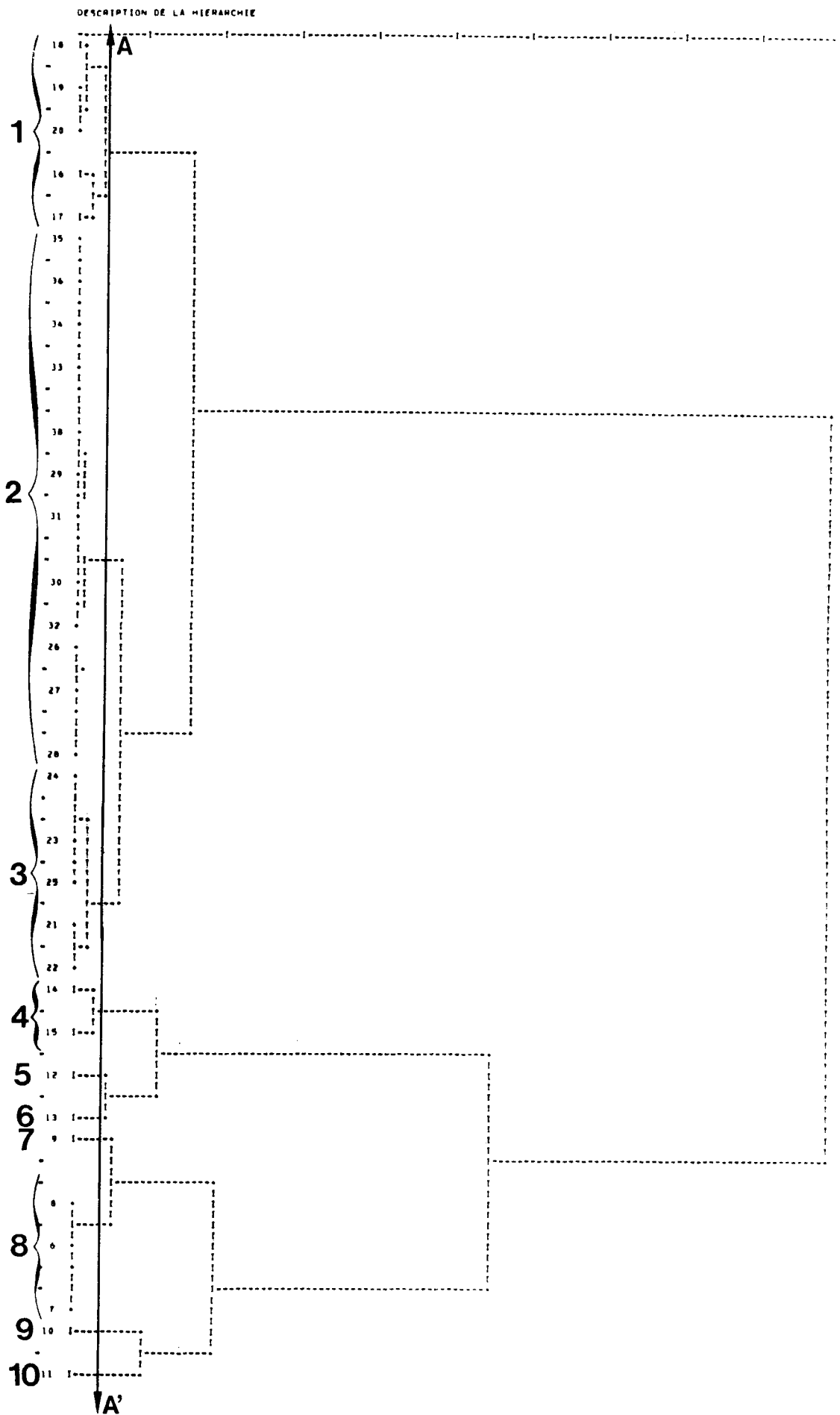


Figure 5

Typologie des niveaux.

Diagramme indiquant la hiérarchisation des niveaux de luminance des 109 écotopes.
(coupe AA' du diagramme pour obtenir 10 classes d'intensité)

D'autre part, selon le niveau de précision requis, il n'est pas toujours nécessaire de restituer la totalité des valeurs enregistrées ; c'est pourquoi on effectue une sélection du nombre de lignes d'enregistrement ainsi que du nombre d'éléments de résolution visualisés, afin d'obtenir des documents à différentes échelles.

Il faut souligner toutefois que les documents obtenus ne sont pas superposables à une carte : les contraintes liées à la dimension (fixe) du caractère de l'imprimante rendent impossible une restitution fidèle de la géométrie de l'enregistrement. Tout au plus peut-on effectuer la sélection du pas d'échantillonnage en lignes et colonnes de manière à obtenir un document ayant approximativement la même échelle suivant les deux axes (axe de balayage et axe de déplacement du satellite).

La première visualisation présentée, en réduction, sur la *figure 6* a été obtenue à partir des bornes calculées selon le principe de l'équirépartition (*cf. figure 4*), en considérant l'ensemble de l'enregistrement compris sur la bande magnétique n° 3. L'exemple concerne le canal 5, et seuls 1 ligne sur 10 et 1 élément de résolution sur 5 ont été représentés.

Les éléments majeurs de la région sont reconnaissables en raison de leur contraste. Cependant, si l'on revient à l'obtention de l'histogramme des données, il faut remarquer que les zones aquatiques, prépondérantes en surface, vont être fortement représentées en fréquence absolue. Aussi l'équirépartition des niveaux de luminance a-t-elle pour conséquence de nuire à la visualisation détaillée des classes de valeurs de luminance élevées. La visualisation apparaît donc comme un cliché sous-exposé pour la partie qui, en fait, nous intéresse le plus (zones terrestres).

Afin d'améliorer la précision, il est possible pour la partie de l'enregistrement correspondant strictement au territoire-test (*cf. figure 2*), de refaire un histogramme et de calculer des bornes de visualisation plus adaptées. C'est ce qui a été réalisé pour obtenir la deuxième visualisation, présentée à la *figure 7*. On remarque la saturation des zones aquatiques, des détails plus fins dans la zone des vignobles du Bas-Languedoc ; cependant il persiste une certaine difficulté de lecture pour les milieux terrestres, due vraisemblablement au "découpage" arbitraire en dix classes de luminance.

DONNEES LANDSAT BANDE MAGNETIQUE TEO 3
 ZONE TRAITEE 149 949 10 1 700 5 CANAL MES 5
 BORNES 8 9 10 11 12 13 14 15 16 124

SYMBOLES

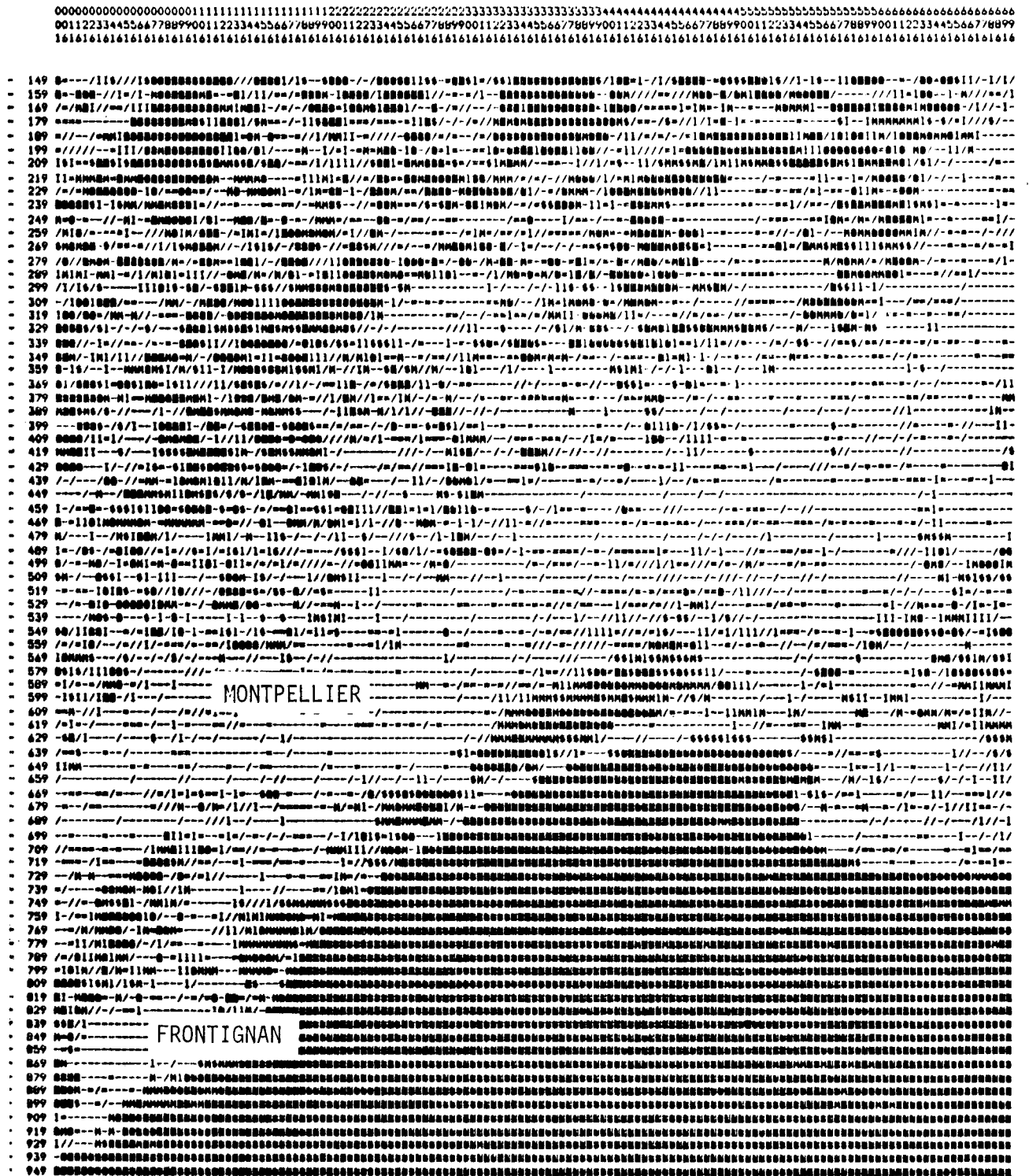


Figure 6

Visualisation en dix niveaux du canal 5 (une partie seulement du territoire-test).

Le choix des bornes de visualisation est basé sur le principe de

l'équirépartition des valeurs de luminance (d'après l'histogramme général, cf. figure 4)

La troisième visualisation (*figure 8*) est un exemple de visualisation dont les bornes ont été déterminées selon le principe du regroupement après hiérarchisation des valeurs de luminance, à partir de l'analyse de 109 zones-échantillons réparties dans le territoire-test. L'amélioration n'est pas particulièrement nette par rapport aux visualisations précédentes : en fait la dynamique du signal enregistré est faible, et les différentes sélections des niveaux de luminance n'entraînent pas des variations considérables dans les visualisations obtenues.

De plus, il faut souligner que la lisibilité des visualisations dépend largement du choix des symboles, qui doivent traduire une progression dans les niveaux de gris ; l'utilisation d'une imprimante d'ordinateur laisse peu de possibilités pour varier les symboles, même si l'on opère par superposition de caractères.

4.2.3. La visualisation après augmentation de contraste

Au lieu de procéder canal par canal, on peut visualiser sur un même document, une combinaison déterminée des valeurs de luminance dans les quatre canaux et rechercher parmi les multiples combinaisons possibles, celle qui offre le meilleur contraste. Ces combinaisons peuvent être de différents types : rapports de canaux, rapports/somme, cosinus directeurs.

Là encore, il est nécessaire d'établir l'histogramme des fréquences absolues des valeurs résultant de la combinaison choisie (programme HISTO C.L. : DERINK et LACAZE, 1976).

Les *figures 9 et 11* sont deux exemples d'histogrammes provenant des combinaisons suivantes :

- *figure 9* : Réponse du canal 4 + réponse du canal 5 + réponse du canal 6 + réponse du canal 7
notation abrégée : (4+5+6+7)
- *figure 11* : Réponse du canal 5 - réponse du canal 7 / réponse du canal 5 + réponse du canal 7
notation abrégée : (5-7)/(5+7)

Les visualisations présentées sur les *figures 10 et 12* correspondent respectivement à ces deux combinaisons de canaux ; les bornes de visualisation ne sont pas calculées systématiquement, mais sont choisies

GROUPE DE RECHERCHES SUR LA TELEDETECTION CEPE/CNRS MONTPELLIER
 SYSTEME ANTIDOTE VERSION 10010 PHASE1 HIS10 C. L.

DONNEES ERTS1 LANGUEIROC BANDE MAGNETIQUE TE0 3

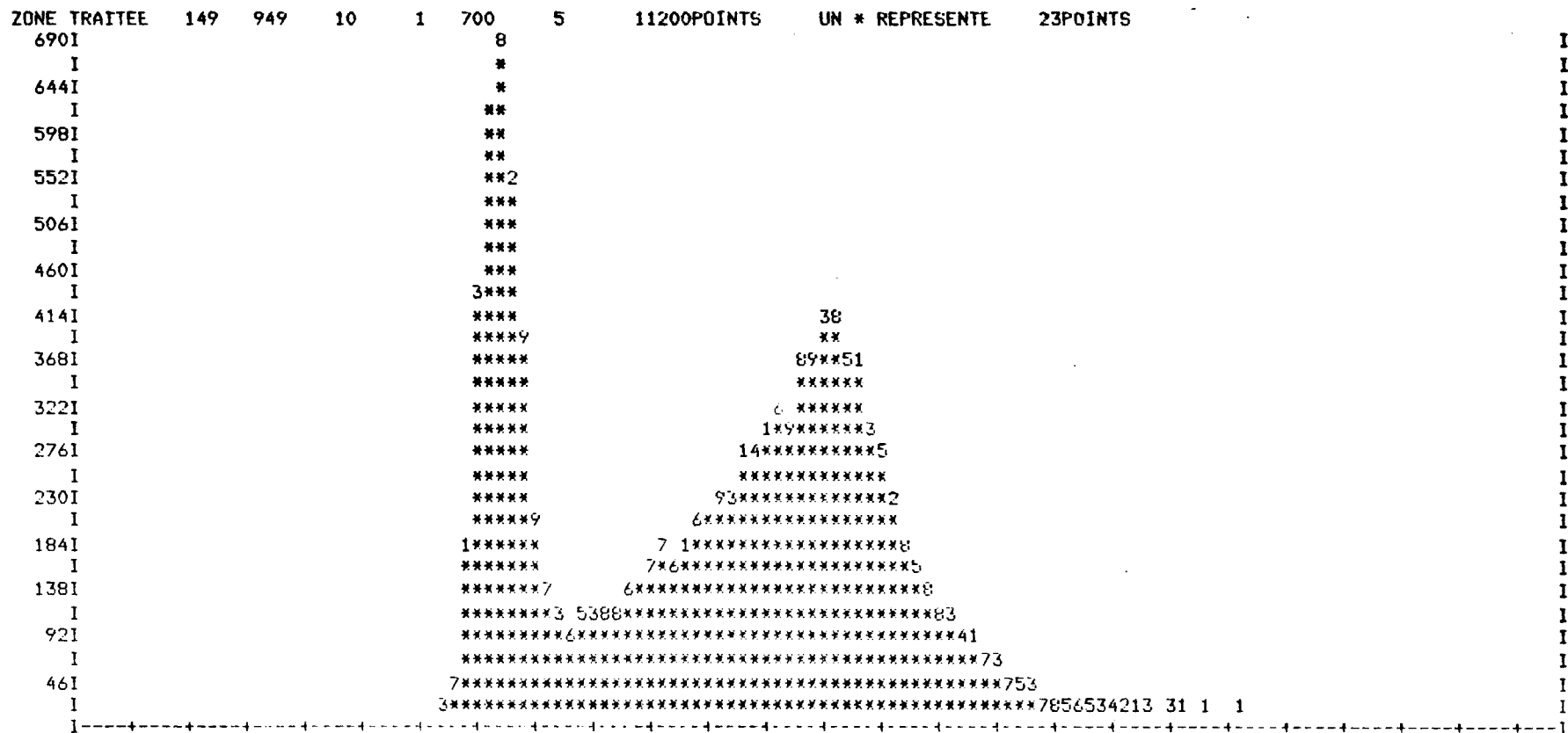


Figure 9

Histogramme des valeurs de luminance selon une combinaison de canaux :
 4+5+6+7 de la bande magnétique n° 3 (cf. figure 2).

SYSTEME ANTIQUOTE VERSION 10010 PHASE1 HISTO C. L.

DONNEES ERTS1 LANGUEDOC BANDE MAGNETIQUE TE0 3

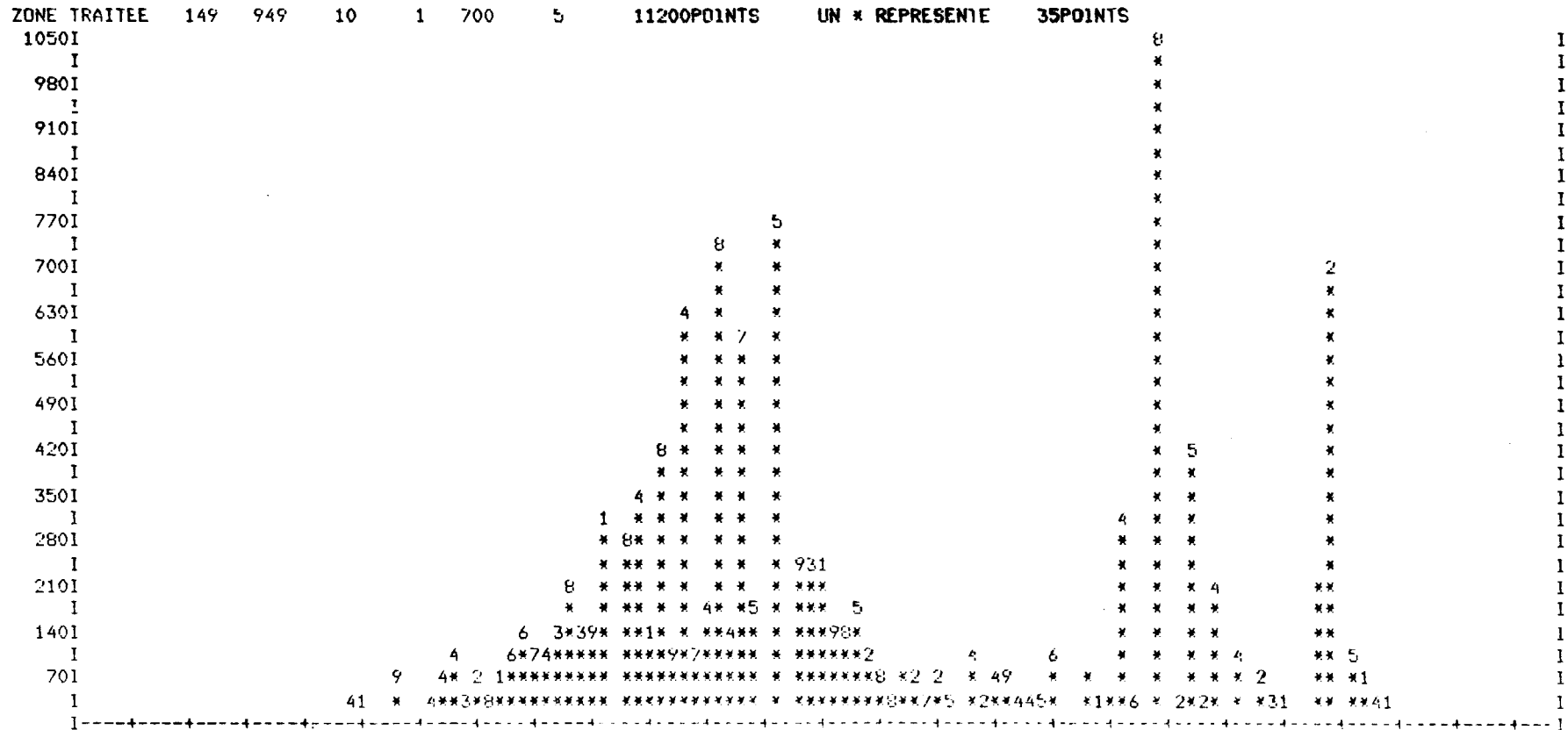


Figure 11

Histogramme des valeurs de luminance selon une combinaison de canaux :
5 - 7 de la bande magnétique n° 3, (cf. figure 2).
 5 + 7

en fonction de l'allure de l'histogramme. Pour la *figure 12* l'affectation des symboles a été calculée de telle sorte que les zones aquatiques apparaissent en blanc.

Ces visualisations de combinaisons de canaux n'apportent pas vraiment l'augmentation de contraste recherchée : elles permettent simplement de bien séparer les zones aquatiques des zones de végétation, ce qui n'était pas possible en considérant le seul canal 5 (*voir figures 6 à 8*).

Il est possible de déterminer la combinaison de canaux qui fournit un maximum de contraste (première composante principale issue de l'analyse factorielle de la scène étudiée). Mais il faut noter qu'il s'agit d'une optimisation globale, qui n'est pas forcément adaptée à la discrimination des zones intéressantes pour le thématique. De plus, rappelons que le choix des symboles nécessite divers essais et appréciations visuelles : en conséquence, l'utilisation *d'outils interactifs* (consoles de visualisation et logiciel associé, permettant au thématique d'intervenir dans le processus de visualisation) s'impose si l'on veut obtenir rapidement des visualisations correctes.

4.3. Choix des zones d'apprentissage

4.3.1. Problématique

L'objectif à atteindre ici est la sélection d'un certain nombre de zones, qui feront l'objet d'une identification au sol, et qui serviront à obtenir des réponses spectrales de référence. Ces *signatures spectrales* permettront d'initialiser les algorithmes de classement de l'ensemble des données.

Les zones choisies (*écotopes*) sont définies comme homogènes par le thématique, d'après les cartes existantes et les photographies aériennes. Ce postulat d'homogénéité devra bien sûr être vérifié au niveau de la réponse spectrale.

La *représentativité* des zones d'apprentissage ne peut être assurée que si l'on raisonne sur la base d'un découpage en territoires d'égale valeur écologique : il est en effet illusoire de chercher à établir des

signatures spectrales universelles. A l'intérieur d'un tel territoire, une région écologique par exemple, il faut établir un échantillonnage stratifié basé sur les différentes variables susceptibles d'influencer les réponses spectrales.

Cependant, dans le cas considéré ici, le facteur limitant le choix des écotopes a été la possibilité de repérage précis, sur les visualisations, de zones définies auparavant sur une carte. En conséquence, nous avons été amenés à choisir les écotopes d'après les critères prépondérants de taille de la zone considérée et de contraste sur les visualisations. Il va de soi qu'une étude plus complète nécessiterait l'obtention de visualisations des données avec les corrections géométriques permettant la superposition exacte avec les cartes thématiques existantes.

4.3.2. Les documents de base

Ce sont :

- *les cartes topographiques* de l'IGN aux échelles du 1/25 000 au 1/1 000 000 (toutes les échelles intermédiaires comprises) ;
- *les cartes géologiques* de la France à l'échelle du 1/80 000 et du 1/50 000, feuilles de Montpellier et du Vigan ;
- *les photographies aériennes*, des missions :
 - . I.G.N. (pour le compte de l'Inventaire Forestier National) : couverture du département de l'Hérault à l'échelle du 1/15 000 (panchromatique et infrarouge, 1971) ;
 - . C.N.E.S.-G.D.T.A. (pour le compte du C.E.P.E.) couverture de la région de Montpellier à l'échelle du 1/25 000 (fausses-couleurs, septembre 1974) ;
- *la carte des formations végétales combustibles* du département de l'Hérault à l'échelle du 1/25 000 (levée par le C.E.P.E. en 1972, in TRABAUD, 1973).

C'est cette dernière carte que nous avons utilisée d'une façon prépondérante, étant donné l'orientation de notre travail vers l'étude de la végétation.

L'échelle de cette carte peut paraître surprenante, comparée à l'échelle des documents photographiques LANDSAT. En fait, l'expérience acquise lors de l'analyse des images a montré que la confrontation avec des documents cartographiques à plus petite échelle tels que :

- la carte de la végétation actuelle de l'Atlas du Languedoc-Roussillon à l'échelle du 1/750 000, levée par le C.E.P.E. en 1970 ;
- la minute et la maquette de cette même carte aux échelles du 1/100 000 et du 1/250 000, disponibles au C.E.P.E. ;
- la carte de la végétation de la France à l'échelle du 1/200 000, réalisée par le Service de la Carte de la Végétation de Toulouse en 1968.

ne suffit pas à expliquer certaines variations des images LANDSAT testées.

La carte des formations végétales à l'échelle du 1/25 000 s'est donc révélée être la source d'information la plus riche, et elle répond aux besoins de l'identification des unités de végétation, au niveau de précision compatible avec celui des données numériques LANDSAT.

Cette carte des formations végétales a été établie par photointerprétation et prospections sur le terrain (TRABAUD, 1973) ; chaque unité cartographiée est définie par :

- la structure de la végétation (agencement dans l'espace des constituants végétaux) ;
- les espèces végétales dominantes ;
- le biovolume végétal aérien.

Sur l'extrait de carte présenté sur la *figure 13*, le siglage de chaque zone comprend :

- des lettres caractérisant la formation végétale (légende *figure 15*) ;
- des chiffres arabes (1er chiffre) indiquant le nombre de strates de végétation observées ;
- des chiffres arabes (2ème chiffre) indiquant le biovolume végétal aérien ;
- les espèces végétales dominantes en abrégé (légende *figure 16*).

Les tableaux des *figures 15 et 16*, extraits de la notice de la carte (TRABAUD, 1973) explicitent les classes utilisées dans la codification de la structure horizontale et verticale de la végétation, et les sigles retenus pour la cartographie.

4.3.3. Le repérage des écotopes : procédure

C'est ici qu'intervient le processus d'interaction entre les données numériques et les images, qui constitue le lien le plus concret entre les deux modes d'exploitation des données issues du satellite.

Le choix et le repérage des unités (non dissociables) impliquent :

- . le repérage des principales unités de végétation sur les visualisations faites à l'imprimante d'ordinateur, à partir de la carte des formations végétales et à l'aide des photographies aériennes et des images en provenance du satellite ;
- . l'identification des unités contrastées (bénéficiant d'un fort contraste de voisinage) sur les visualisations, qui, bien que correspondant souvent à des unités spatialement restreintes, sont retenues pour accroître le nombre des échantillons.

Ce repérage n'est pas toujours aisé, essentiellement à cause :

- . des déformations géométriques (2 échelles différentes suivant les 2 axes) ;
- . de la nécessité de délimiter des zones d'apprentissage rectangulaires sur des unités thématiques à contours géométriques très divers.

Un exemple de repérage des écotopes est indiqué par la confrontation des *figures 13 et 14* où quelques unités choisies sur la carte des formations végétales (*figure 13*) sont repérées sur la visualisation de la zone correspondante (*figure 14 bis : calque joint à la figure 14*).

4.3.4. Inventaire descriptif des écotopes

Toute l'information concernant les écotopes sélectionnés est résumée dans la liste complète qui est présentée *figure 20*.

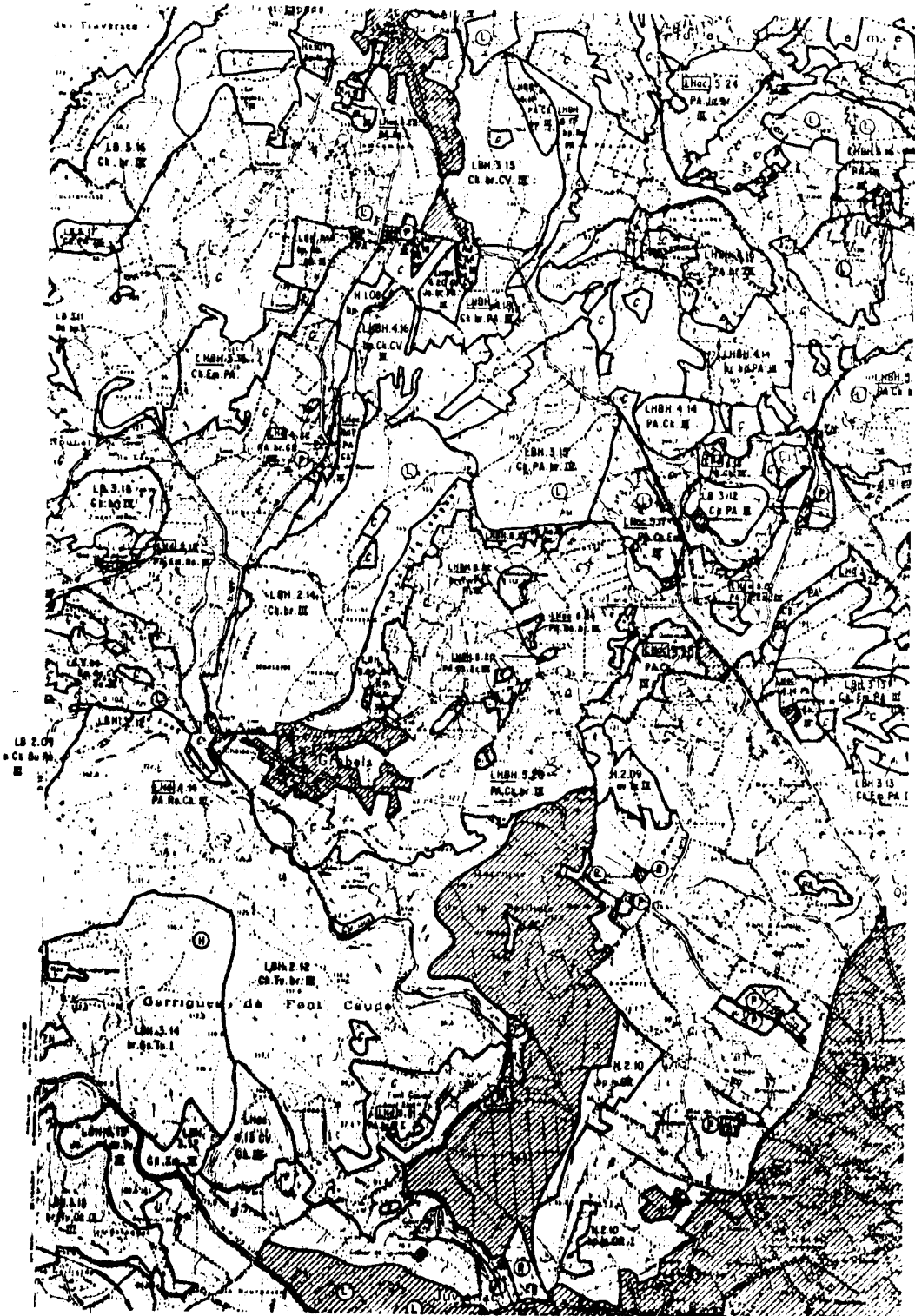


Figure 13

Extrait de la carte des formations végétales combustibles
(L. TRABAUD et al., 1973).

Région de Grabels et Nord-Ouest de Montpellier
(document réduit).

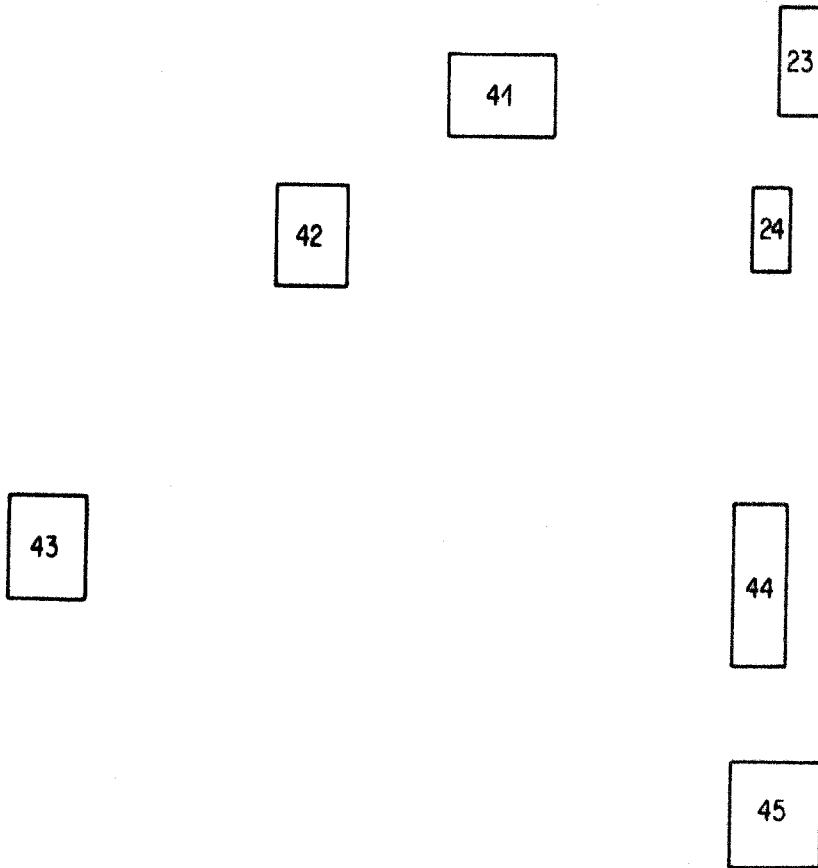
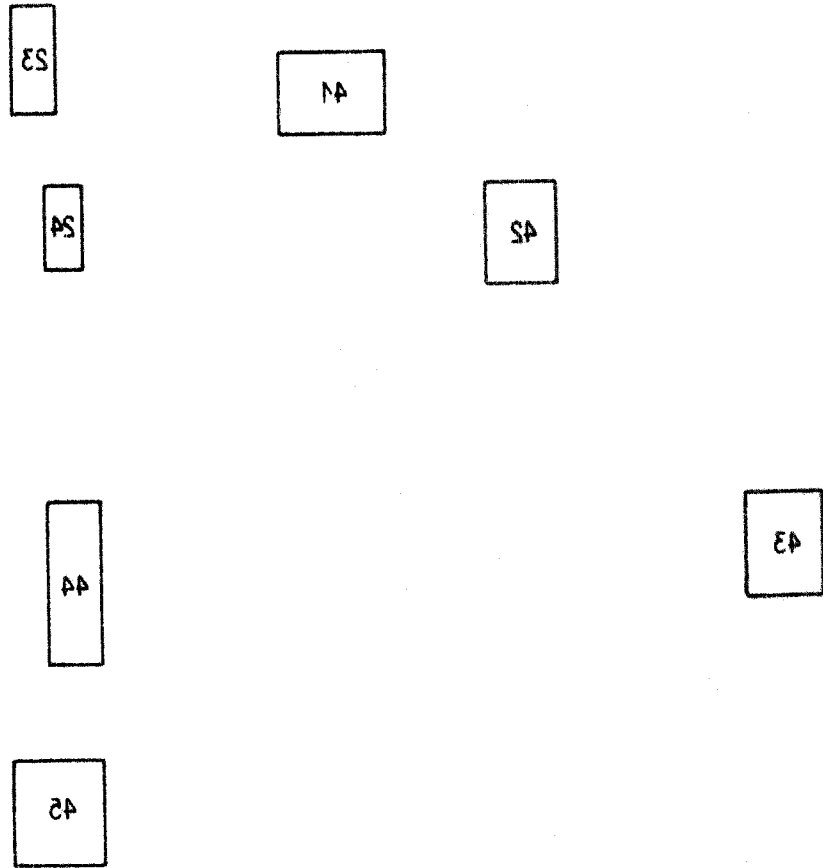


Fig. 14 bis

Exemple de localisation de quelques écotopes
(23: numéro de l'écotope, cf. figure 20)

Exemple de localisation de quelques écotopes
(S3 : numéro de l'écotope, cf. figure S0)

Fig. 14 bis



Constitution interne de la formation (typologie de base)		Pourcentage de recouvrement		
		des ligneux hauts	des ligneux bas	des herbacés
Ligneux hauts, denses...	LHd	75-100 %	0-100 %	0-100 %
Ligneux hauts, assez clairs.....	LHac	50-75 %	0-100 %	0-100 %
Ligneux hauts, clairs...	LHc	25-50 %	0-10 %	0-10 %
Ligneux bas.....	LB	0-25 %	10-100 %	0-10 %
Herbacés.....	H	0-25 %	0-10 %	10-100 %
Complexes ligneux hauts et ligneux bas.....	LHB	25-50 %	10-100 %	0-10 %
Complexes ligneux hauts et herbacés.....	LHH	25-50 %	0-10 %	10-100 %
Complexes ligneux bas et herbacés.....	LBH	0-25 %	10-100 %	10-100 %
Complexes ligneux hauts, ligneux bas, et herbacés	LHBH	25-50 %	10-100 %	10-100 %
Zone à végétation très claire.....	ZE	0-25 %	0-10 %	0-10 %
Zone sans végétation (mines, carrière ; etc.)	ZN	0 %	0 %	0 %

Figure 15

Caractérisation de la formation végétale

(extrait de la notice de la carte, in L. TRABAUD; 1973)

Figure 16

Extrait de la légende de la carte des formations
végétales combustibles de L. TRABAUD, 1973

Sigles des espèces dominantes

(Seuls les sigles des espèces végétales rencontrées dans l'étude sont indiqués)

Végétaux ligneux hauts

- AC Erable de Montpellier *Acer monspessulanum* L.
- CV Chêne vert *Quercus ilex* L.
- CY Cyprès *Cupressus sempervirens* L.
- PA Pin d'Alep *Pinus halepensis* Mill.
- TE Térébinthe *Pistacia terebinthus* L.

Végétaux ligneux bas

- AO Amélanchier *Amelanchier rotundifolia* (Lmk) Koch
- BU Buis *Buxus sempervirens* L.
- CK Chêne kermès *Quercus coccifera* L.
- GS Genêt Scorpion *Genista scorpius* (L.) Lmk
- JO Genévrier cade *Juniperus oxycedrus* L.
- PL Lentisque *Pistacia lentiscus* L.
- PS Epine du Christ *Paliurus spina christi* Mill.
- RO Romarin *Rosmarinus officinalis* L.
- TV Thym *Thymus vulgaris* L.
- XM Ciste de Montpellier *Cistus monspeliensis* L.
- XS Ciste à feuilles de sauge *Cistus salviaefolius* L.

Végétaux herbacés

- BP Brachypode phoenicoïde *Brachypodium phoenicoïdes* R. et S.
- BR Brachypode rameux *Brachypodium ramosum* R. et S.
- PH Phragmite *Arundo phragmites* L.

Zones sans végétation

- ZN Zones nues

Cette liste se lit ligne par ligne, chacune décrivant un écotope.
On lit successivement (*exemple de l'écotope n° 1*) :

- . le numéro de l'écotope
01 (de 1 à 109)
- . le code de la formation végétale
LHd : formation ligneuse haute dense (légende *figure 15*)
- . le nombre de strates de végétation (légende *figure 15*)
5 : 5 strates
- . l'indice de biovolume estimé (voir TRABAUD, 1973)
23 (de 0 à 50)
- . le sigle de l'espèce dominante (légende *figure 16*)
CV BU BR : Chêne vert, Buis, Brachypode rameux
- . la nature et l'âge de la roche-mère (légende *figure 21*)
CALC. DUR JUR. : calcaire dur du Jurassique.

Sans vouloir introduire une idée de classification définitive des 109 écotopes sélectionnés, on peut distinguer :

a) 65 échantillons représentant des unités de végétation, qui sont répartis :

soit, en 6 classes de formations végétales :

- ligneuses hautes denses
- ligneuses hautes assez claires
- ligneuses hautes - ligneuses basses - herbacées
- ligneuses basses
- ligneuses basses - herbacées
- herbacées

soit, en 6 classes caractérisées par une espèce végétale dominante :

- Chêne vert
- Pin d'Alep

- Romarin
- Brachypodes (rameux et phénicoïde)
- Genêt scorpion et genévrier oxycèdre
- Chêne kermès

b) 3 échantillons de zones rocheuses dépourvues de végétation correspondant aux carrières et aux affleurements rocheux.

c) 10 échantillons de zones de culture où le recouvrement du sol nu est plus important, et correspondant à des vignes dépourvues de feuillage (saison hivernale).

d) 14 échantillons de zones urbaines, répartis en 3 classes

- zones d'urbanisation ancienne dense
- zones d'urbanisation récente dense
- zones péri-urbaines ou résidentielles

Chaque échantillon est localisé géographiquement sur les cartes à l'échelle du 1/25 000 (carte des formations végétales) et à l'échelle du 1/250 000 (carte topographique).

Leur emplacement est indiqué sur le calque de la *figure 19* superposable aux deux images des *figures 17 et 18* et au fond topographique de la *figure 1*.

Les remarques faites plus haut concernant la taille des unités et la nécessité de contraste sur les visualisations sont illustrées ici par le manque d'échantillons dans la zone centrale du territoire-test (Bassin de Saint-Martin-de-Londres). En effet, la présence de Chêne blanc (sans feuillage à l'époque de la prise de vues), de formations complexes où dominent les espèces herbacées à l'état sec, ainsi que la complexité des mosaïques d'unités de taille restreinte, ont empêché la délimitation suffisamment sûre de zones d'apprentissage.

D'autre part, pour une analyse basée essentiellement sur l'étude de la végétation, on pourra s'étonner de voir des échantillons de zones aquatiques ou urbaines. Ceux-ci, qui étaient de loin les plus facilement repérables, ont été choisis pour mieux situer les réponses spectrales du

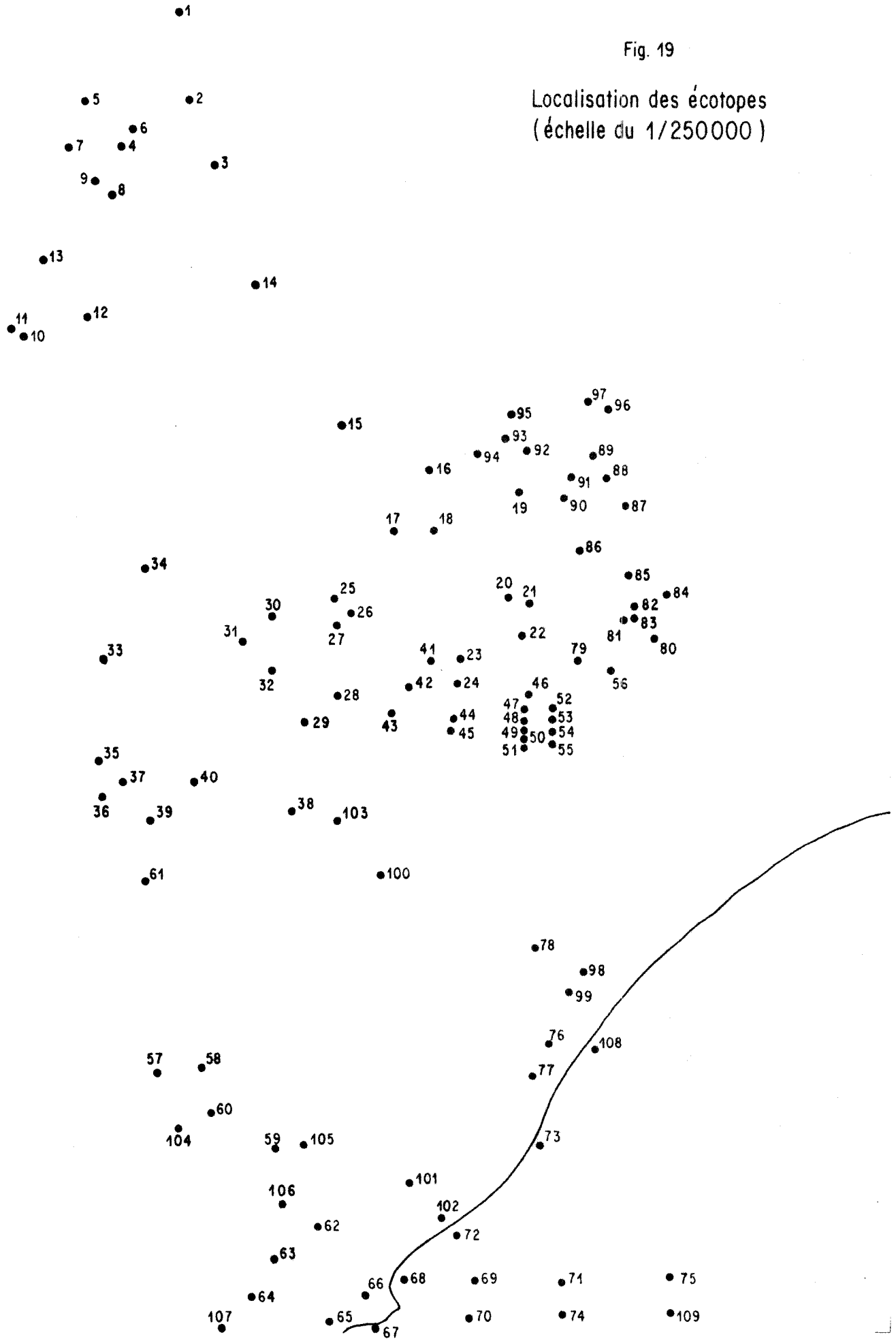


Figure 17

Agrandissement au 1/250 000 de l'image du canal 5 correspondant au territoire-test.

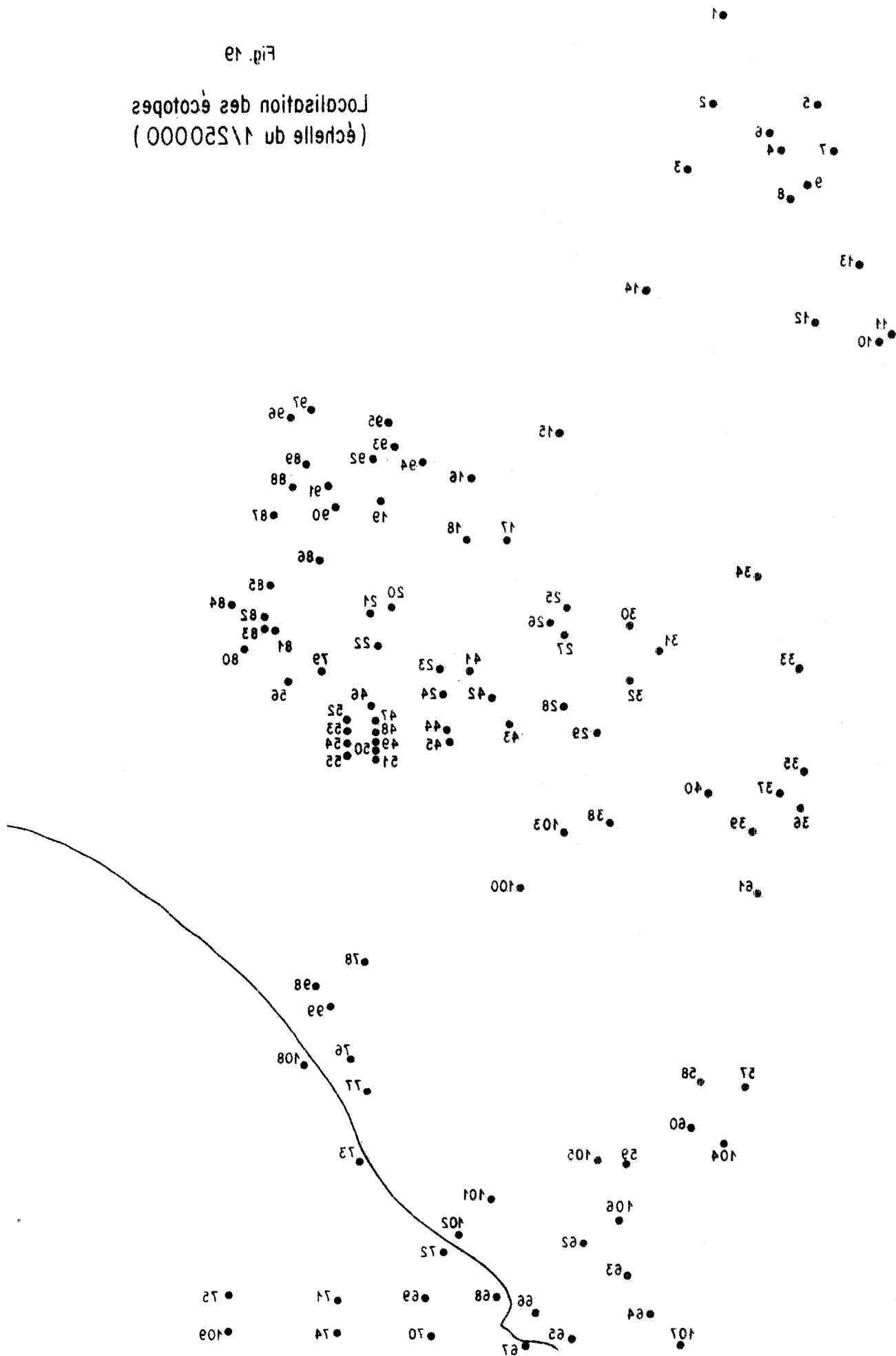
Fig. 19

Localisation des écotopes
(échelle du 1/250000)



Localisation des écotopes
(échelle de 1:25000)

Fig. 19



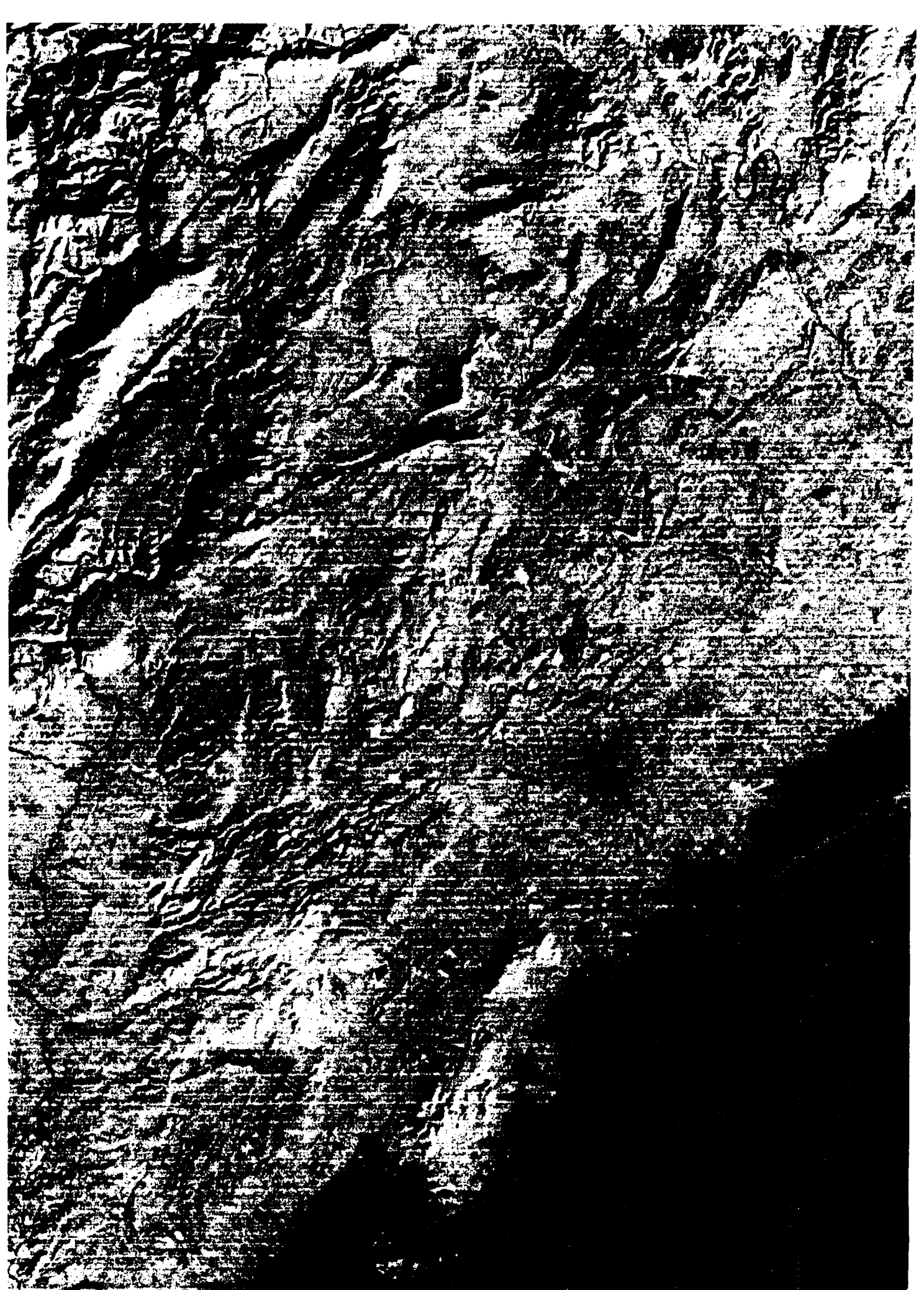


Figure 18

Agrandissement au 1/250 000 de l'image du canal 7 correspondant au territoire-test.

Figure 20

Liste des écotopes
du Bas-Languedoc
(région de Montpellier)

01 LHD 5 23 CV BU BR CALC DUR JUR	56 LB 3 13 CK CV CALC DUR JUR
02 LHAC 5 20 CV BU BR CALC DUR JUR	57 ZN MAR GYP OU BX
03 LHAC 4 15 CV BU CALC DUR JUR	58 LBH 3 16 CK BR CALC DUR JUR
04 LBH 2 12 BP JO PS CALC MAR CRET	59 LBH 3 12 CK BR CALC DUR JUR
05 LHAC 4 18 CV BU BR CALC DUR JUR	60 LBH 3 21 CK BR CALC DUR JUR
06 LBH 3 13 GS PS BR TV CALC DUR JUR	61 LBH 2 10 BR GS DOLO CAL JUR
07 LHAC 4 18 CV BU BR CALC DUR JUR	62 EAU MER
08 LBH 4 14 CV BU CALC DUR JUR	63 EAU ETANG DE THAU
09 LB 3 09 CV BU AO CALC DUR JUR	64 EAU ETANG DE THAU
10 LBH 2 14 BP CV CALC DOLO JUR	65 URBAIN SETE QUEST
11 LB 2 04 BU AQ CALC DOLO JUR	66 URBAIN SETE EST
12 LHD 4 20 CV BU CALC MAR JUR	67 EAU LITTORAL
13 LB 2 07 CV BU AO AC CALC DUR JUR	68 EAU LITTORAL
14 LBH 3 12 JO GS BR BU CALC MAR CRET	69 EAU MER
15 LBH 4 10 JO TV CALC MAR JUR	70 EAU MER
16 LHAC 5 19 PA CK GRES CONG OLIG	71 EAU MER
17 SOL NU VIGNES ARG GR CG OLIG	72 EAU LITTORAL
18 LHBH 5 20 PA CK RO ARG GR CG OLIG	73 EAU LITTORAL
19 LBH 3 12 RO CK PA MAR CRET	74 EAU MER
20 LHBH 5 19 PA CK ARG GR CG OLIG	75 EAU MER
21 LHBH 5 19 PA CK BR ARG GR CG OLIG	76 EAU ETANG DE VIC
22 LHBH 5 19 PA CK BR ARG GR CG OLIG	77 EAU ETANG DE VIC
23 LHAC 5 17 PA CK CALC LAC EOC	78 H 1 09 PH ALL MOD
24 LHAC 5 20 PA CK CALC LAC EOC	79 LBH 3 13 CK TV PA MAR CRET
25 LHAC 4 16 CV BU PA CALC DUR JUR	80 LB 3 13 CK CV CALC DUR JUR
26 LHAC 4 16 CV JO PL BR CALC DUR JUR	81 LB 3 13 CK CV CALC CRET
27 LHAC 4 16 CV BU PA CALC DUR JUR	82 LB 3 13 CK CV CALC CRET
28 ZN CALC LAC OLIG	83 LBH 3 14 CK BR MAR CRET
29 ZN CALC LAC EOC	84 LBH 4 16 CK BR CALC MAR CRET
30 LHAC 4 16 CV BU PA CALC DUR JUR	85 LBH 3 14 CK TV XM BR CV CALC CRET
31 LHAC 4 15 CV BU TE JO CALC DUR JUR	86 LBH 4 15 CK BR PA RO CALC CRET
32 LB 3 16 CK BR MAR EOC	87 LBH 3 12 PA CK ARG GR CG OLIG
33 LHD 4 20 CV JO CALC DUR JUR	88 LBH 3 13 CK JO CV BR CALC CRET
34 LHD 4 20 CV BU DOLO JUR	89 LB 3 13 CK CV TV CALC CRET
35 LHD 4 19 CV BR GS CALC LAC EOC	90 LHD 5 25 PA CK CALC LAC EOC
36 LHD 4 21 CV CK XS CALC LAC EOC	91 LHD 5 12 PA CK ARG GR CG OLIG
37 LHD 4 20 CV BU CALC LAC EOC	92 LB 3 11 PA RO CALC MAR CRET
38 LBH 2 11 BR TV GS BRE EOC	93 LHAC 5 19 PA CK CALC MAR CRET
39 LHAC 4 15 CV CK CALC LAC EOC	94 LBH 3 12 RO CK PA MAR CRET
40 LHAC 4 15 CV CK CALC LAC EOC	95 LHAC 5 19 PA CV CALC MAR CRET
41 LBH 3 15 CK PA BR CALC LAC EOC	96 SOL NU VIGNE ALL
42 LBH 2 14 CK BR CALC LAC EOC	97 LB 2 05 RO CK PA CALC MAR CRET
43 LBH 2 12 CK TV BR CALC DUR JUR	98 SOL NU VIGNE ALL SIL
44 URBAIN LA PAILLADE	99 SOL NU VIGNE ALL SIL
45 URBAIN LA PAILLADE	100 SOL NU VIGNE MAR ARG MIOC
46 LHAC 5 20 PA CV CY LUNARET MAR CRET	101 SOL NU VIGNE ALL
47 URBAIN MONTPELLIER 1N	102 FRONTIGNAN
48 URBAIN MONTPELLIER 2	103 SOL NU VIGNE CALC SIL MAR AAL EOC
49 URBAIN MONTPELLIER 3	104 SOL NU VIGNE MAR MIOC
50 URBAIN MONTPELLIER 4	105 SOL NU VIGNE MAR MIOC
51 URBAIN MONTPELLIER 5S	106 SOL NU VIGNE LIM GRAY
52 URBAIN MONTPELLIER 6N	107 EAU ETANG DE THAU
53 URBAIN MONTPELLIER 7	108 EAU LITTORAL
54 URBAIN MONTPELLIER 8	109 EAU MER
55 URBAIN MONTPELLIER 9S	

Exemple de lecture

01 : numéro de l'écotope

LHD : sigle de la formation végétale, ou indication en clair (cf. figure 15)

5 - 23 : nombre de strates (5) et estimation du biovolume total (23)

(cf. TRABAUD, 1973)

CV BU BR : sigles des espèces dominantes (cf. figure 16)

CALC DUR JUR : sigle de la nature géologique de la roche-mère.

(ici : calcaire dur du Jurassique).

Figure 21

Sigles utilisés pour la description géologique
des écotopes du Bas-Languedoc (région de Montpellier).

Calc dur Jur	: Calcaire dur du Jurassique
Calc mar Cret	: Calcaire marneux du Crétacé
Calc dolo Jur	: Calcaire dolomitique du Jurassique
Calc mar Jur	: Calcaire marneux du Jurassique
Gres Cong Olig	: Grès et Conglomérats de l'Oligocène
Arg Gr Cg Olig	: Argiles Grès Conglomérats de l'Oligocène
Mar Cret	: Marnes du Crétacé
Calc lac Eoc	: Calcaire lacustre de l'Eocène
Calc lac Olig	: Calcaire lacustre de l'Oligocène
Mar Eoc	: Marnes de l'Eocène
Dolo Jur	: Dolomie Jurassique
Bre Eoc	: Brèches Eocène
All sil	: Alluvions siliceuses
Mar Arg Mioc	: Marnes et Argiles du Miocène
Lim Grav	: Limons et Gravier

(d'après les cartes géologiques existantes)

couvert végétal par rapport à celles de l'ensemble des objets du territoire étudié, et comparer leurs valeurs de luminance dans un contexte général. Il est en effet indispensable, non seulement de "reconnaître" les unités thématiques qui nous intéressent, mais aussi de les discriminer des autres unités existant dans la zone d'étude.

4.3.5. Le choix et les caractéristiques des classes thématiques

Rappelons que dans la technique d'apprentissage dirigé, les classes d'objets à discriminer sont fixées par le thématicien, d'après la taxonomie en vigueur dans sa discipline.

Dans le cas présent, nous avons défini d'abord cinq grandes classes, représentatives d'unités synthétiques couvrant chacune une grande surface. Ce sont :

- Classe 1 - : les zones aquatiques* : étendues d'eau libre, exception faite des marais et des sansouires.
- Classe 2 - : les zones urbaines* : agglomérations plus ou moins denses ou zones péri-urbaines, suffisamment étendues pour être détectables.
- Classe 3 - : les zones de roche affleurante* : zones où la roche est largement affleurante, que ce soit naturellement ou en raison d'une exploitation (carrière).
- Classe 4 - : les zones de sol nu* : zones où le sol nu domine : ce sont, en raison de la date des enregistrements (janvier), les sols de culture (vignes en hiver) avec toutefois un faible pourcentage de végétation correspondant aux friches ou fossés, non dissociables sur les visualisations, en raison de leur imbrication.
- Classe 5 - : les zones de végétation* : le couvert végétal y est dominant ; il s'agit essentiellement de végétation non cultivée

et nous nous intéresserons surtout dans la suite aux zones caractérisées par la dominance d'une espèce sempervirente.

Ensuite, en complément de cette classification très sommaire, une division en sous-classes correspondant à un niveau plus détaillé a été effectuée. Le surcroît de précision a surtout été apporté pour les zones de végétation.

Ces sous-classes sont les suivantes :

Classe 1 : - mer
- littoral
- étang de Thau
- étang de Vic

Classe 2 : - urbain dense
- périphérie urbaine
- urbain résidentiel

Classe 3 : aucune subdivision

Classe 4 : aucune subdivision

Classe 5 :

* Subdivision basée sur l'espèce végétale dominante :

- Chêne vert
- Pin d'Alep
- Chêne kermès
- Romarin
- Buis
- Genévrier oxycèdre
- Brachypode rameux
- Phragmite (Roseau)

* Subdivision basée sur la formation végétale :

- ligneuse haute dense
- ligneuse haute assez claire
- ligneuse haute-ligneuse basse- herbacée
- ligneuse basse
- ligneuse basse-herbacée
- herbacée.

4.4. Techniques d'apprentissage

4.4.1. Description

L'apprentissage consiste à calculer un certain nombre de paramètres statistiques destinés à caractériser un écotope, ou un ensemble d'écotopes.

Les calculs portent sur les valeurs de luminance, dans les 4 canaux, de l'ensemble des éléments de résolution qui constituent l'écotopie ou le groupe d'écotopes. Le programme utilisé (programme APPR 2 ; DERINK et LACAZE, 1976) permet de choisir entre deux options :

- *apprentissage par zones*

les résultats sont fournis pour chaque écotopie

- *apprentissage par classes*

les résultats sont fournis pour un ensemble d'écotopes spécifié par le thématicien

Dans les deux cas, les résultats obtenus concernent les paramètres suivants :

- moyennes et écarts-types dans les 4 canaux (*figure 22*)
 - * remarque : sur cette figure est porté l'indicatif de l'écotopie caractérisé :
225 235 524 534 : coordonnées en lignes et colonnes de l'écotopie
07 : numéro de l'écotopie
LHAC 4 18 CV BU BR : description de l'écotopie (*cf. figure 20*) cet indicatif se retrouvera dans les figures suivantes.
- matrices de covariances et de corrélations (*figure 22*)
 - * sur cette figure les canaux sont numérotés de 1 à 4 ; exemple de lecture : covariance 2/3 = covariance entre le canal n° 2 (canal MSS-5) et le canal n° 3 (canal MSS-6).
- liste des valeurs de luminance observées dans chaque canal et de leurs fréquences (*figures 23, 25, 27, 29 : haut de la page*)
 - * la *figure 23* concerne le canal MSS-4 ; les lignes imprimées en dessous de l'indicatif de l'écotopie se lisent de la façon suivante (*exemple de la 2ème ligne*) :
15 : niveau de luminance
66 : fréquence absolue de ce niveau

50,000 : fréquence relative de ce niveau

77 : fréquence absolue cumulée des niveaux ≤ 15

58,333 : fréquence relative cumulée des niveaux ≤ 15

* les *figures 25, 27, 29*, concernent respectivement les canaux MSS 5, 6 et 7.

- liste des autres paramètres statistiques, pour chaque canal (*figures 23, 25, 27, 29*, en dessous des valeurs précédentes)
 - * on lit successivement les valeurs du quartile inférieur, de la médiane, du quartile supérieur, du semi-interquartile, de la moyenne interquartile, du coefficient de dissymétrie, du mode.
- histogramme des fréquences absolues des niveaux de luminance, pour chaque canal (*figures 24, 26, 28, 30* : bas de la page)
 - * la *figure 24* permet de visualiser l'histogramme des fréquences absolues dans le canal MSS-4 ; en abscisse se trouvent les niveaux de luminance, en ordonnée les fréquences absolues (nombre d'éléments de résolution) ; le nombre total d'éléments de résolution est indiqué en haut et à gauche de l'histogramme (nombre de "points")
 - * les *figures 26, 28, 30* présentent le même résultat pour les canaux MSS 5, 6 et 7.

La *figure 31* montre, à titre indicatif, la dispersion des niveaux de luminance autour de la valeur moyenne (moyenne \pm un écart-type) ; cette figure confirme d'une part le nombre relativement faible de niveaux représentés parmi la gamme théorique, d'autre part la faible séparabilité générale des réponses spectrales des écotopes (chevauchement des valeurs de luminance observées).

4.4.2. Résultats de l'apprentissage par zones

L'analyse statistique des réponses spectrales au niveau de chaque écotope a essentiellement pour but de vérifier l'homogénéité de la zone d'apprentissage considérée.

Cette homogénéité se traduit, au niveau des résultats cités au paragraphe précédent, par des histogrammes correspondant à une distribution de type gaussien, dans les quatre canaux, et des valeurs d'entropie généralement faibles.

Une hétérogénéité des réponses spectrales des unités de résolution correspondant à l'écotopé analysé se manifestera au contraire par l'obtention d'histogrammes plurimodaux et de valeurs d'entropie élevées (*figure 32*).

GRUPE DE RECHERCHES SUR LA TELEDETECTION CEPE/CNRS MONTPELLIER
 SYSTEME ANTIDOTE VERSION 10010 PHASE2 APPRENTISSAGE

	225	235	524	534	07	LHAC	4	18	CV	BU	BR
MOYENNES		15.46	9.12	13.57	7.75						
EC.TYPES		.82	.98	1.95	1.41						
		1/1	1/2	2/2	1/3	2/3	3/3	1/4	2/4	3/4	4/4
COVARIANCES		.67	.42	.97	.68	1.11	3.83	.50	.71	2.16	2.00
CORRELATIONS		1.00	.52	1.00	.42	.58	1.00	.43	.51	.78	1.00

Figure 22
 Exemple de résultats statistiques de l'apprentissage
 (écotope n° 7)

GRUPE DE RECHERCHES SUR LA TELEDETECTION CEPE/CNRS MONTPELLIER
 SYSTEME ANTIDOTE VERSION 10010 PHASE2 APPRENTISSAGE

CANAL MSS 4

225 235 524 534 07 LHAC 4 18 CV BU BR

14	11.	8.333	11.	8.333
15	69.	50.000	77.	58.333
16	38.	28.787	115.	87.121
17	17.	12.878	132.	100.000

QUARTILE INF.	MEDIANE	QUARTILE SUP.	SEMI-INTERQUART.	MOYENNE INTERQUARTILE	COEFF. DE DISSYMETRIE	MODE
14	15	16	1.0	15.0	.000	15

ENTROPIE 1.696 BINONS

Figure 23

132POINTS UN * REPRESENTE 3PTS CANAL 4

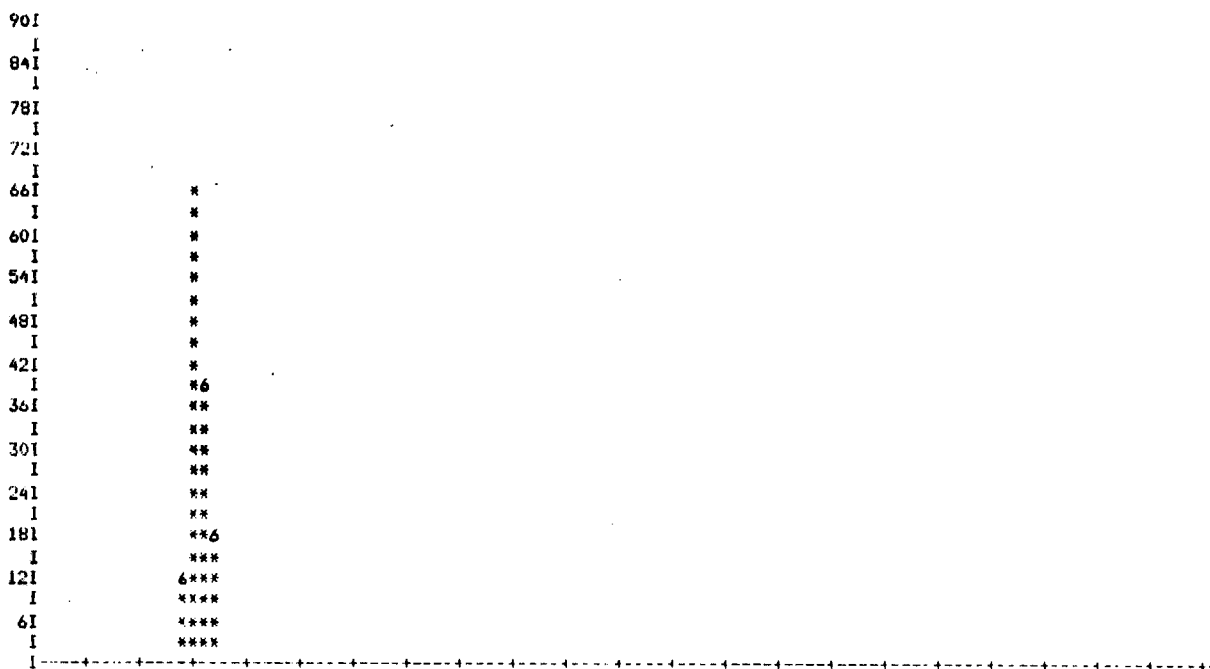


Figure 24

Figures 23 et 24
 Exemple de résultats statistiques de l'apprentissage
 (écotope n° 7)

GROUPE DE RECHERCHES SUR LA TELEDETECTION OFFE ZONES HUMIDES
SYSTEME ANTIDOTE VERSION 10010 PHASE2 APPRENTISSAGE

CANAL MSS 5

125 235 524 534 07 LHAC 4 18 CV BU BK

6	1.	.757	1.	.757
8	34.	25.757	35.	26.515
9	57.	43.181	92.	69.696
10	31.	23.484	123.	93.181
11	5.	3.787	128.	96.969
12	4.	3.030	132.	100.000

QUARTILE INF.	MEDIANE	QUARTILE SUP.	SEMI-INTERQUART.	MOYENNE INTERQUARTILE	COEFF. DE DISSYMETRIE	MODE
8	9	9	.5	8.5	-1.000	9

ENTROPIE 1.903 BINONS

Figure 25

132POINTS UN * REPRESENTE 2PTS CANAL 5

60I	
I	5
56I	*
I	*
52I	*
I	*
48I	*
I	*
44I	*
I	*
40I	*
I	*
36I	*
I	**
32I	**5
I	***
28I	***
I	***
24I	***
I	***
20I	***
I	***
16I	***
I	***
12I	***
I	***
8I	***
I	****5
4I	*****
I	5 *****

Figure 26

Figures 25 et 26
Exemple de résultats statistiques de l'apprentissage
(écotope n° 7)

GRUPE DE RECHERCHES SUR LA TELEDETECTION CEPELORS MONTPELLIER
 SYSTEME ANTIDOTE VERSION 10010 PHASE2 APPRENTISSAGE

CANAL MSS 6

225 235 524 534 07 LHAC 4 18 CV BU BR

7	1.	.757	1.	.757
8	1.	.757	2.	1.515
9	2.	1.515	4.	3.030
10	2.	1.515	6.	4.545
11	7.	5.303	13.	9.848
12	22.	16.666	35.	26.515
13	33.	25.000	68.	51.515
14	26.	19.696	94.	71.212
15	16.	12.121	110.	83.333
16	14.	10.606	124.	93.939
17	3.	2.272	127.	96.212
18	5.	3.787	132.	100.000

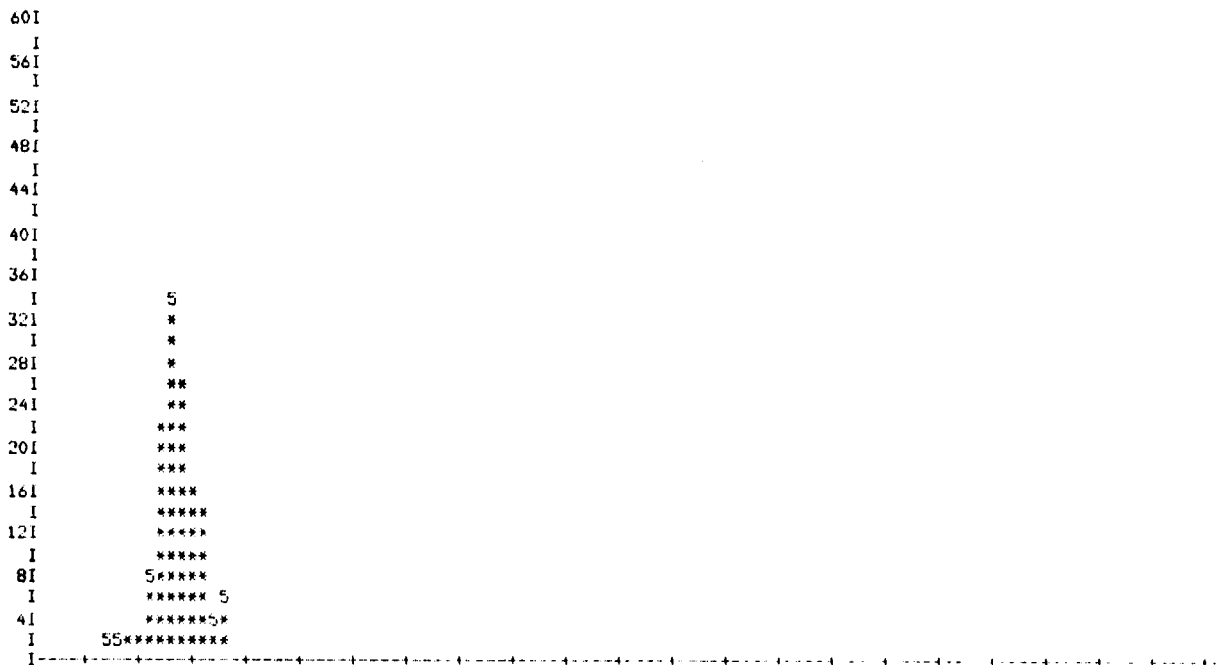
QUARTILE INF.	MEDIANE	QUARTILE SUP.	SEMI-INTERQUART.	MOYENNE INTERQUARTILL	COEFF. DE DISPERSION	ENTROPIE
12	13	14	1.0	13.0	1.000	13

ENTROPIE 2.922 BINONS

Figure 27

Figure 28

132POINTS UN * REPRESENTE 2PTS CANAL 6



Figures 27 et 28

Exemple de résultats statistiques de l'apprentissage
 (écotope n° 7)

CANAL MSS 7

225 235 524 534 07 LHAC 4 18 CV BU BR

3	1.	.757	1.	.757
4	2.	1.515	3.	2.272
5	6.	4.545	9.	6.818
6	10.	7.575	19.	14.393
7	33.	25.000	52.	39.393
8	45.	34.090	97.	73.484
9	22.	16.666	119.	90.151
10	10.	7.575	129.	97.727
11	3.	2.272	132.	100.000

QUARTILE INF.	MEDIANE	QUARTILE SUP.	SEMI-INTERQUART.	MOYENNE INTERQUARTILE	COEFF DE DISSYMETRIE	MULE
6	7	8	1.0	7.0	.999	
ENTROPIE 2.495 BINONS						

Figure 29

132POINTS UN * REPRESENTE 2PTS CANAL 7

```

60I
I
56I
I
52I
I
48I
I 5
44I *
I *
40I *
I *
36I *
I 5*
32I **
I **
28I **
I **
24I **
I ***
20I ***
I ***
16I ***
I ***
12I ***
I ****
8I ****
I *****
4I *****5
I 5*****

```

Figure 30

Figures 29 et 30
 Exemple de résultats statistiques de l'apprentissage
 (écotope n° 7)

COMPARAISON DES ZONES PAR CANAL, MOYENNE + OU - 1 ECART TYPE

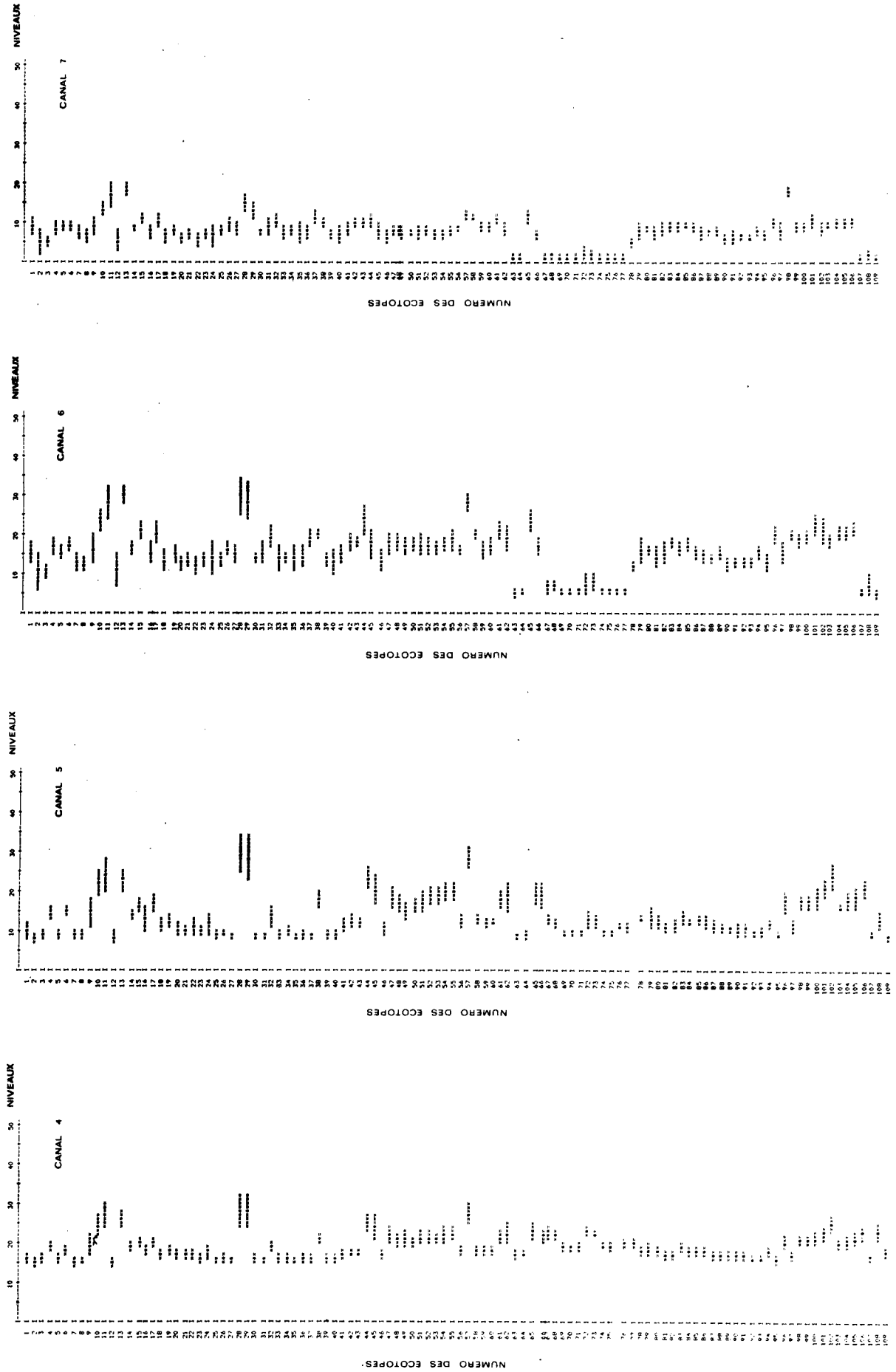


Figure 31 - Comparaison des moyennes des distributions des niveaux de luminance des 109 écotopes de référence

L'hétérogénéité observée peut avoir une cause accidentelle (erreur de localisation, erreur de transcription des coordonnées de l'écotope).

Elle peut également avoir une cause "naturelle"; dans ce cas l'unité considérée comme homogène est en fait composée d'un ou plusieurs éléments de réponses spectrales différentes, ces éléments ayant une surface suffisamment grande par rapport à la taille de l'unité de résolution pour avoir une influence perceptible sur les résultats statistiques.

En particulier, il est possible d'expliquer certains histogrammes bimodaux dans le canal 7 par le fait qu'à l'heure de la prise de vues certains versants étaient situés à l'ombre : ainsi la réponse de l'écotope n° 2 (cf. *figure 33*) peut s'interpréter comme résultant d'éléments de résolution situés les uns à l'ombre, les autres dans des zones éclairées. Cette distinction n'apparaît pas dans la réponse spectrale du canal MSS-5 : c'est pourquoi il est utile, lors de la sélection des écotopes, de vérifier, à partir des visualisations photographiques des différents canaux qu'il n'existe pas une hétérogénéité détectable dans l'un ou l'autre des canaux.

Toutefois, un constat d'hétérogénéité ne remet pas systématiquement en cause la validité d'un écotope. Il faut en effet considérer non seulement la dispersion des réponses spectrales à l'intérieur des zones d'apprentissage, mais aussi la dispersion inter-zones dont l'étude est décrite au paragraphe suivant.

4.4.3. Résultats de l'apprentissage par classes

Dans cette étape, chaque classe ou sous-classe d'écotopes est caractérisée par la même série de paramètres statistiques que lors de l'apprentissage par zones. Nous allons commenter successivement les résultats obtenus à partir des classes et sous-classes définies plus haut.

4.4.3.1. Les histogrammes des fréquences absolues

Les réponses spectrales des 5 grandes classes, dans les 4 canaux, sont globalement gaussiennes. On ne note pas de dispersion des valeurs ni d'aplatissement exagéré de la distribution des fréquences, tels qu'ils empêcheraient la comparaison à l'aide d'un paramètre statistique simple.

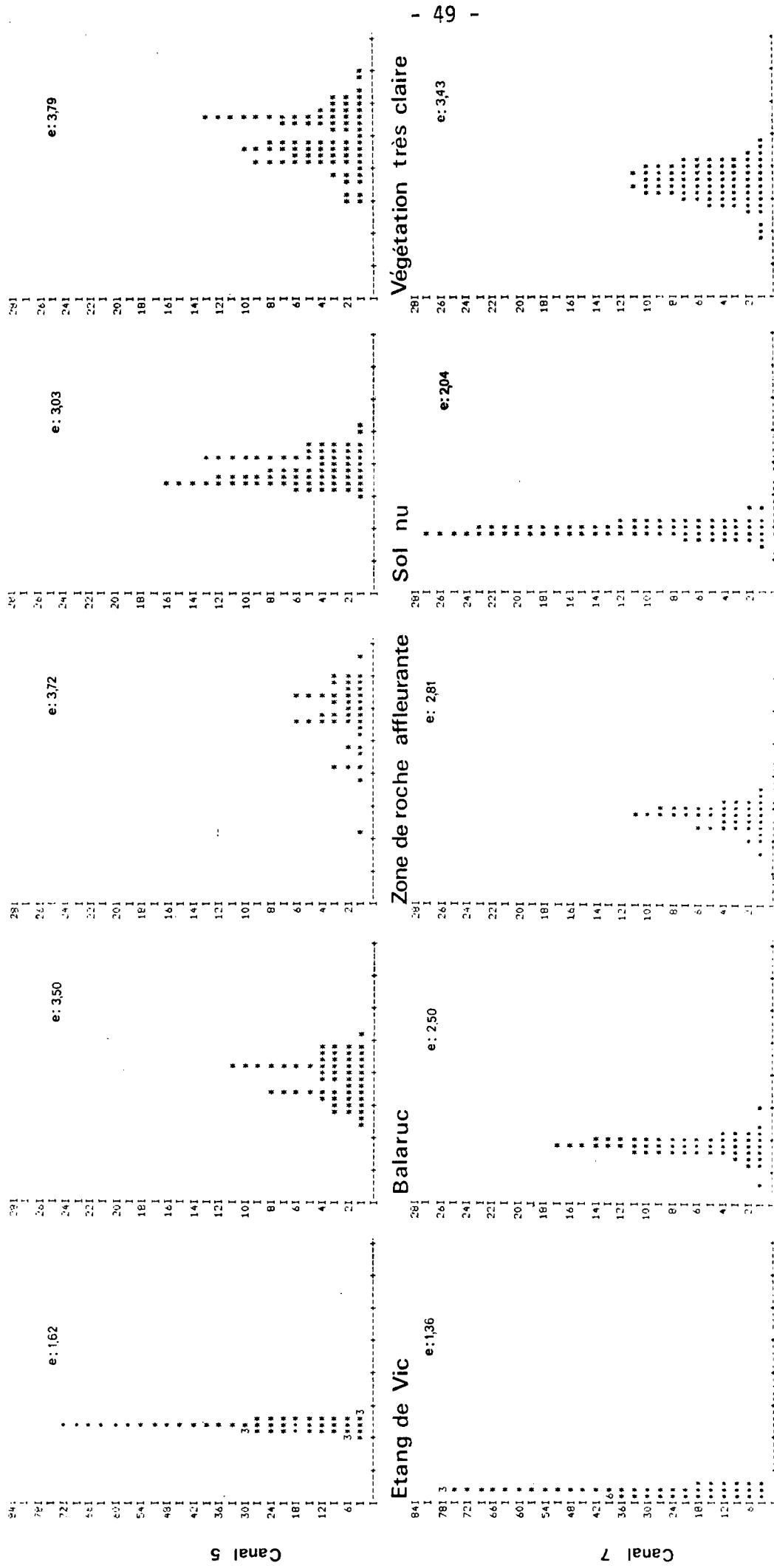
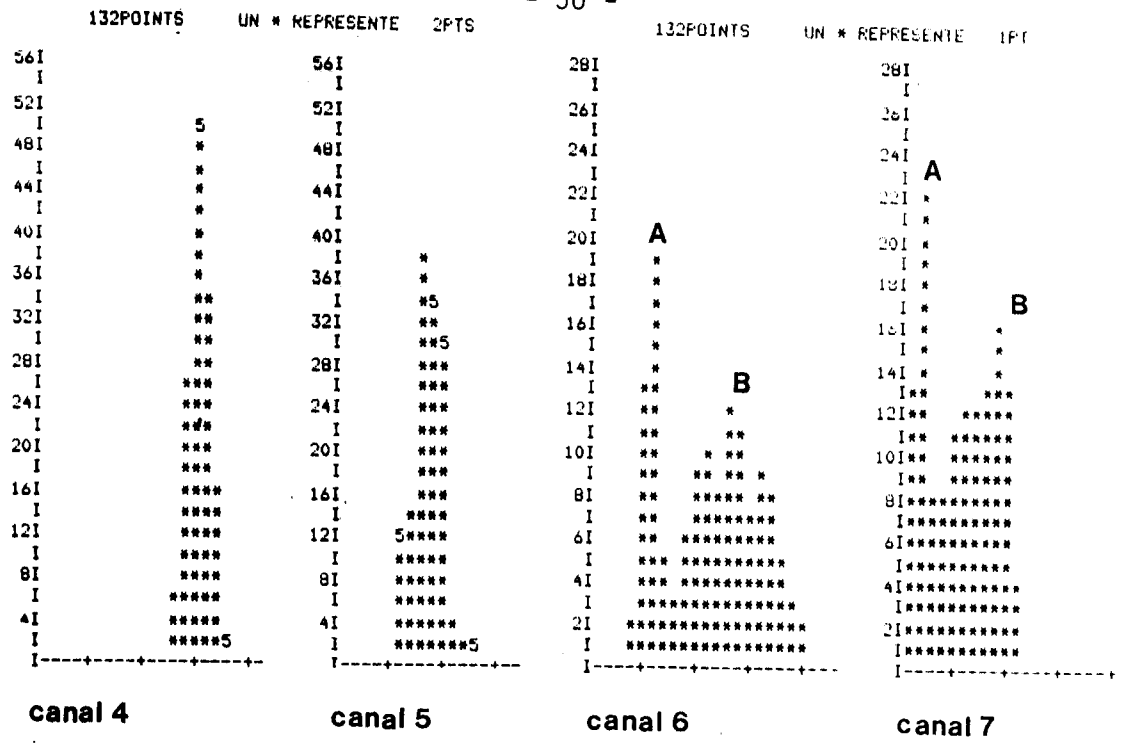
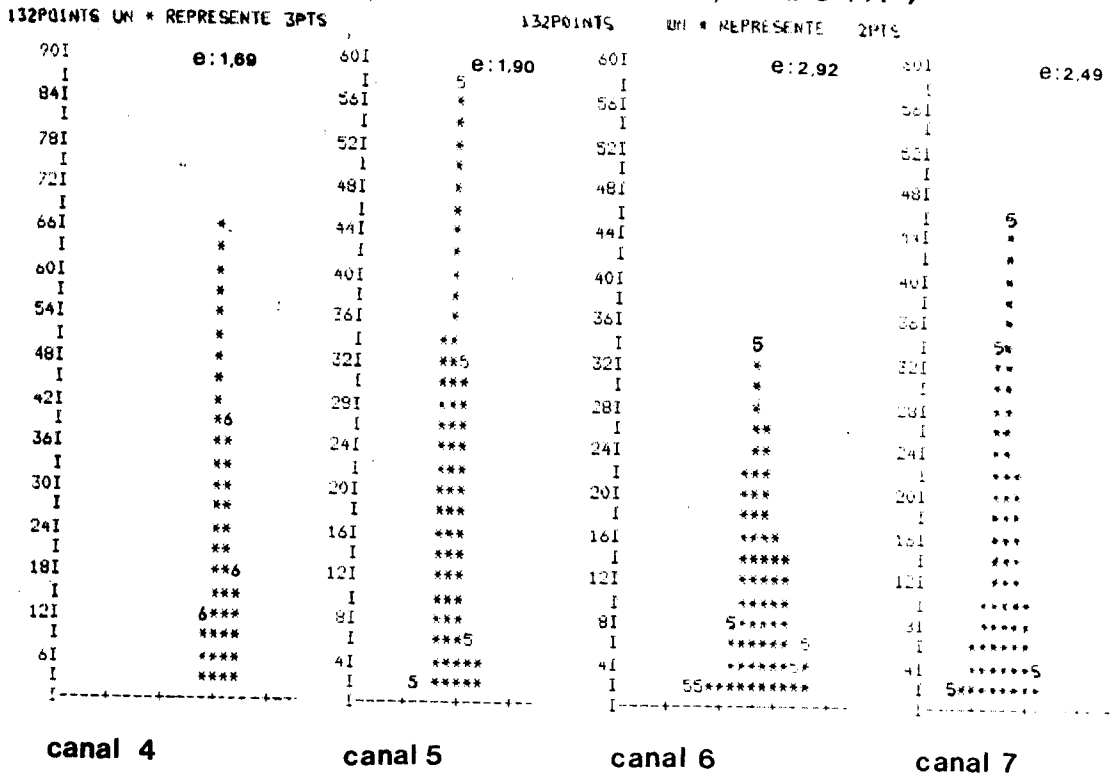


Figure 32

Exemples d'histogrammes des valeurs de Luminance dans les canaux 5 et 7 de quelques écotopes (e = entropie).



ECOTOPE N°2 (Chêne vert : B , ombre : A)



ECOTOPE N°7 (Chêne vert sans ombre)

Figure 33
 Mise en évidence de l'influence des zones d'ombre dans la réponse spectrale d'un écotope. On remarque les deux pics dans les canaux 6 et 7 de l'écotope n° 2, qui correspondent, A : à l'ombre, B : au Chêne vert. (e = entropie).

D'une façon générale et en se référant aux *figures 34 à 38* on remarque :

- pour chacune des classes un déplacement progressif du canal 4 au canal 7, de l'ensemble de la distribution vers les niveaux de luminance les plus bas ;
- la convergence des valeurs observées dans le canal 7 pour les différentes classes ;
- la plus grande diversité des niveaux observés dans les canaux 5 et 6 ;
- que les plus faibles valeurs de luminance sont observées dans le canal 7 pour la classe 1 (*zones aquatiques*) et les valeurs les plus fortes le sont pour la classe 3 (*zones de roche affleurante*) dans les canaux 5 et 6 ;
- que les réponses spectrales les plus dispersées et les plus hétérogènes sont celles des classes 2 et 3 dans les canaux 5 et 6 (*zones urbaines, zones de roche affleurante*).

Les distributions dissymétriques ou à tendance multimodale des valeurs de luminance peuvent résulter, soit de réponses spectrales fluctuantes au niveau des unités de résolution qui composent chaque écotope, soit de l'hétérogénéité relative des classes qui regroupent alors un lot hétéroclite d'écotopes homogènes.

Ainsi, par référence aux histogrammes de chacun des écotopes, on est en mesure d'expliquer les pics observés dans les distributions des classes 1, 2, 4 et 5 comme, par exemple :

- *figure 34* : le pic A dans les canaux 4 et 5 dû à l'eau des zones littorales,
- *figure 35* : le pic B dans les canaux 4, 5 et 6 dû aux agglomérations de la Paillade et de Frontignan,
- *figure 37* : le pic C dans le canal 5 dû à l'influence de la végétation (friches),
- *figure 38* : ici apparaît l'influence des végétaux ligneux hauts comme le Pin d'Alep et le Chêne vert (valeurs les plus faibles : pic D), puis respectivement du Romarin, Chêne kermès, Genévrier oxy-cèdre (pic E), le Brachypode rameux (pic F), les zones à végétation très claire (pic G).

690POINTS	UN * REPRESENTE	6PTS	CANAL 4	690POINTS	UN * REPRESENTE	10PTS	CANAL 5
180I	1			300I			
I	*			I	*		
168I	5*			280I	*		
I	**5			I	*		
156I	***			260I	*		
I	***			I	*		
144I	***			240I	*		
I	***			I	*		
132I	***			220I	*		
I	***			I	**		
120I	***			200I	**		
I	***			I	**		
108I	***			180I	**		
I	***			I	**		
96I	***			160I	**		
I	***			I	**		
84I	***			140I	**		
I	****			I	**		
72I	****			120I	**		
I	****			I	**2		
60I	****			100I	***		
I	****			I	***		
48I	****			80I	***		
I	****			I	***		
36I	****1 A			60I	***		
I	***** 3			I	***		
24I	6***** **			40I	*** 1 A		
I	***** **			I	*** *6		
12I	***** **			20I	***9**		
I	*****6**51 1 1			I	7*****21 1 1		

690POINTS	UN * REPRESENTE	12PTS	CANAL 6	690POINTS	UN * REPRESENTE	15PTS	CANAL 7
360I				450I	4		
I				I	*		
336I	8			420I	*		
I	*			I	*		
312I	*			390I	*		
I	*			I	*		
288I	*			360I	*		
I	*			I	*		
264I	*			330I	*		
I	*			I	*		
240I	*			300I	*		
I	*			I	*		
216I	*			270I	*		
I	*			I	*		
192I	**			240I	*		
I	**			I	*		
168I	**			210I	*		
I	**			I	5*		
144I	**			180I	**		
I	**5			I	**		
120I	***			150I	**		
I	***			I	**		
96I	***			120I	**		
I	***			I	**		
72I	***			90I	**		
I	***			I	**		
48I	***			60I	**9		
I	***			I	***		
24I	****			30I	***		
I	2****5			I	***		

Figure 34

Histogramme des valeurs de luminance dans les quatre canaux.

Zones aquatiques : classe 1.

(A : eau du littoral)

320POINTS	UN * REPRESENTE	3P1S	CANAL 4	320POINTS	UN * REPRESENTE	2P1S	CANAL 5
84I				56I			
I				I			
78I				52I	*		
I				I	*		
72I				48I	*		
I	*			I	**		
66I	*3			44I	**		
I	**			I	** 5		
60I	**			40I	** *		
I	**			I	** *		
54I	**			36I	** *		
I	**			I	5** *		
48I	**			32I	*** *		
I	**			I	*** *		
42I	**			28I	*** *		
I	6***			I	*** *		
36I	****			24I	*** ***		
I	****6			I	*** 5***		
30I	*****6			20I	***5****		
I	*****			I	*****		
24I	*****			16I	*****		
I	***** B			I	***** *		
18I	***** *			12I	***** *		
I	***** *			I	***** *		
12I	***** *			8I	***** *		
I	6*****6*3			I	5***** **5		
6I	*****			4I	***** **5		
I	***** 6			I	5*****		
I				I			

320POINTS	UN * REPRESENTE	2P1S	CANAL 6	320POINTS	UN * REPRESENTE	4P1S	CANAL 7
56I				112I			
I	5			I			
52I	5 *			104I			
I	* 5*			I			
48I	** *			96I	*		
I	** *			I	*		
44I	** *			88I	*		
I	** *			I	*		
40I	** **			80I	*		
I	** **			I	*		
36I	** **			72I	*7		
I	** **			I	7**		
32I	** **			64I	***		
I	** **5			I	***		
28I	** ****			56I	***		
I	*****			I	***		
24I	5*****			48I	***		
I	*****			I	***		
20I	*****			40I	****		
I	*****			I	****		
16I	*****			32I	****		
I	***** 5B			I	7****		
12I	***** *			24I	****		
I	5***** *			I	****		
8I	***** **			16I	****		
I	***** ** *			I	*****5		
4I	5*****5** *			8I	*****		
I	555*****			I	2 *****		
I				I			

Figure 35

Histogramme des valeurs de luminance dans les quatre canaux.

Zones urbaines : classe 2.

(B : La Paillade et Frontignan).

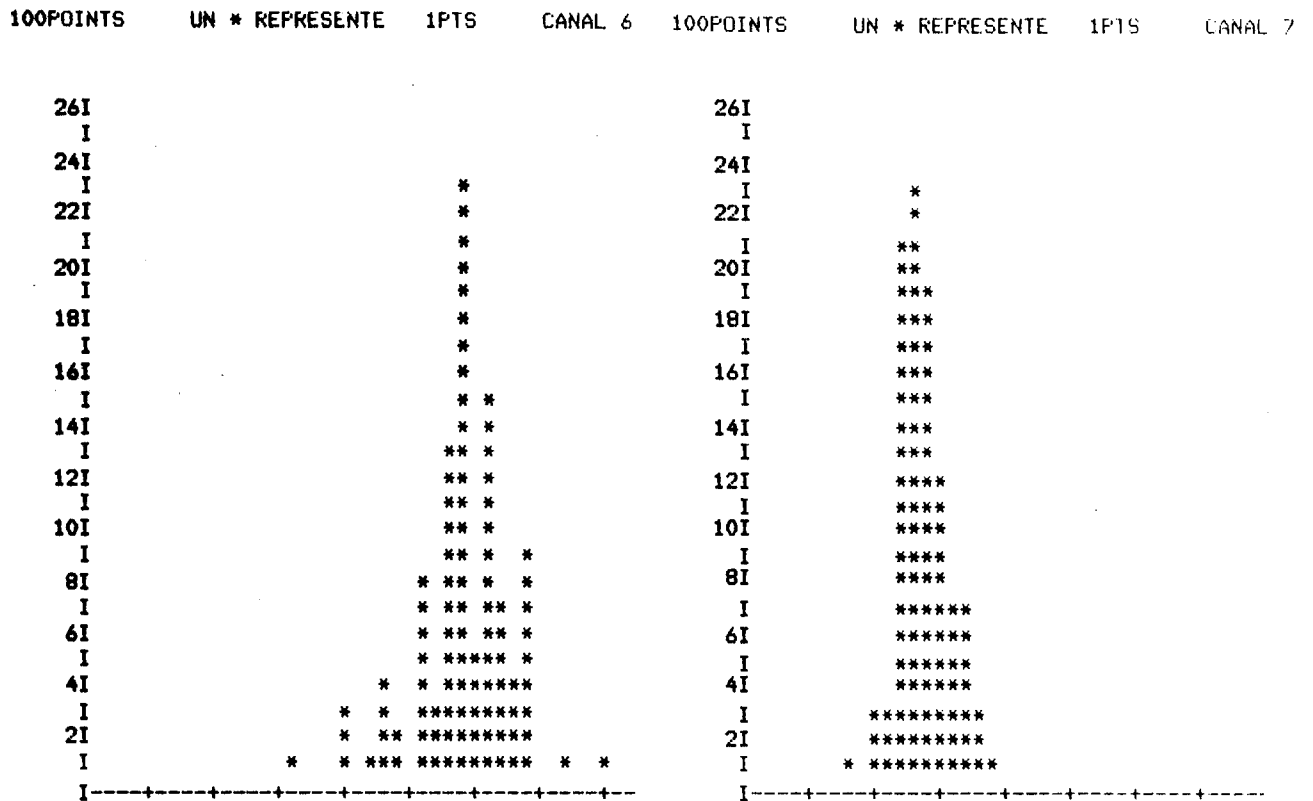
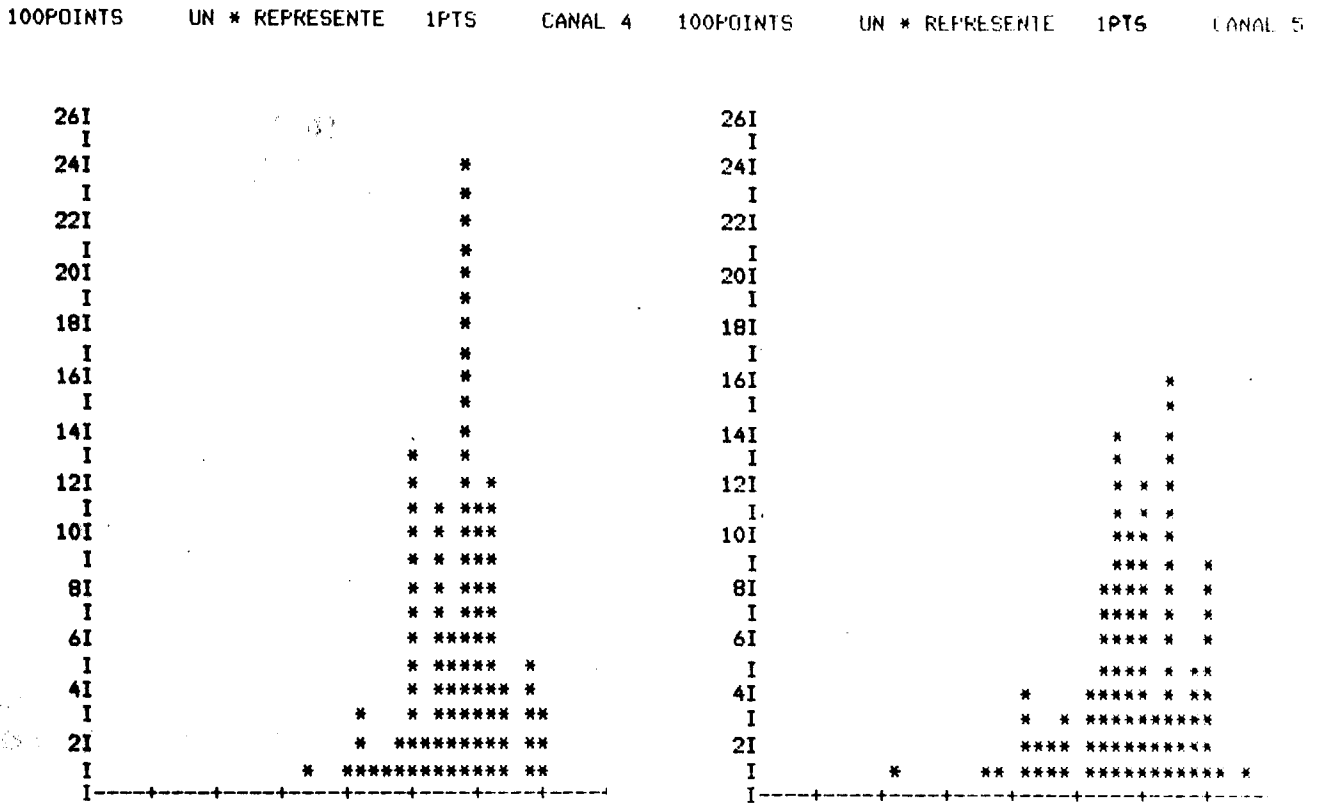


Figure 36

Histogramme des valeurs de luminance dans les quatre canaux.
Zones de roche affleurante : classe 3.

254POINTS	UN * REPRESENTE	3PTS	CANAL 4	254POINTS	UN * REPRESENTE	2PTS	CANAL 5
84I				56I			
I				I			
78I				52I	C		
I				I	5		
72I				48I	*		
I	6			I	* 5		
66I	*			44I	* *		
I	*			I	* *		
60I	*			40I	*5 *		
I	*			I	** *		
54I	*			36I	** *		
I	*			I	** *		
48I	***			32I	** *		
I	***			I	** *		
42I	***			28I	**5 *		
I	***			I	*** **		
36I	****			24I	**** **		
I	****			I	**** **5		
30I	****			20I	**** **		
I	****			I	**** **		
24I	*****			16I	****5***		
I	*****			I	*****		
18I	*****			12I	*****		
I	*****			I	*****		
12I	*****6			8I	*****		
I	6*****			I	*****		
6I	*****6			4I	5*****		
I	*****			I	***** 5		

254POINTS	UN * REPRESENTE	3PTS	CANAL 6	254POINTS	UN * REPRESENTE	4PTS	CANAL 7
84I				112I			
I				I	2		
78I				104I	*		
I	6			I	*		
72I	*			96I	*		
I	*			I	*		
66I	*			88I	*		
I	*			I	*		
60I	*3			80I	*		
I	**			I	*		
54I	**			72I	*2		
I	**			I	**		
48I	**			64I	**		
I	**			I	**		
42I	** *			56I	2**		
I	** *			I	***		
36I	** *			48I	***		
I	** *			I	***		
30I	** *			40I	***		
I	3** *			I	***		
24I	*** *			32I	***		
I	*** *			I	***		
18I	*** *			24I	***5		
I	****6*3			I	****		
12I	*****			16I	****		
I	6*****			I	****		
6I	*****			8I	****		
I	*****3*3			I	7****5		

Figure 37

Histogramme des valeurs de luminance dans les quatre canaux.
 Zones de sol nu (vignes en hiver) : classe 4.
 (C : végétation).

1736POINTS	UN * REPRESENTE	15PTS	CANAL 4	1736POINTS	UN * REPRESENTE	15PTS	CANAL 5
450I				450I	D		
I	D			I	8		
420I	*			420I	*		
I	*			I	*		
390I	*			390I	*		
I	*			I	*2		
360I	*			360I	**		
I	2*			I	**		
330I	**			330I	**		
I	**			I	**		
300I	**			300I	**		
I	**			I	**		
270I	**			270I	**		
I	**			I	**		
240I	4**			240I	**		
I	***			I	**		
210I	***			210I	**		
I	***			I	**		
180I	***			180I	**		
I	*** 3 E			I	**		
150I	***9*2			150I	**		
I	*****			I	**		
120I	*****			120I	** E		
I	*****			I	3**7 89		
90I	*****			90I	****46**5		
I	*****5 F			I	*****		
60I	***** 2			60I	*****4 F		
I	*****1 *			I	*****2 3		
30I	3*****3*4 *			30I	*****1 *5*4 G		
I	2 1*****4*89445 1			I	*****8*****5979222		
I				I			

1736POINTS	UN * REPRESENTE	7PTS	CANAL 6	1736POINTS	UN * REPRESENTE	13PTS	CANAL 7
210I	D			390I			
I	4			I	*		
196I	*			364I	*		
I	4*			I	*		
182I	**			338I	*		
I	**			I	*		
168I	***			312I	*		
I	***			I	*		
154I	***			286I	*		
I	*** E			I	*9		
140I	*** 1			260I	**		
I	*** *			I	6**		
126I	*** 7*2			234I	***		
I	8*** ***			I	***		
112I	5*** ***			208I	***		
I	***** ***			I	***		
98I	*****1***1			182I	***		
I	*****			I	***2		
84I	*****			156I	6****		
I	*****			I	*****		
70I	7*****			130I	*****1		
I	*****			I	*****		
56I	*****			104I	*****		
I	2*****			I	*****		
42I	***** 5			78I	5*****		
I	***** * F			I	*****		
28I	***** * 7 2			52I	*****9		
I	*****7** * * 21			I	6*****		
14I	1*****8*28*4**12 G			26I	*****4613**3		
I 11	4*****1114			I	3*****92		
I				I			

Figure 38

Histogramme des valeurs de luminance dans les quatre canaux.

Zones de végétation : classe 5;

(D : Pin d'Alep et Chêne vert ; E : Romarin, Chêne kermès, Genévrier oxycèdre ;

F : Brachypode rameux ; G : zones de végétation très claire).

En revanche, il n'en est pas de même pour la classe 3 correspondant aux zones de roche affleurante (*figure 36*), dont l'hétérogénéité constitue une caractéristique. On ne peut attribuer *a priori* l'augmentation des fréquences d'observations d'un ou de plusieurs niveaux de luminance à la réponse spectrale d'une unité particulière car tous les écotopes de cette classe présentent les mêmes caractéristiques.

L'examen des histogrammes des sous-classes d'écotopes révèle une plus grande homogénéité des réponses spectrales : les subdivisions introduites sont apparemment justifiées puisqu'elles conduisent à une moindre dispersion des niveaux de luminance ; il reste cependant à vérifier que les signatures observées pour les différentes sous-classes sont suffisamment distinctes pour autoriser une reconnaissance automatique facile.

4.4.3.2. Les courbes des réponses spectrales

Les courbes des réponses spectrales sont la représentation graphique des indicateurs de luminance dans les quatre canaux, des sous-classes ou classes d'écotopes. Les indicateurs considérés ici sont les paramètres statistiques décrits au paragraphe 4.4.3.1., en particulier mode, médiane et moyenne.

Les *figures 39 à 44* présentent la comparaison des valeurs prises par ces 3 paramètres, pour les classes d'écotopes et certaines des sous-classes retenues.

On constate que la typologie des courbes n'est pas modifiée par le choix du paramètre de caractérisation. Les seuls écarts importants constatés concernent les sous-classes des zones urbaines et la sous-classe de Buis (*figures 41 et 44*). Dans les deux cas, il s'agit en fait de zones hétérogènes qui combinent des éléments de végétation et des éléments à fort pouvoir réflecteur (roche affleurante ou matériaux de construction) ; il s'ensuit des réponses spectrales caractérisées par des niveaux de luminance élevés dans tous les canaux et surtout, relativement dispersés : l'emploi de la médiane ou du mode comme indicateur est alors préférable.

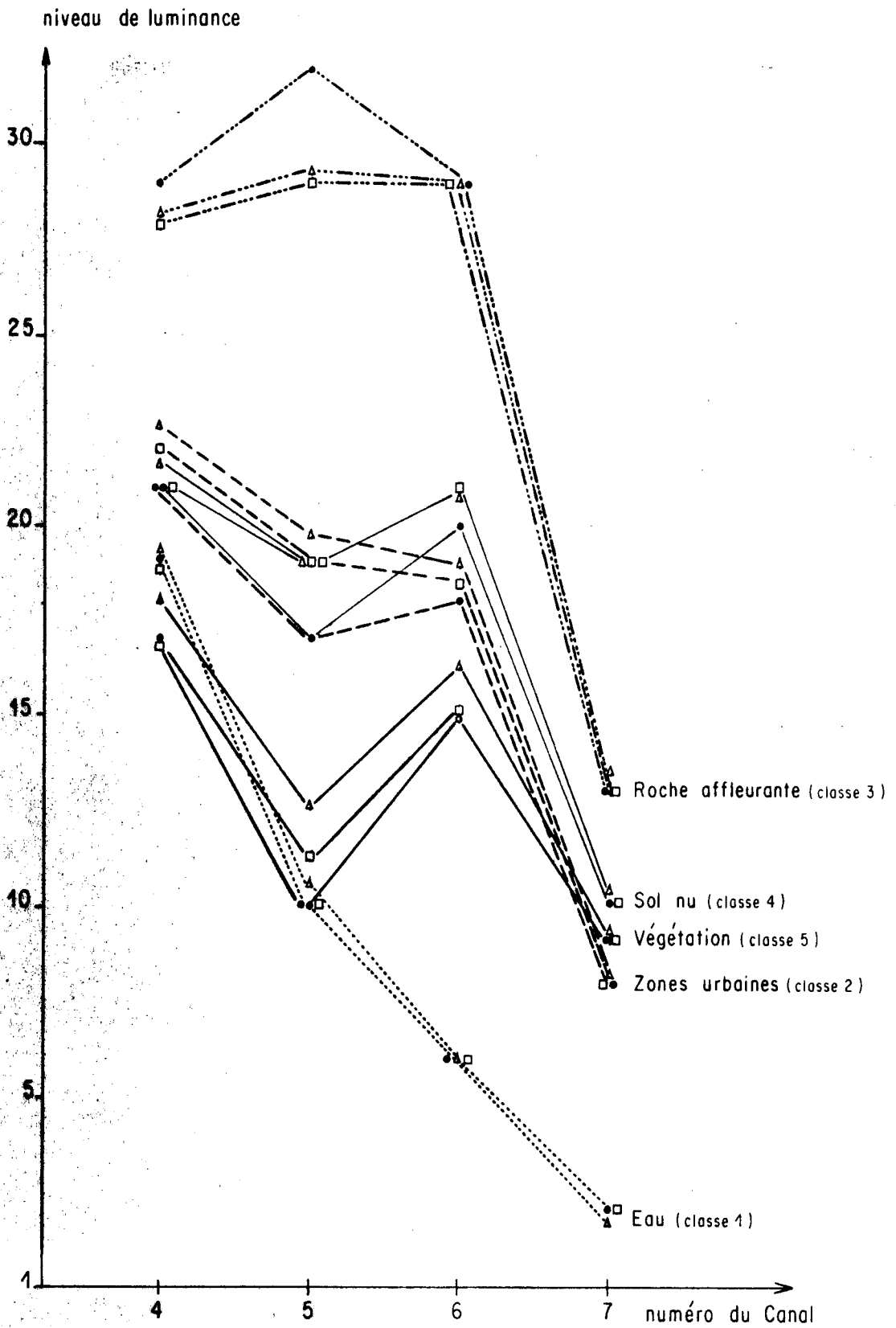


Fig. 39

Comparaison des courbes des réponses spectrales obtenues à partir des moyennes, modes et médianes des 5 classes d'écotopes. (Δ moyenne, \square médiane, \bullet mode).

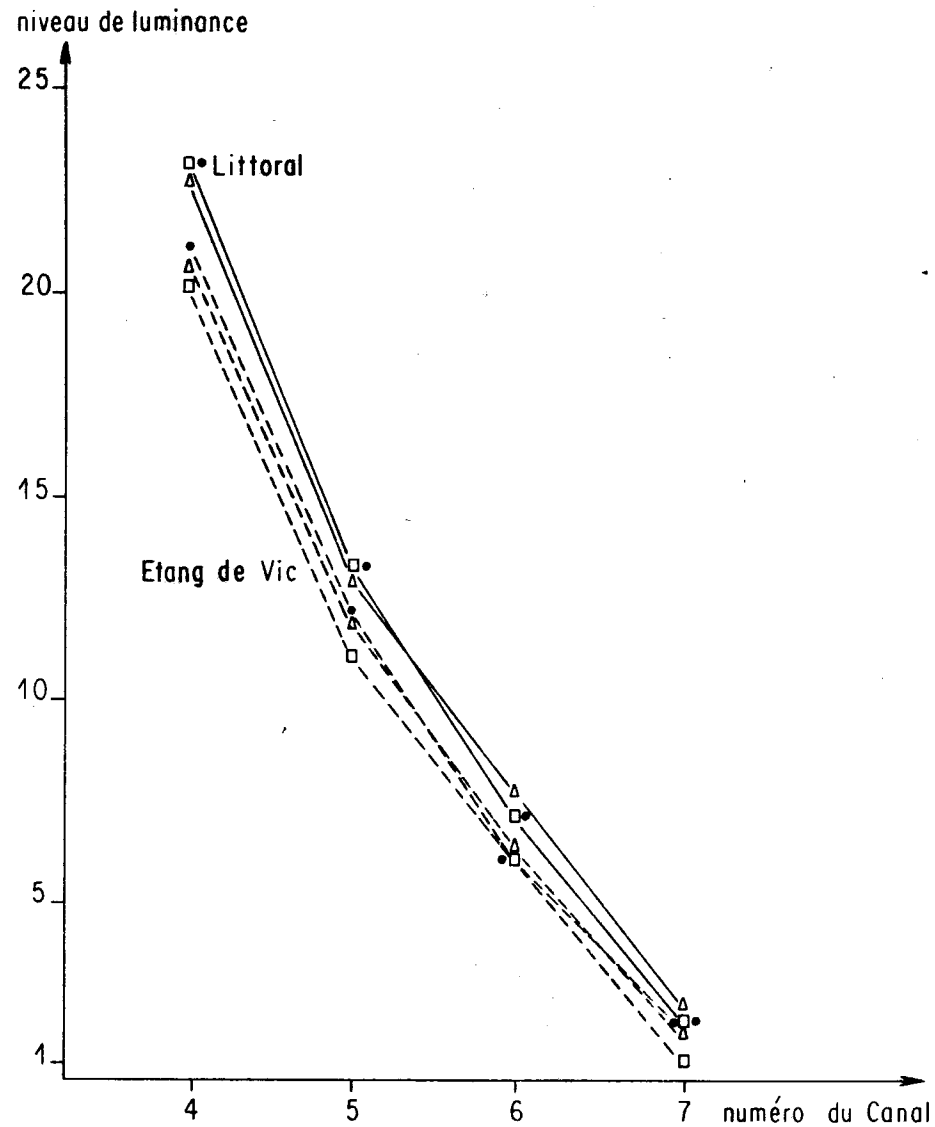
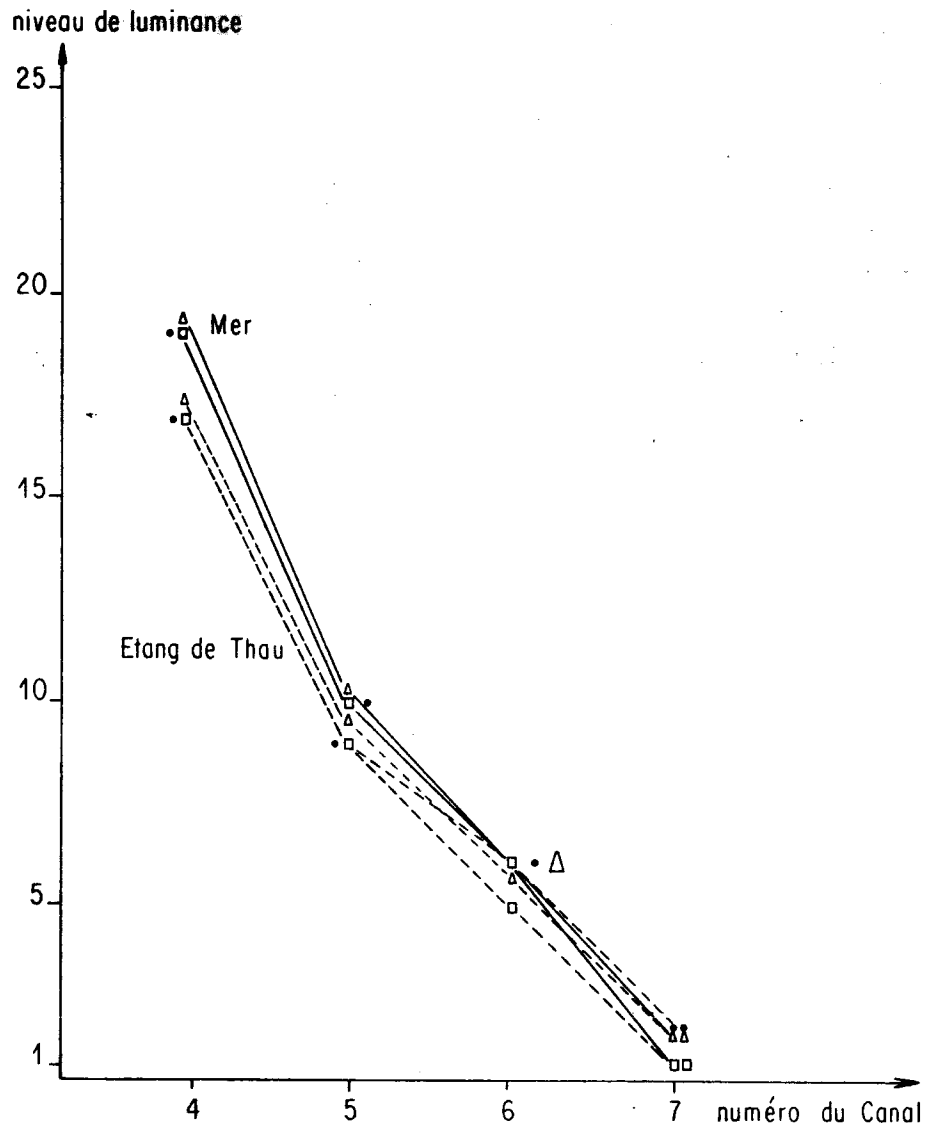


Fig. 40

Comparaison des courbes des réponses spectrales obtenues à partir des moyennes, modes et médianes des sous-classes d'écotopes. Zones aquatiques, classes 1. (Δ moyenne, □ médiane, • mode).

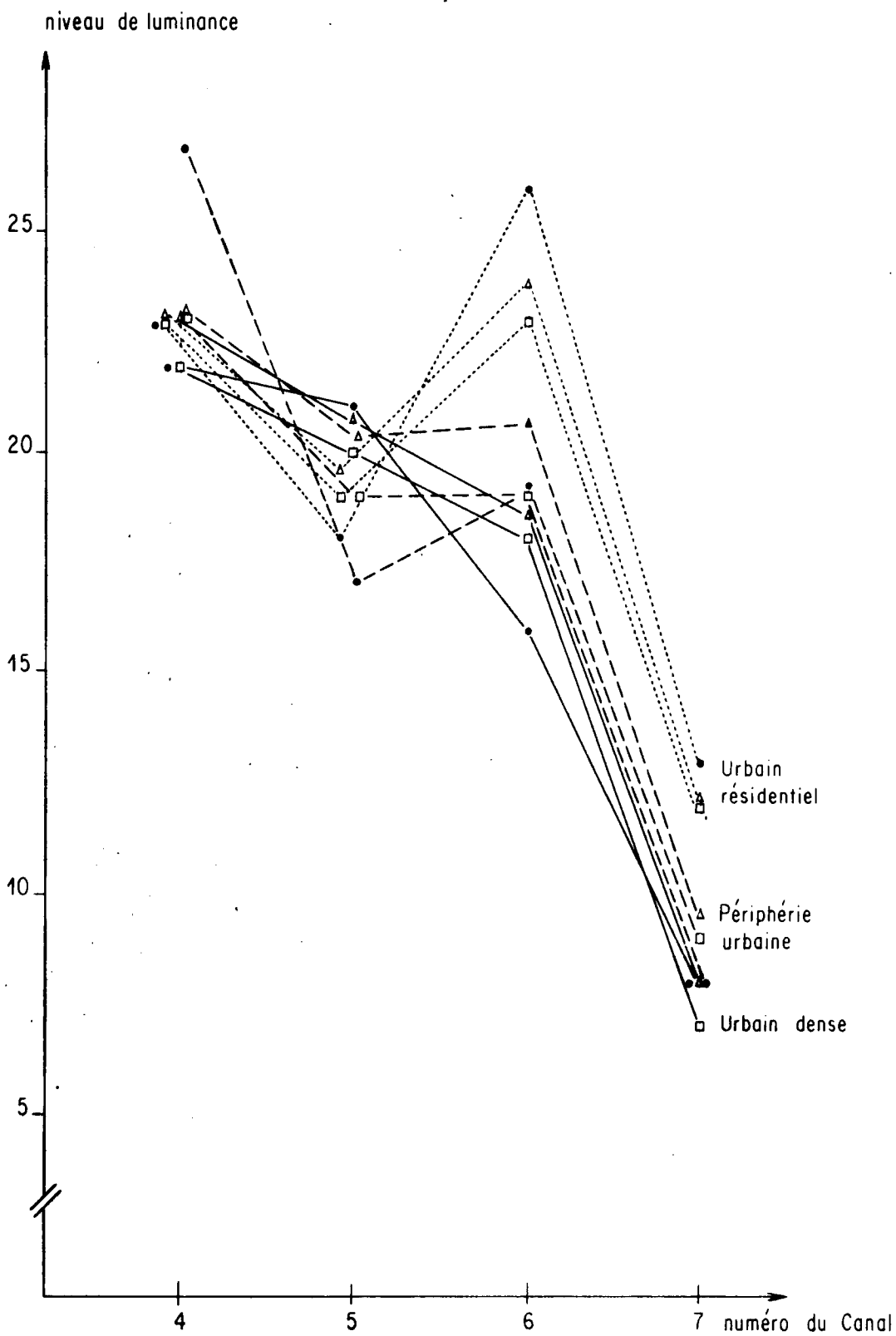


Fig. 41

Comparaison des courbes des réponses spectrales obtenues à partir des moyennes, modes et médianes des sous-classes d'écotopes. Zones urbaines, classe 2. (Δ moyenne, □ médiane, ● mode).

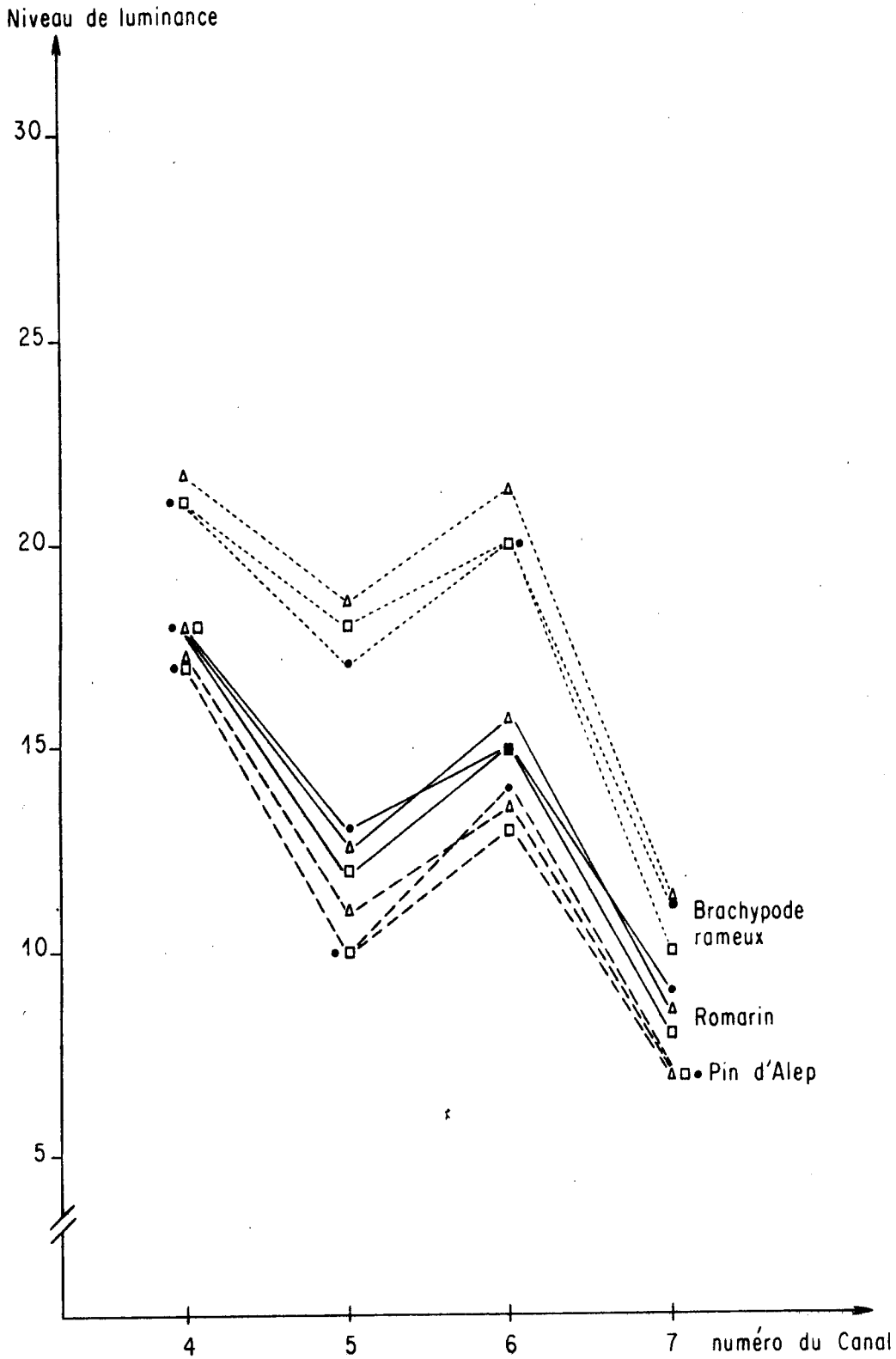


Fig. 42

Comparaison des courbes des réponses spectrales obtenues à partir des moyennes, modes et médianes des sous-classes d'écotopes. Zones de végétation, classe 5. (Δ moyenne, \square médiane, \bullet mode).

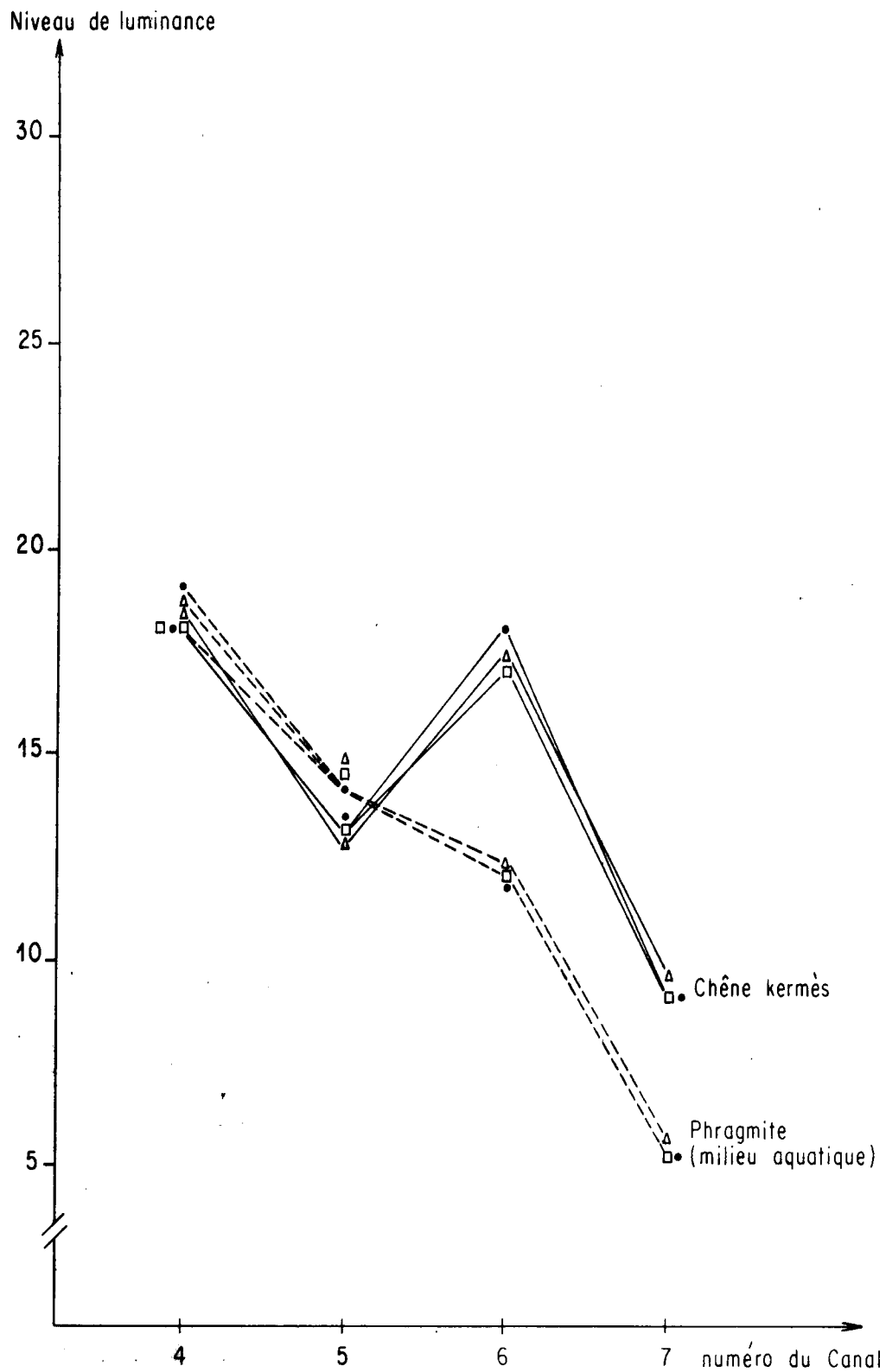


Fig. 43

Comparaison des courbes des réponses spectrales obtenues à partir des moyennes, modes et médianes des sous-classes d'écotopes. Zones de végétation, classe 5. (Δ moyenne, \square médiane, \bullet mode).

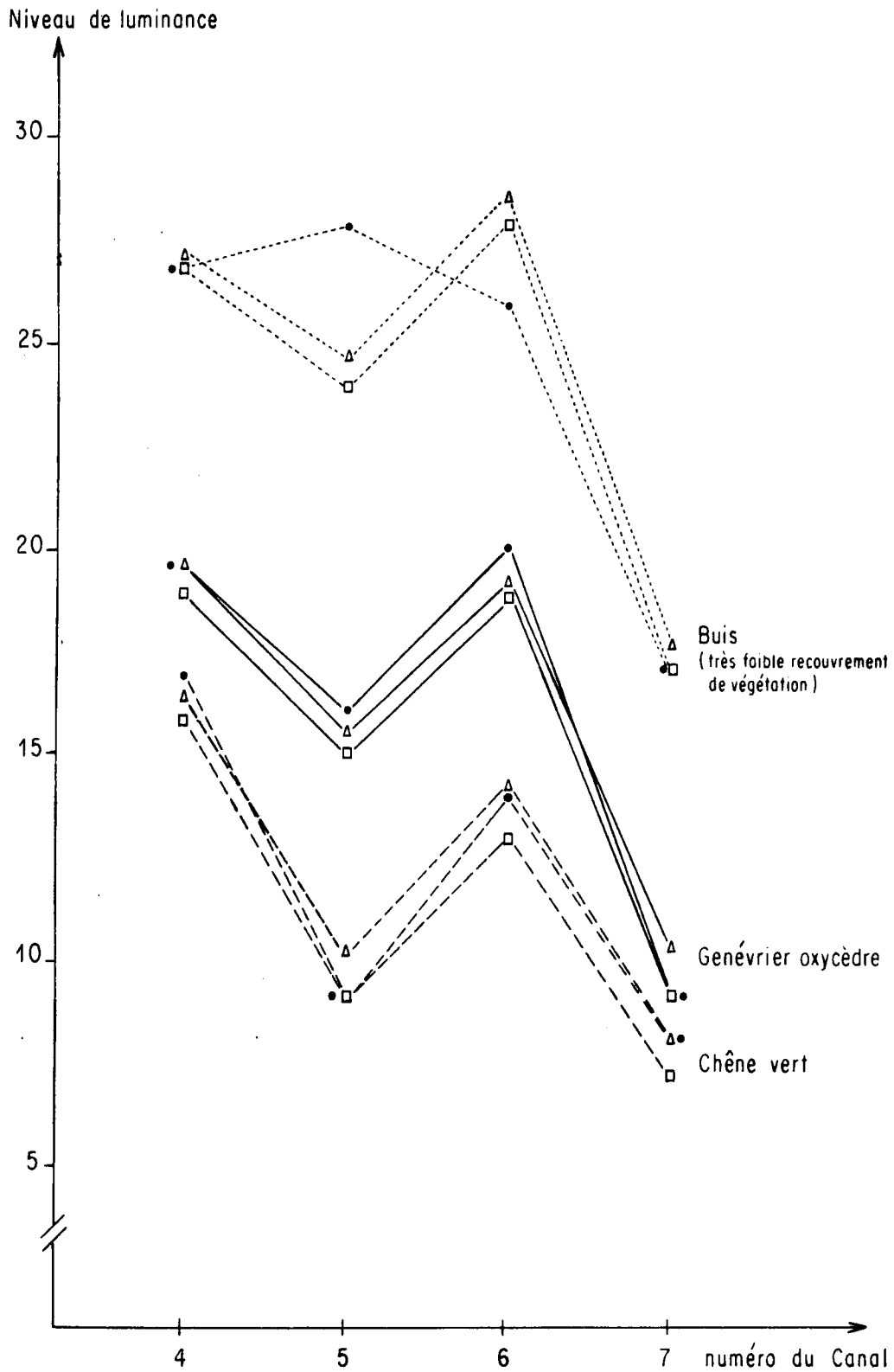


Fig. 44

Comparaison des courbes des réponses spectrales obtenues à partir des moyennes, modes et médianes des sous-classes d'écotopes. Zones de végétation, classe 5. (Δ moyenne, □ médiane, ● mode).

Etant donné l'ensemble des résultats (*fig. 39 à 44*), nous conserverons cependant dans la suite la moyenne comme indicateur de luminance. Nous allons donc examiner successivement les courbes de réponses moyennes des classes et des sous-classes d'écotopes.

4.4.3.2.1. Courbes de réponse spectrale moyenne des classes :

Les courbes des réponses spectrales des 5 grandes classes s'organisent selon un gradient qui est fonction de l'intensité captée dans chaque canal et s'individualisent par leur forme (*figure 45*).

Bien que les courbes des classes 1 (zones aquatiques) et 3 (zones de roche affleurante) prennent les valeurs extrêmes d'intensité, aucune des courbes ne s'individualise totalement des autres par des intensités nettement différentes dans les 4 canaux. C'est la comparaison des valeurs de luminance dans les quatre canaux et de la typologie des courbes qui fournit le plus de renseignements.

Il est possible de distinguer 3 types de courbes caractérisées par leur pente dans les 3 premiers canaux ; la pente étant toujours négative du canal 6 au canal 7 quelle que soit la classe. La typologie est la suivante :

a) une pente toujours négative du canal 4 au canal 7 : le niveau moyen de luminance est de plus en plus faible ; c'est le cas des classes 1 (zones aquatiques) et 2 (zones urbaines) qui se différencient toutefois :

- . par une pente plus forte pour la classe 1
- . par un niveau d'intensité plus élevé pour la classe 2.

b) une pente positive, puis voisine de 0, puis négative, du canal 4 au canal 7 :

le niveau moyen de luminance est plus élevé dans le canal 5 que dans le canal 4 ; il reste sensiblement le même dans le canal 6 pour décroître ensuite fortement ; c'est le cas de la classe 3 (zones de roche affleurante).

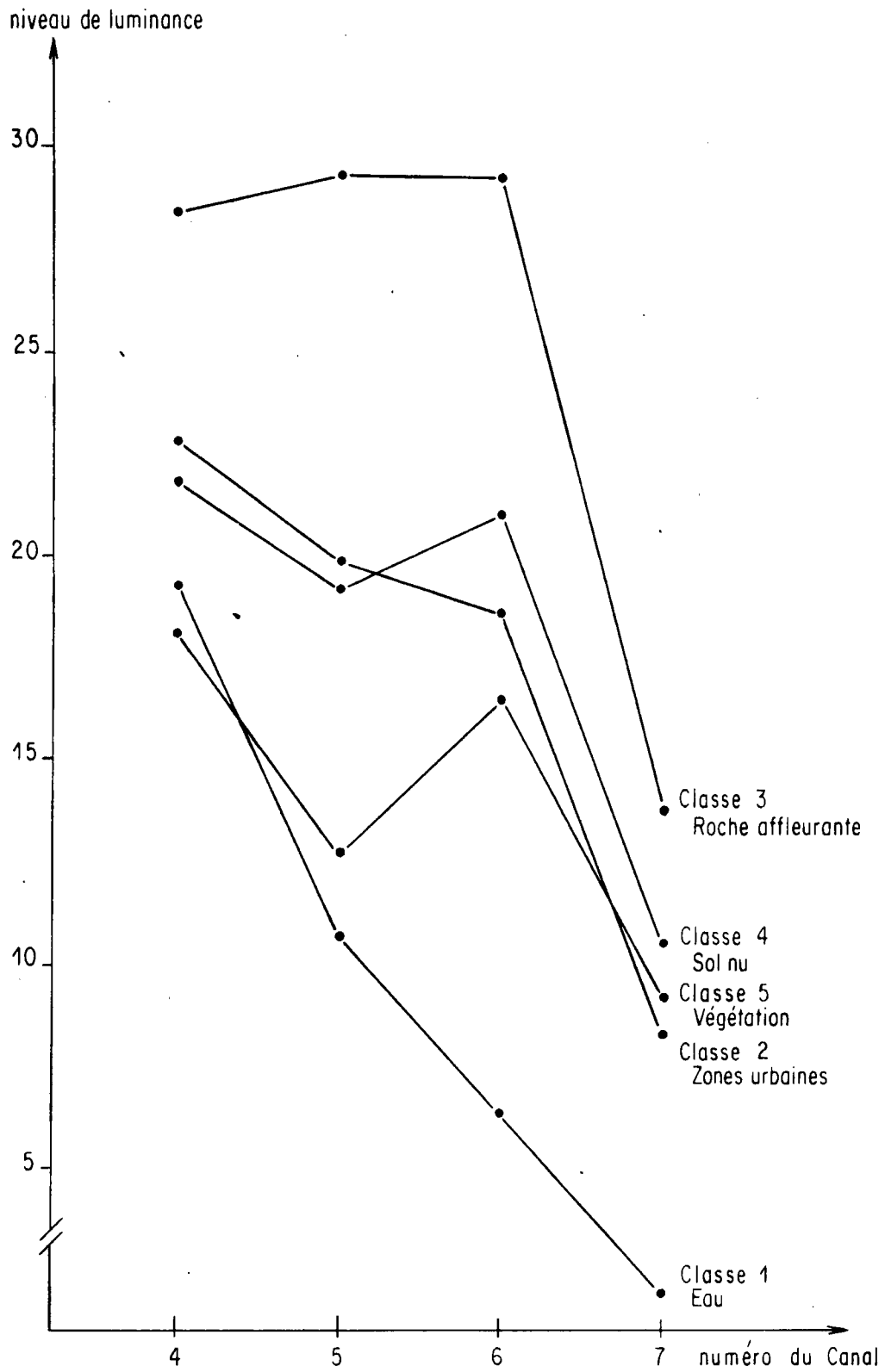


Fig. 45

Valeurs moyennes des réponses spectrales des 5 classes d'écotopes.

c) une pente négative, puis positive et à nouveau négative du canal 4 au canal 7 : le niveau moyen de luminance est plus faible dans le canal 5 que dans les canaux 4 et 6 ; c'est le cas des classes 4 et 5 (zones de "sol nu" et de végétation) dont on remarquera l'homothétie des courbes.

4.4.3.2.2. Comparaison des réponses spectrales des sous-classes :

Classe 1- zones aquatiques : Les courbes des réponses spectrales moyennes des 4 sous-classes d'eau ont la même forme ; la seule différence observée est une différence d'intensité (*figure 46*).

On remarque le gradient étang de Thau - mer - étang de Vic - littoral et la place de la courbe de l'étang de Thau. Si la profondeur de l'eau était seule responsable de l'abaissement du niveau moyen de l'énergie captée, la courbe de l'étang de Thau se situerait près de celle de l'étang de Vic, entre l'eau peu profonde du littoral et la mer. La turbidité, la qualité et les caractéristiques superficielles de la zone aquatique prennent donc une part importante, difficile à définir dans l'absolu.

Les différences entre les "types d'eau" sont plus accentuées dans les canaux 4 et 5 qui sont potentiellement les plus discriminants pour ces sous-classes.

Classe 2- zones urbaines : C'est la classe la plus complexe ; car, contrairement aux classes 1, 3, 4 et 5, on observe des variations dans la typologie des courbes de chacune des sous-classes (*figure 47*). Les 3 sous-classes se différencient par l'apparition graduelle d'un minimum dans le canal 5, caractéristique de l'augmentation de la végétation dans les différents types d'urbanisation considérés. On observe :

- une pente toujours négative (pas de minimum) pour l'urbain dense (Centre de Montpellier, Frontignan, La Paillade Sud, Sète-Est) ;
- un infléchissement de la courbe dans le canal 5 pour les périphéries urbaines ou zones d'urbanisation moins dense : Montpellier (Ouest), Balaruc, La Paillade Nord ;
- un creux dans la courbe au niveau du canal 5 pour l'urbain résidentiel dont l'exemple est Sète (Ouest) où la présence de végétation plus importante influe sur la réponse spectrale. Cette dernière courbe est d'ailleurs plus proche des courbes de végétation que la courbe type urbain.

Classe 3- zones de roche affleurante : Cette classe n'a pas été subdivisée en raison du faible nombre d'échantillons et de l'homogénéité des réponses spectrales des écotopes qui la constituent (*figure 48*). La distinction entre les carrières et les zones dépourvues de végétation où le rocher (calcaire dur) affleure, n'est pas possible.

Classe 4- zones de sol nu : Compte tenu du nombre d'échantillons, cette classe aurait pu être subdivisée en un certain nombre de sous-classes caractéristiques d'unités. Cette distinction s'est révélée délicate et, de même que pour la classe 3, aucune différenciation ne permet de maintenir une telle division (*figure 49*) qu'il s'agisse d'alluvions, de marnes, de limons ou d'argiles. Sensiblement différentes en intensité dans chaque canal, les courbes homothétiques dans leur ensemble présentent un infléchissement dans le canal 5, dû à l'influence de la végétation ; l'imbrication de parcelles non cultivées et de parcelles cultivées (vignes en hiver) n'a pas permis de dissocier ces deux types d'unités sur les visualisations à l'imprimante. La typologie est semblable pour l'ensemble des courbes.

Classe 5- zones de végétation :

a) Les espèces dominantes (figure 50)

Toutes les courbes sont homothétiques et s'organisent selon un gradient d'intensité qui permet de les différencier. La seule exception concerne la zone de Phragmite qui en fait, est constituée d'une végétation localisée dans un milieu aquatique, d'où la forme de la courbe.

On constate que les différences d'intensité sont apparemment liées à la nature de l'espèce végétale dominante. Les niveaux de luminance les plus faibles sont observés dans le cas du Chêne vert (canaux 4 et 5) et du Pin d'Alep (canaux 6 et 7). Les niveaux de luminance les plus élevés dans tous les canaux correspondent aux zones herbacées (Brachypode rameux) et aux zones de ligneux bas à faible recouvrement par rapport au sol (Buis). Dans ces deux derniers cas, l'influence du facteur de luminance du sol sur la réponse enregistrée est certainement déterminante ; il faut noter néanmoins, la présence d'un minimum relatif dans le canal 5, qui permet de discriminer ces zones à faible couvert végétal des zones de la classe 3 totalement dépourvues de végétation.

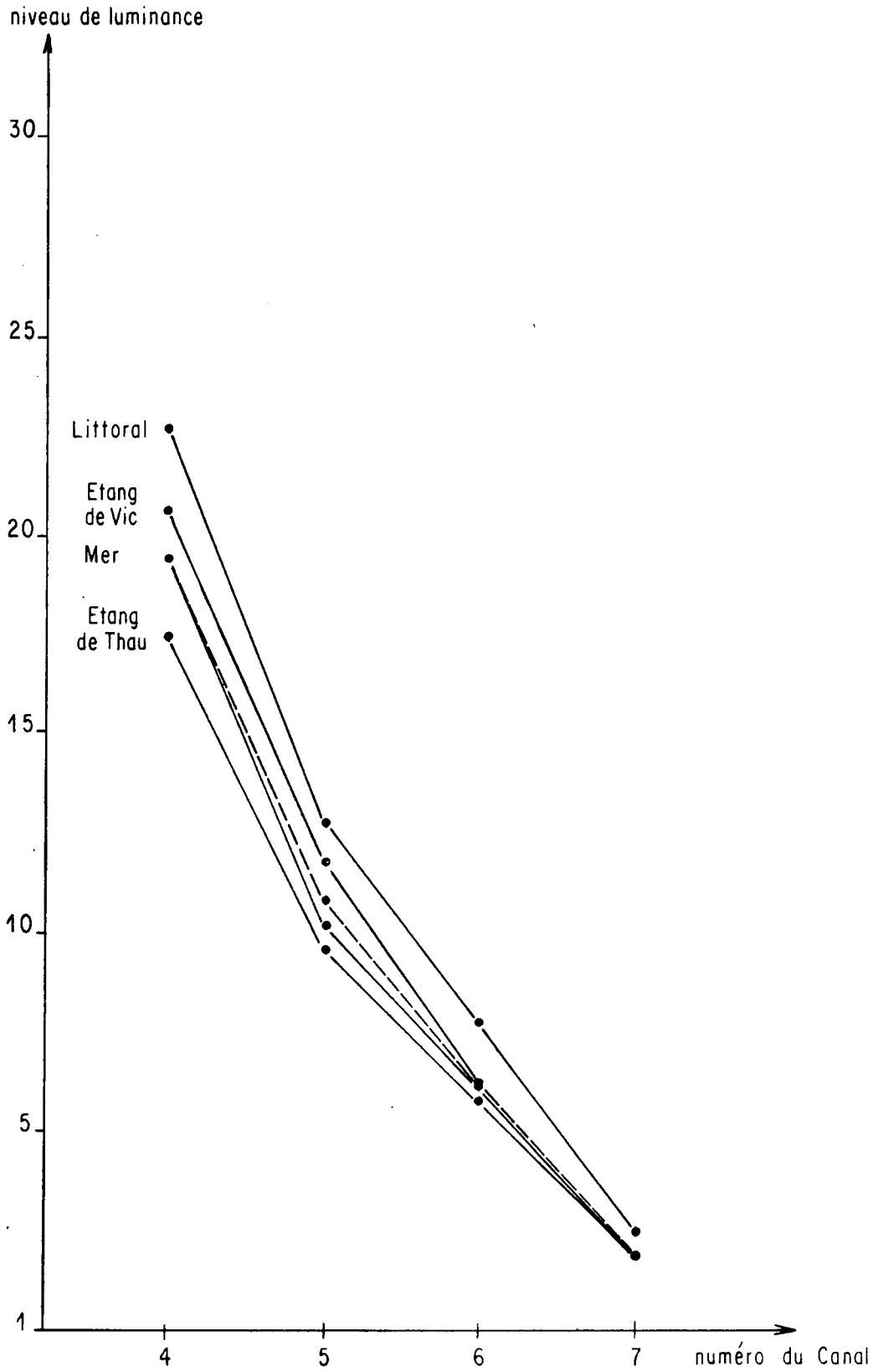


Fig. 46

Valeurs moyennes des réponses spectrales des sous-classes d'écotopes.
Classe 1: zones aquatiques. (en tiretés : courbe moyenne).

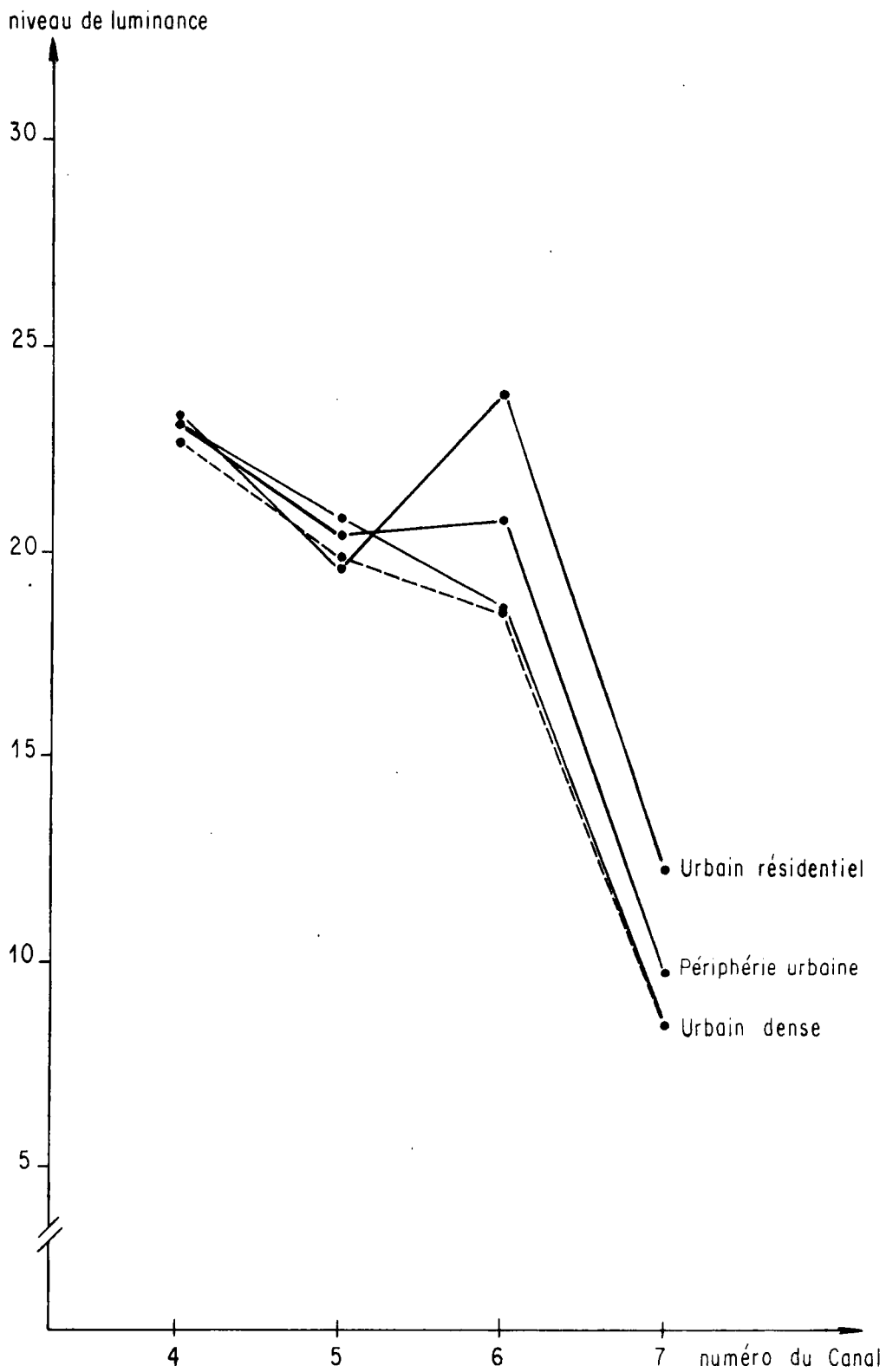


Fig. 47

Valeurs moyennes des réponses spectrales des sous-classes d'écotopes.
Classe 2 : zones urbaines. (en tiretés : courbe moyenne).

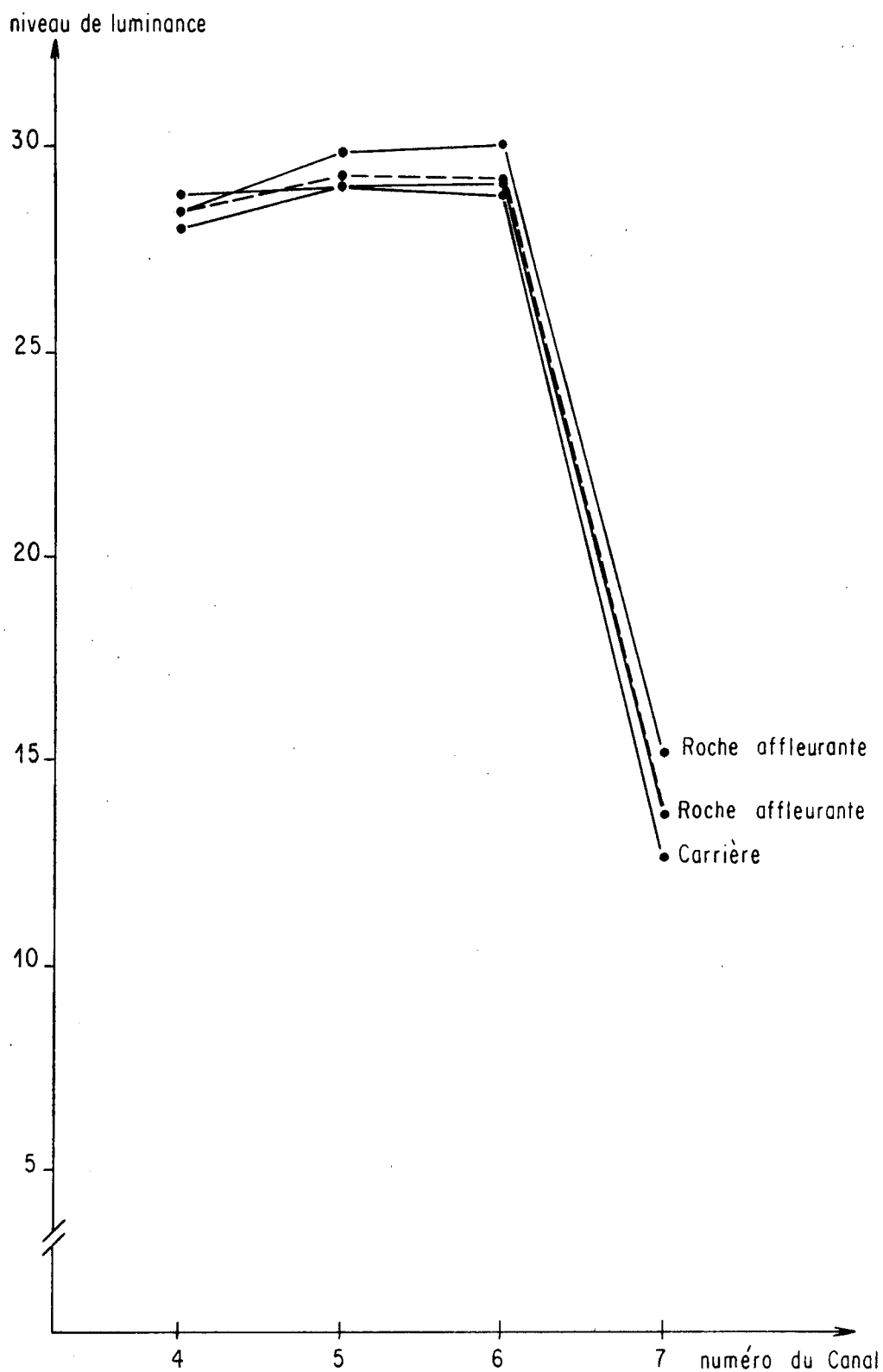


Fig. 48

Valeurs moyennes des réponses spectrales des écotopes.
Classe 3 : zones de roche affleurante.
(en tiretés : courbe moyenne).

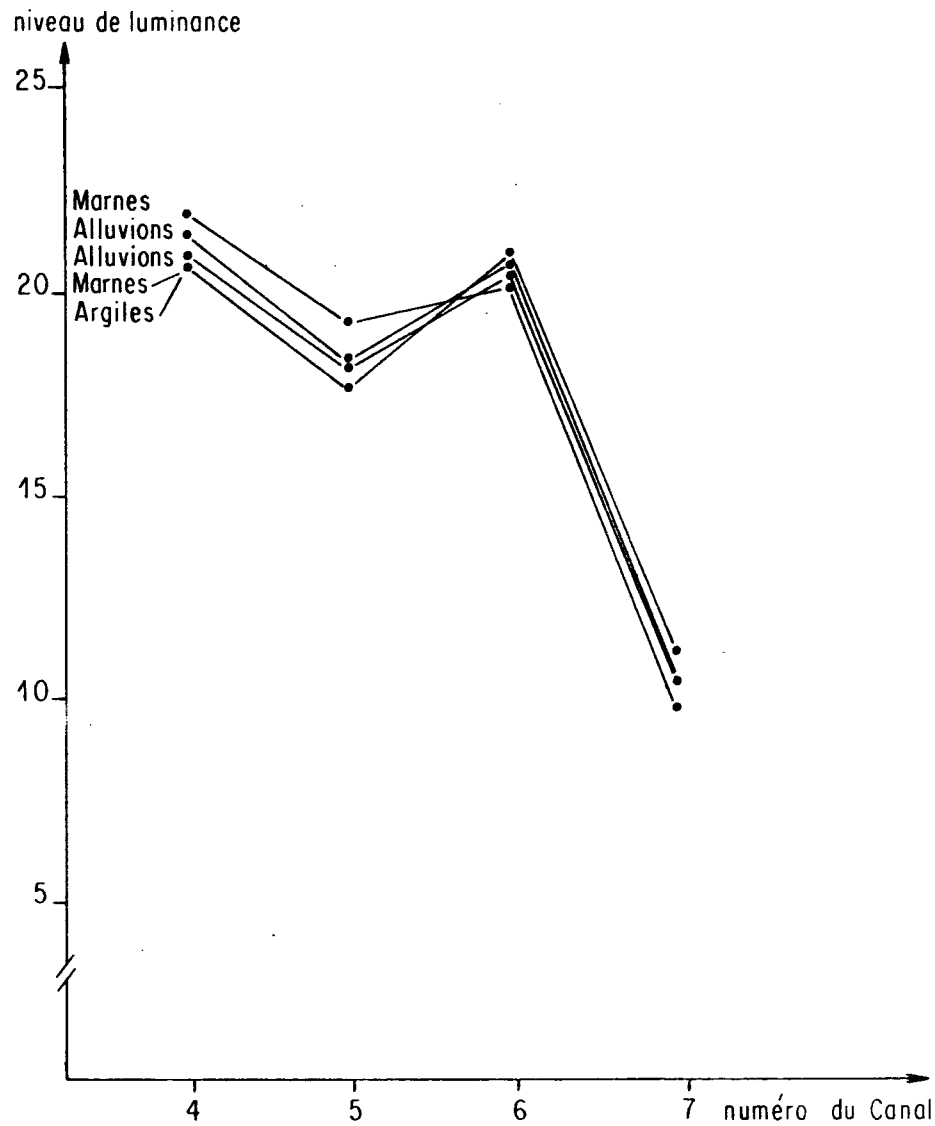
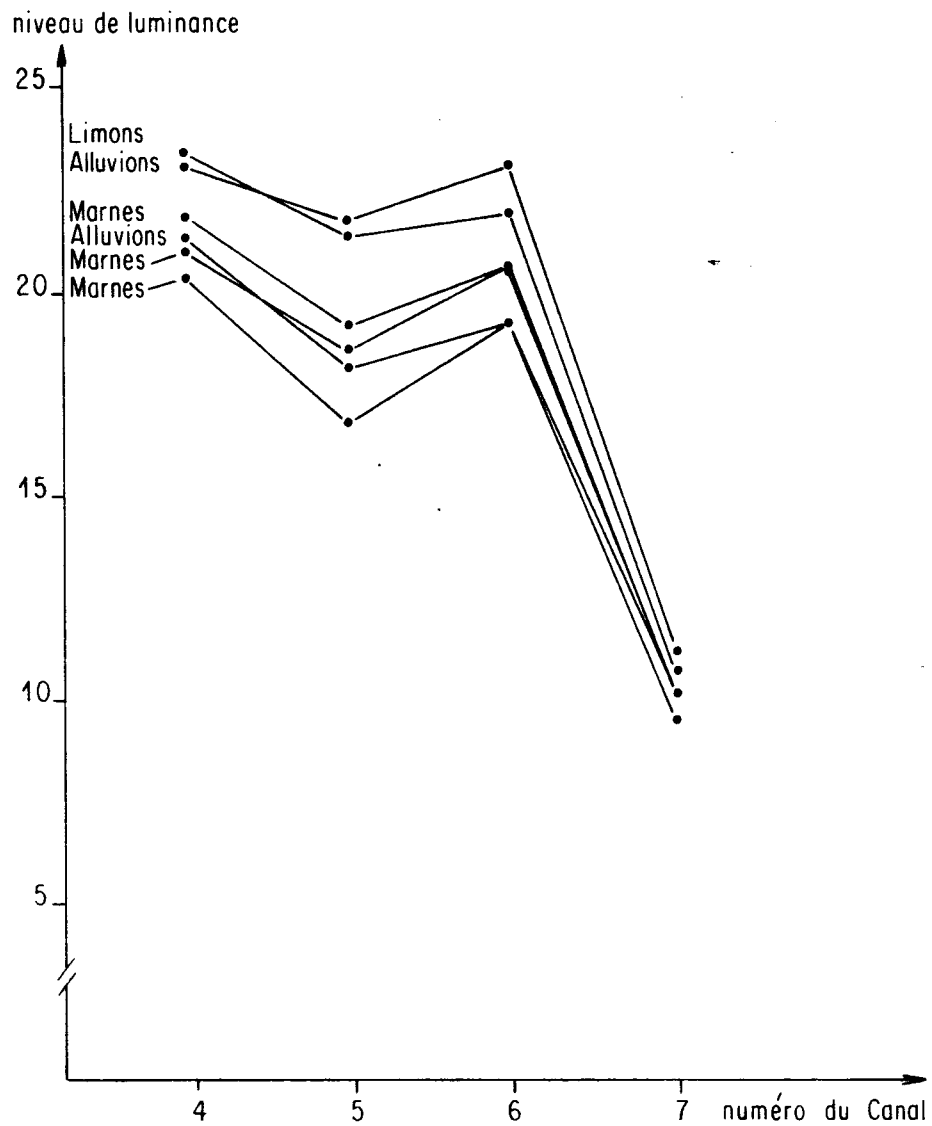


Fig. 49

Valeurs moyennes des réponses spectrales des écotopes. Classe 4: zones de sol nu.

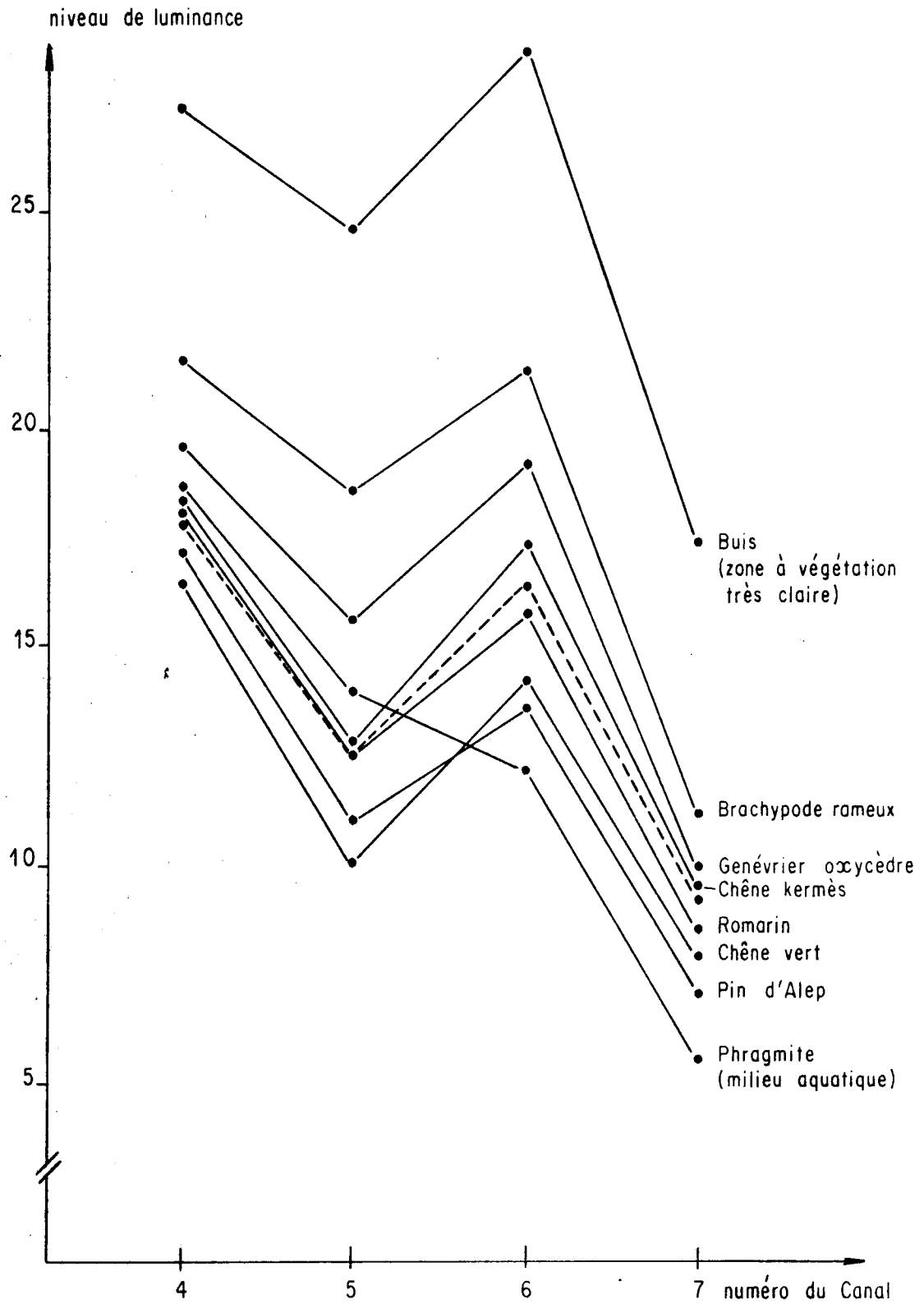


Fig. 50

Valeurs moyennes des réponses spectrales des sous-classes d'écotopes.
Classe 5: zones de végétation. (en tiretés : courbe moyenne).

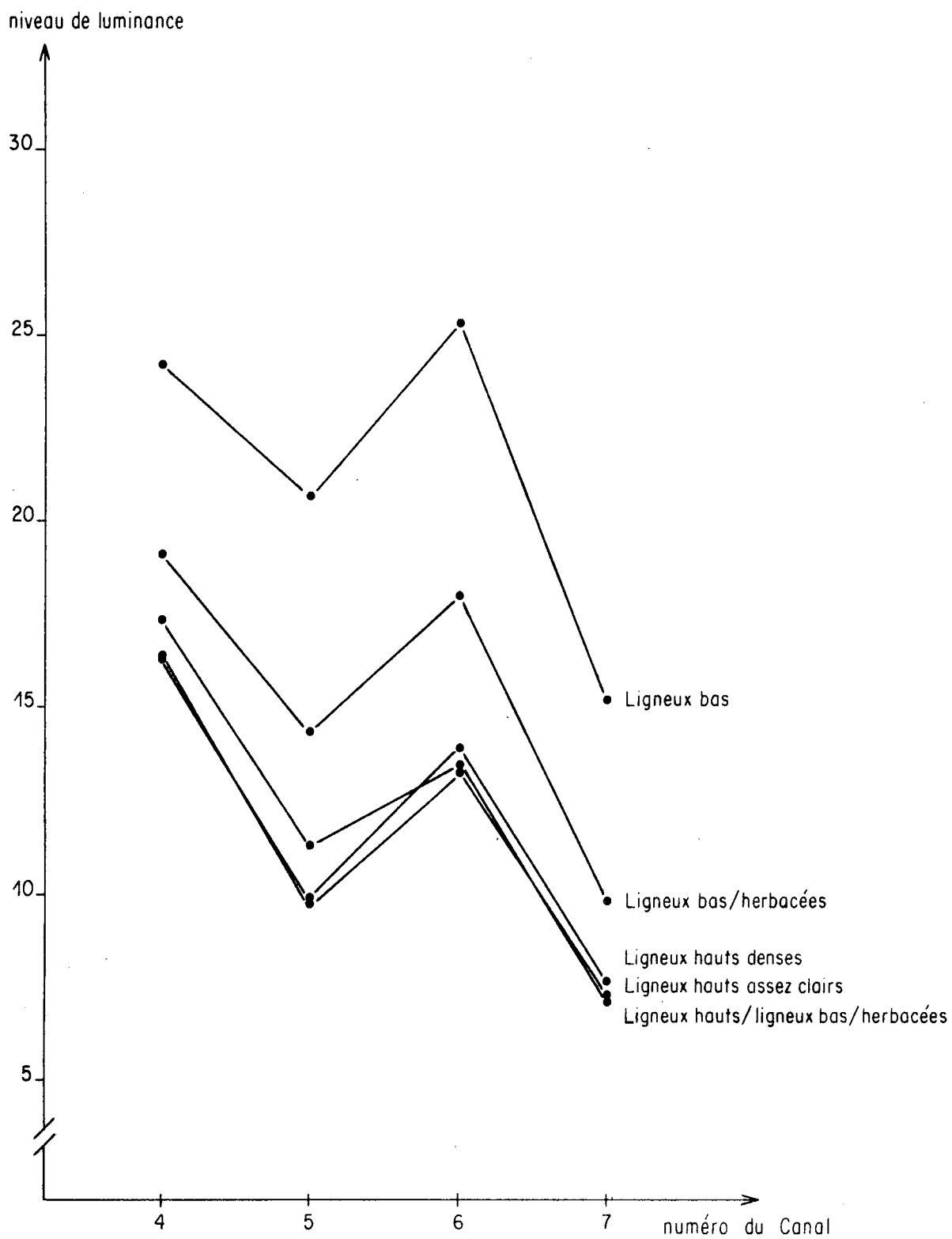


Fig. 51

Valeurs moyennes des réponses spectrales des sous-classes d'écotopes.
Formations végétales.

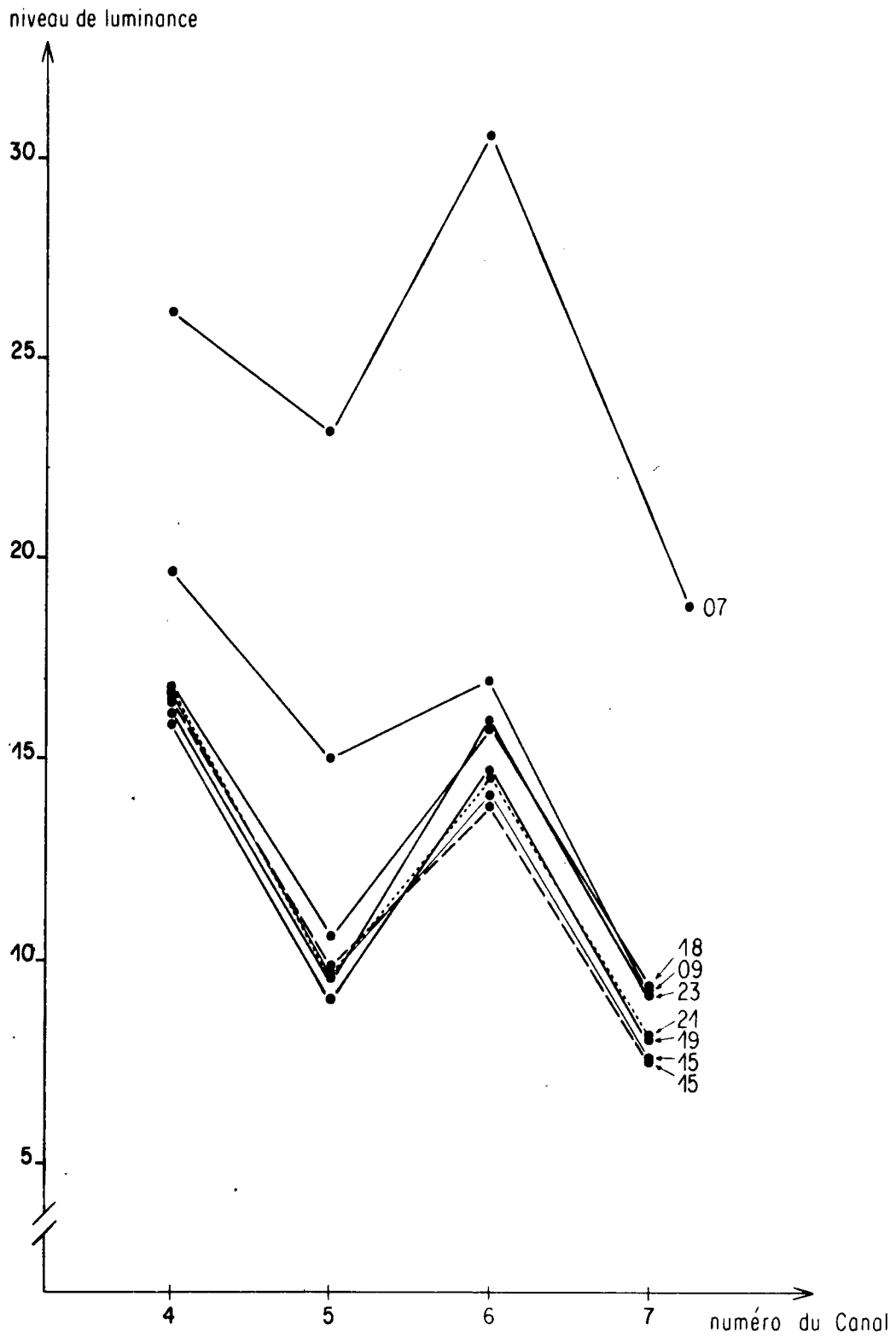


Fig 52

Valeurs moyennes des réponses spectrales de 8 écotypes de chêne vert.
(avec indication de l'indice de biovolume).

b) Les formations végétales (figure 51)

Une corrélation d'ensemble moins satisfaisante est observée pour les courbes des réponses spectrales des formations végétales (figure 51).

En effet, si le gradient observé correspond à un effet global de l'importance du biovolume végétal aérien pour les différentes formations, il est délicat de conclure à une relation directe entre le type de formation végétale et la réponse spectrale. En effet :

- il y a confusion entre les courbes des formations simples : ligneuses hautes denses, ligneuses hautes assez claires et de la formation complexe : ligneuse haute - ligneuse basse - herbacée ;
- l'échantillon testé se révèle être incomplet, en particulier par l'absence presque totale d'écotopes dans la classe de la formation simple herbacée, due aux difficultés de repérage liées à l'aspect de ce type de formation végétale en période hivernale.

c) L'influence du biovolume de la végétation (figure 52)

Si l'on cherche à mettre directement en évidence l'influence du biovolume végétal sur les réponses spectrales des unités de végétation, que ce soit pour une même espèce végétale ou pour les formations considérées dans leur ensemble, on peut faire les observations suivantes :

- aucune différence significative n'est observée dans les courbes correspondant aux unités de végétation dont l'indice de biovolume est élevé ;
- il est possible de déceler un seuil (approximativement égal à l'indice de biovolume 10 calculé selon TRABAUD, 1973) : pour des valeurs inférieures à ce seuil, une faible variation de l'indice de biovolume entraîne des différences considérables dans les niveaux de luminance enregistrés ; au contraire, au delà de ce seuil, les réponses spectrales ne sont pas significativement différentes.

4.4.3.3. Les diagrammes de dispersion

Les diagrammes de dispersion sont la représentation graphique, des valeurs moyennes de luminance des sous-classes ou classes d'écotopes, dans deux canaux ou selon une combinaison de plusieurs canaux. Ce mode de représentation

graphique, bien que limité à un espace à deux dimensions, permet une analyse simplifiée des différences de réponses spectrales dans un nombre réduit de canaux ou selon une combinaison destinée à accroître la discrimination des unités.

4.4.3.3.1. Rapport de deux canaux

Ce sont les combinaisons les plus élémentaires qui sont au nombre de 6. Elles mettent en rapport deux canaux selon les combinaisons suivantes :

Canaux 4/5, 5/6, 6/7, 4/7, 5/7, 4/6.

Les trois premiers rapports présentés sur la *figure 53* visualisent la corrélation entre les canaux successifs (voisins). Les trois derniers (*figure 54*), mettent en relation les canaux extrêmes ou "non-successifs" dont la combinaison, en principe, doit permettre la meilleure séparation des unités étudiées.

On voit ainsi que les canaux 6 et 7 sont les plus proches, ce sont eux qui sont le plus fortement corrélés, tandis que les canaux 4 et 7, ou 5 et 7 apparaissent les plus différents.

Quelle que soit la combinaison choisie, 5 à 6 groupes de valeurs tout au plus s'individualisent ; ce sont :

- *les zones aquatiques* dont les valeurs de luminance sont les plus faibles ; les 4 sous-classes distinguées sont regroupées dans le même nuage de points nettement distinct des autres dans toutes les combinaisons, exception faite de la combinaison canal 5/canal 4 ;
- *les zones de roche affleurante* dont les valeurs de luminance sont les plus fortes dans les canaux 4, 5 et 6 ; elles se situent à l'opposé des zones aquatiques ;
- *les zones à couvert végétal peu important* (Buis) parfois très proches des zones précédentes ; elles se différencient de celles-ci par les valeurs prises dans les canaux 5 et 7 (donc dans les combinaisons faisant intervenir ces canaux) ;

- *les zones de végétation* toutes regroupées dans le même nuage de points dans la combinaison canal 6/canal 7 ; par contre, dans les autres combinaisons, les zones de Brachypode se regroupent avec les zones de sol nu, et les zones de Phragmite (végétation en milieu aquatique) se placent en situation intermédiaire entre les zones de végétation et les zones aquatiques ;
- *les zones urbaines*, toujours difficilement dissociables des zones de sol nu et de Brachypode ;
- *les zones de Brachypode et de sol nu*, non dissociables, quelle que soit la combinaison retenue ; il faut rappeler ici que le Brachypode est à l'état sec.

Les variations les plus importantes qui existent entre les différents rapports s'observent pour les zones de roche affleurante, ou à couvert végétal très faible, ainsi que pour les zones urbaines.

4.4.3.3.2. Combinaisons canal/somme des canaux

Ces combinaisons permettent de tester la dispersion des valeurs en normalisant la valeur de luminance dans chaque canal par la somme des luminances dans les 4 canaux. Cette normalisation doit être considérée comme une opération de prétraitement, visant à réduire l'influence des variations de l'énergie solaire incidente.

Les diagrammes présentés correspondent aux combinaisons suivantes :

figure 55 : x_i étant la valeur de luminance moyenne dans un canal : $x_i/(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)$ valeur dans un canal/somme des valeurs dans les quatre canaux

figure 56 et 57 : Les diagrammes mettent en rapport les combinaisons précédentes pour deux canaux soit :

$$x_i/(x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \text{ et } x_j/(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)$$

Dans le cas des données étudiées, ces combinaisons n'apportent guère de renseignements plus instructifs sur les possibilités de séparation et de discrimination des sous-classes d'écotopes.

La plupart des regroupements précédemment notés, sont également observés (*figure 55*), et si une discrimination des zones aquatiques est parfois

Légende des figures 53 à 60

■ ZONES Aquatiques

Mer	Mer
Thau	Etang de Thau
Vic	Etang de Vic
Lit	Littoral

+ ZONES urbaines

UD	urbain dense
UP	urbain périphérique
UR	urbain résidentiel

▲R.Af ZONES de roche affleurante

* ZONES de sol nu (vignes en hiver)

● ZONES de végétation

BU	Buis
BR	Brachypode rameux
JO	Genévrier oxycèdre
CK	Chêne kermès
RO	Romarin
CV	Chêne vert
PA	Pin d'Alep
PH	Phragmite

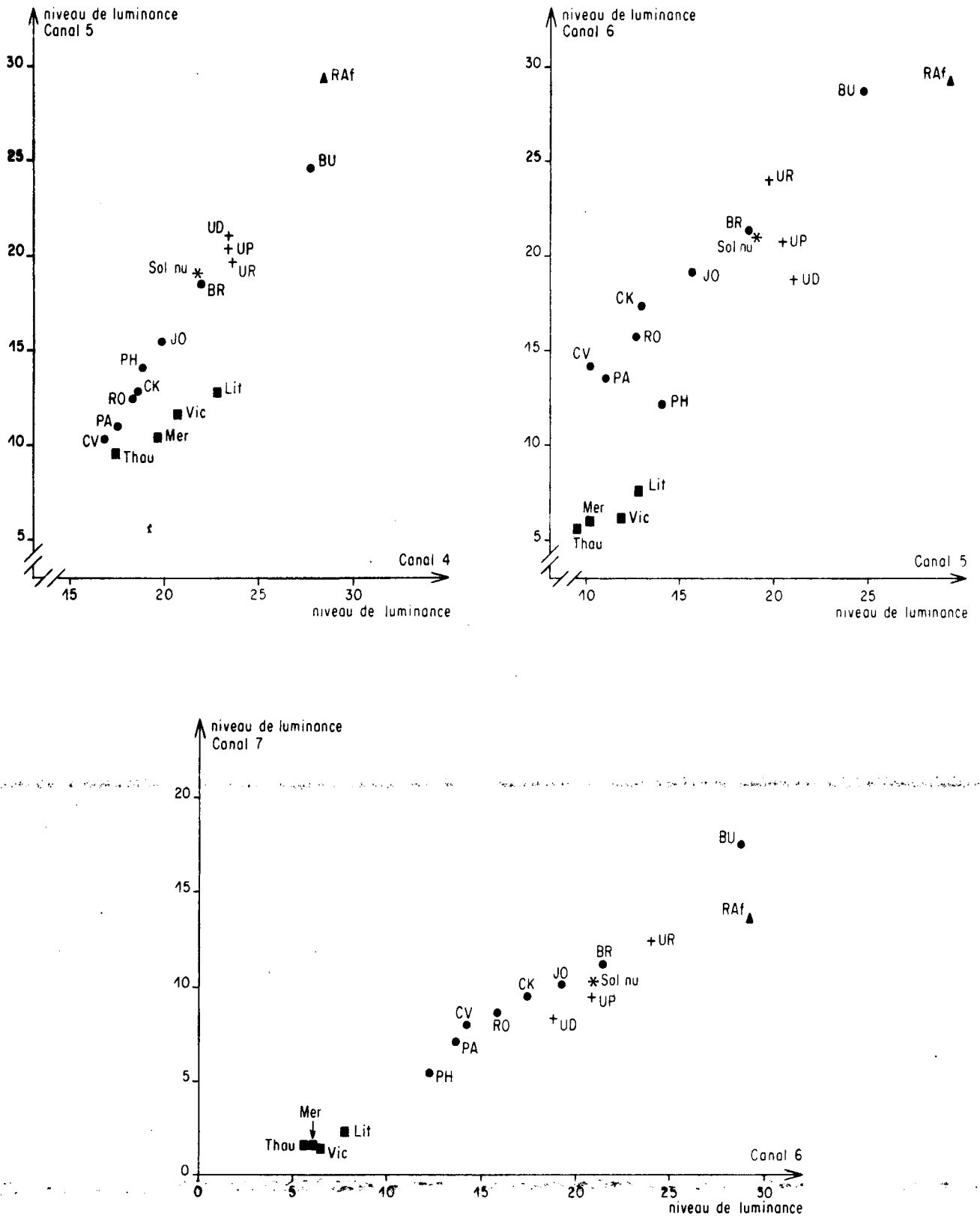


Fig. 53

Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes.
(comparaison Canal / Canal).

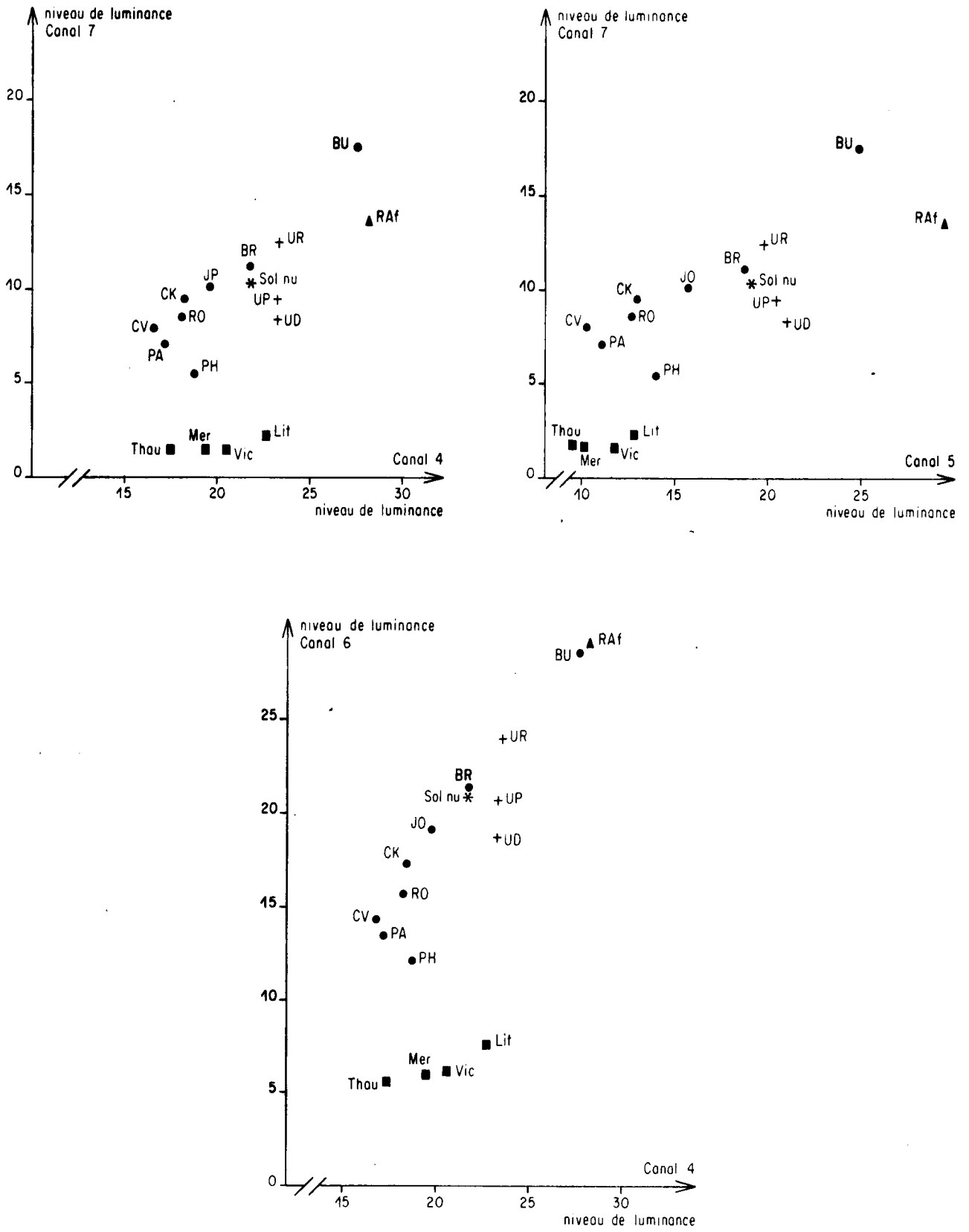


Fig. 54

Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes. (comparaison Canal / Canal).

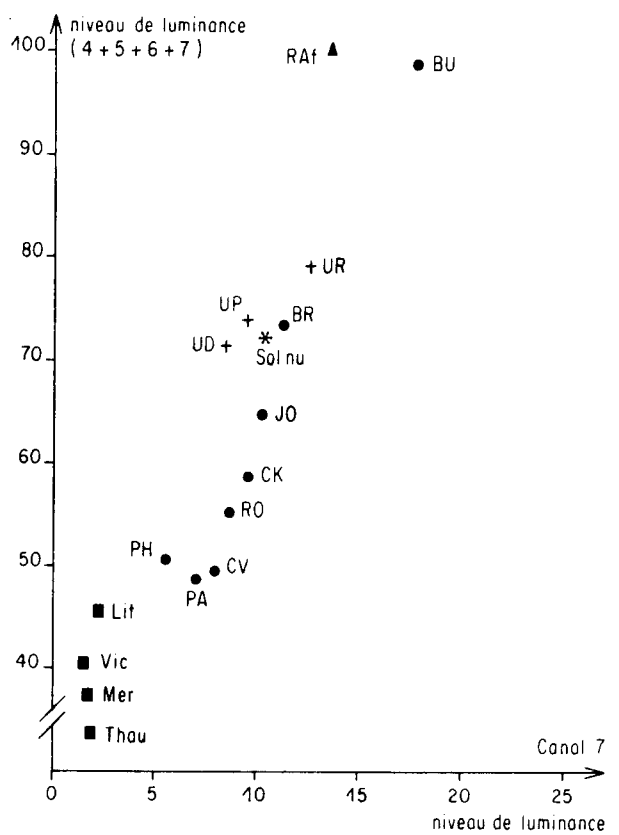
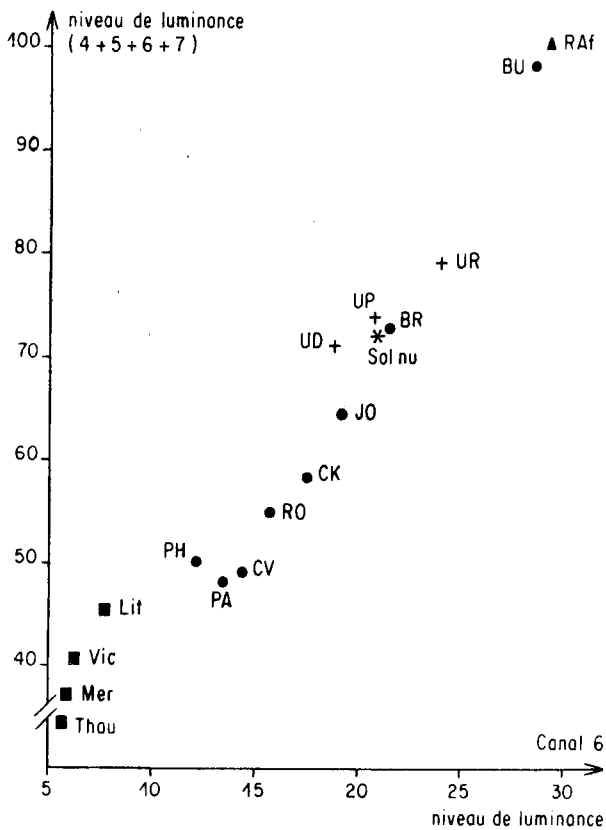
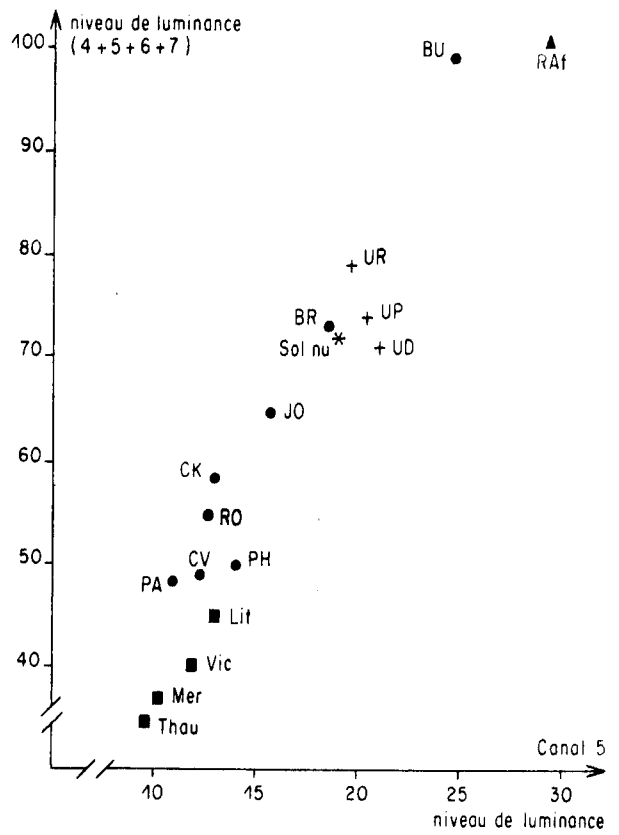
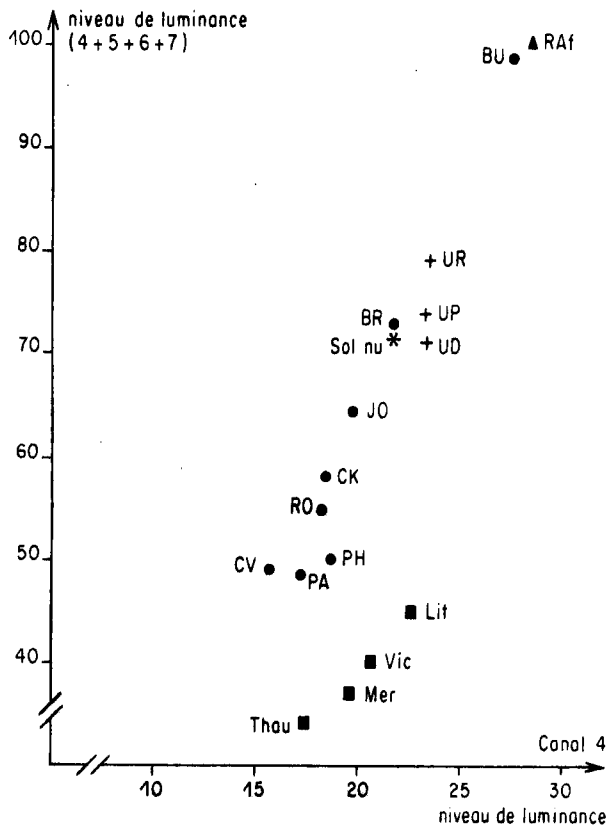


Fig. 55

Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes.
 Comparaison: valeur de luminance dans un canal par rapport à la somme des valeurs dans les 4 canaux.

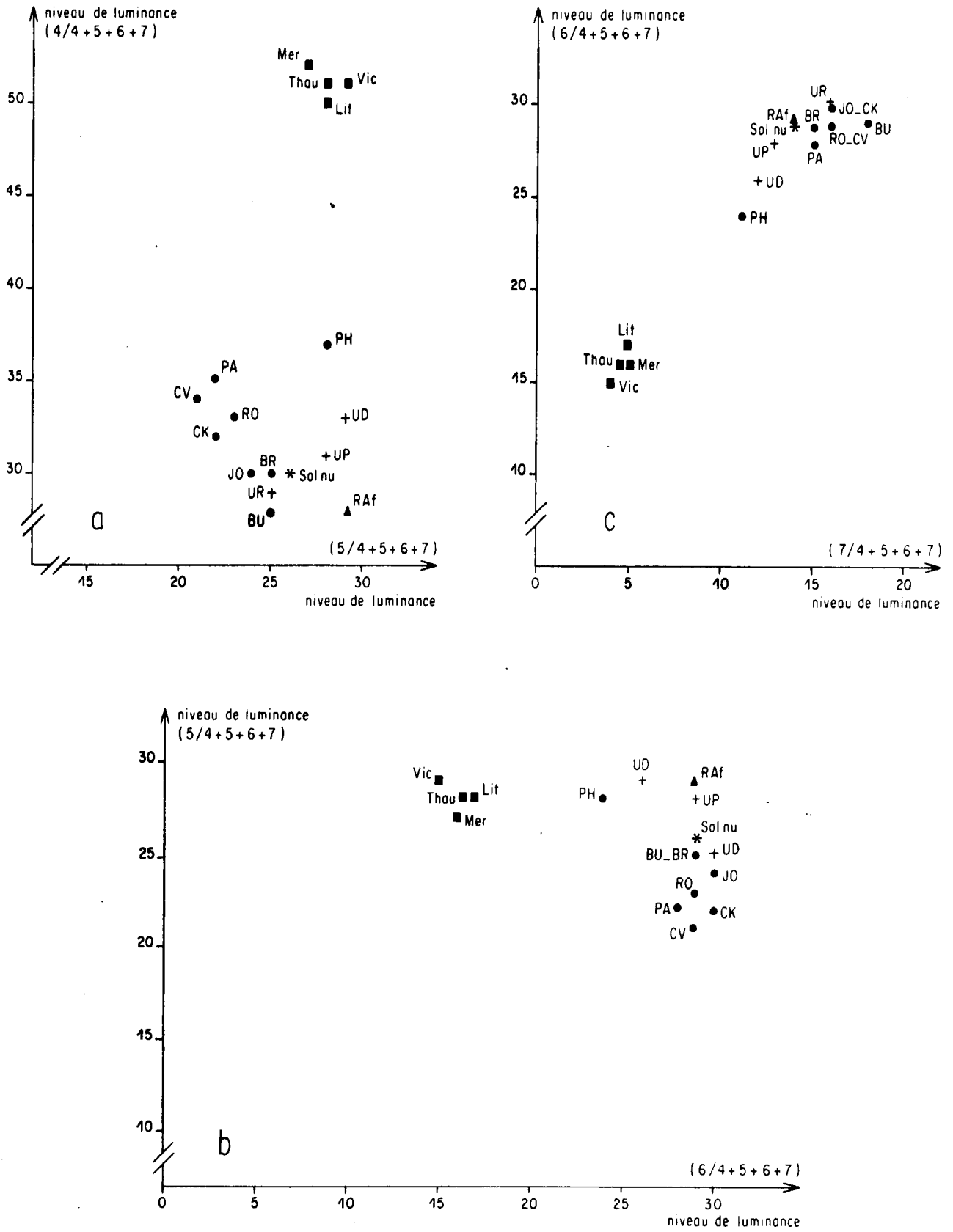


Fig. 56

Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes.
 Comparaison des rapports: valeur de luminance dans un canal / la somme des valeurs dans les 4 canaux.

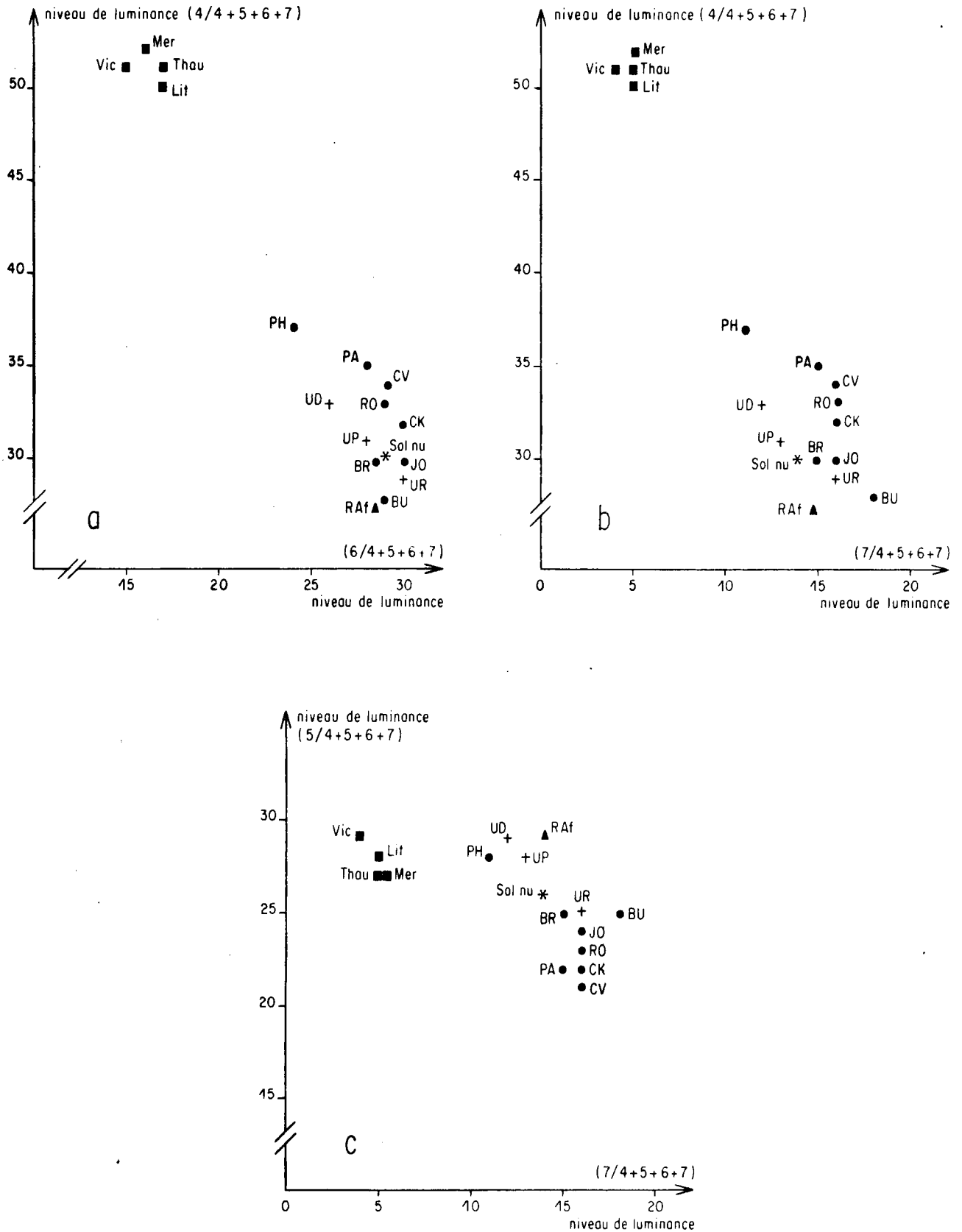


Fig. 57

Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes.
 Comparaison des rapports: valeur de luminance dans un canal / la somme des valeurs dans les 4 canaux.

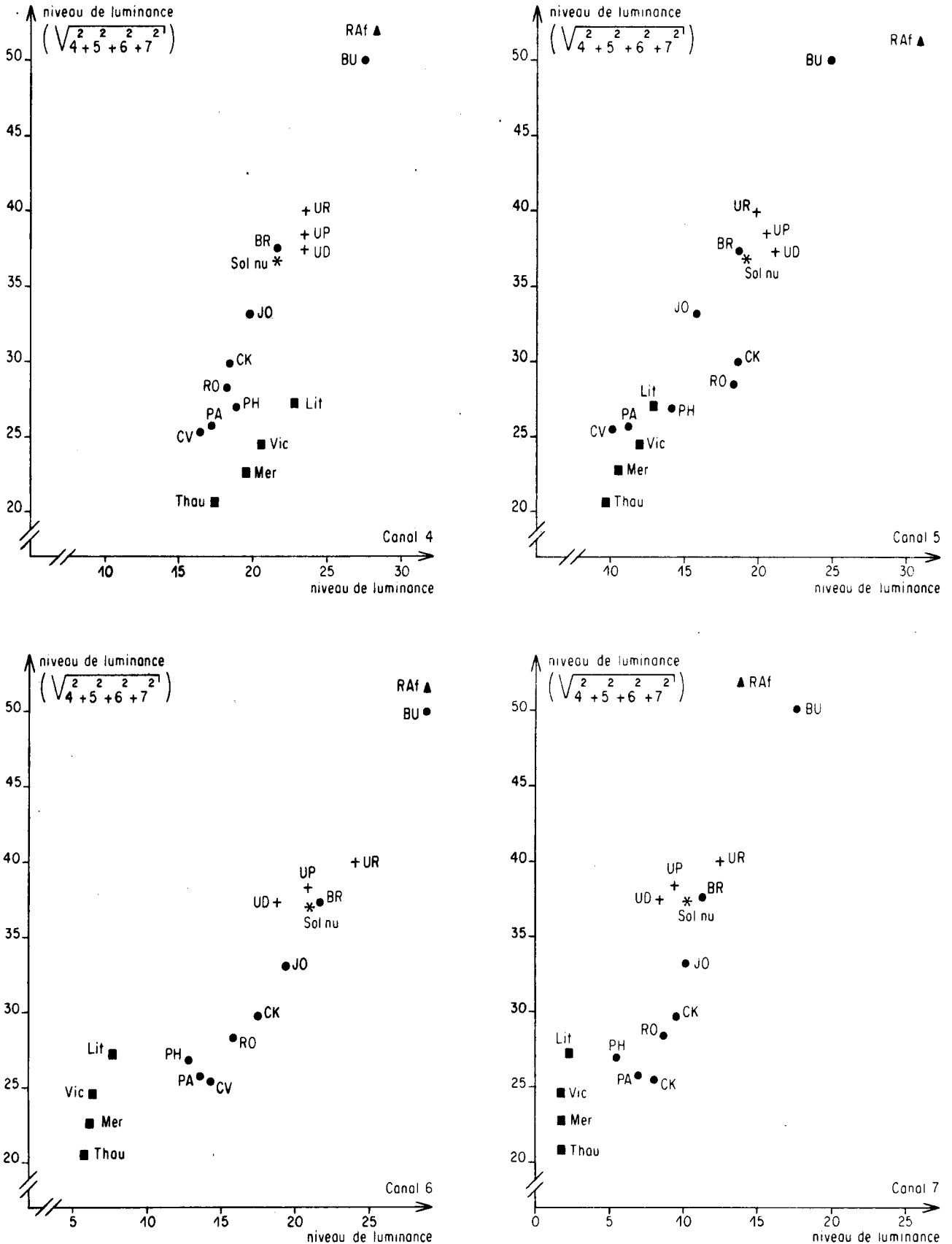


Fig. 58

Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes. Comparaison: valeur de luminance dans un canal / racine carrée de la somme des carrés des valeurs dans les 4 canaux.

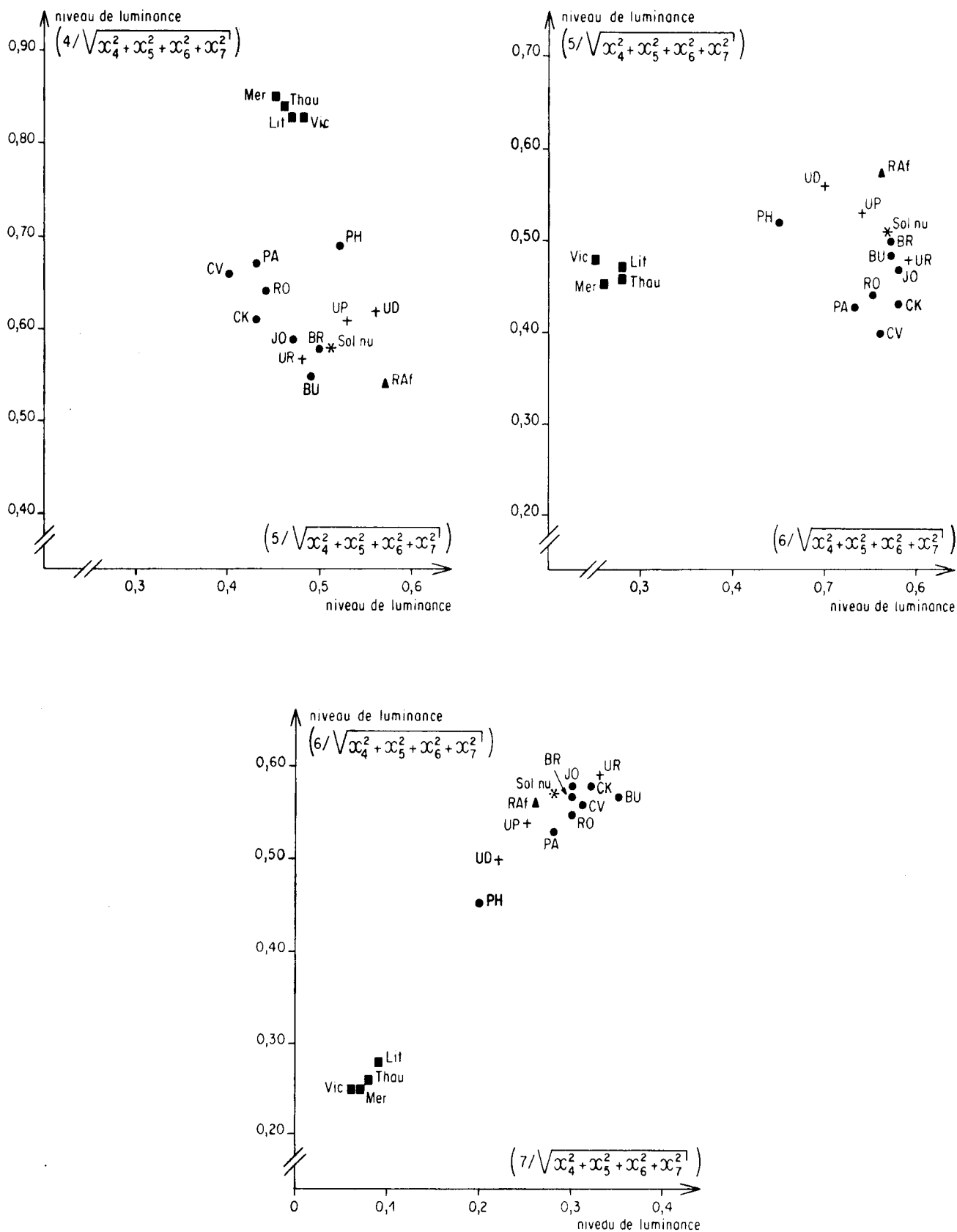


Fig. 59

Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes.
 Comparaison des rapports : valeur de luminance dans un canal / racine carrée de la somme des carrés
 des valeurs dans les 4 canaux.

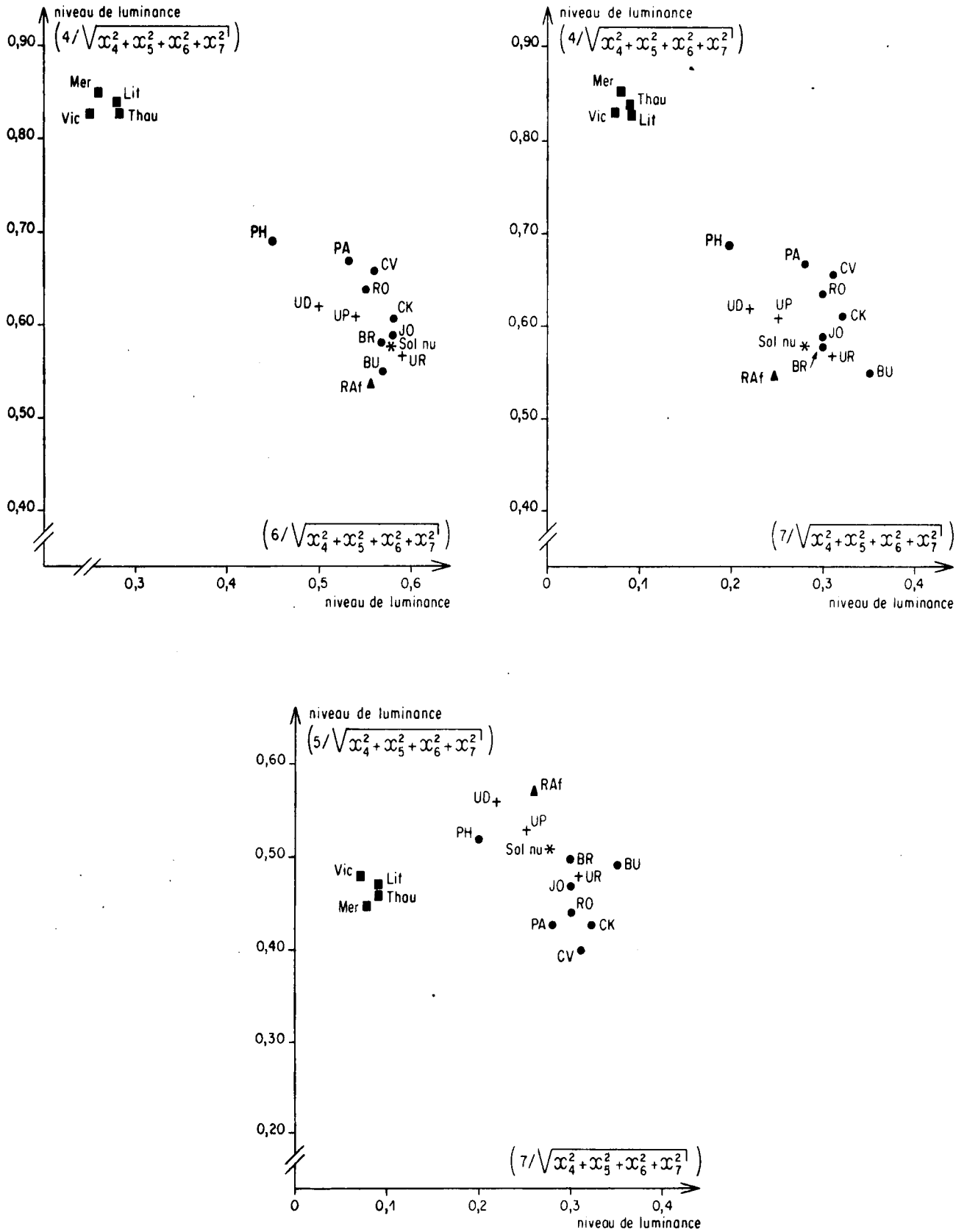


Fig. 60

Diagrammes de dispersion des réponses spectrales moyennes des sous-classes d'écotopes.
 Comparaison des rapports : valeur de luminance dans un canal / racine carrée de la somme des carrés
 des valeurs dans les 4 canaux.

plus nette (*figures 56a, b ; 57a, b*) il n'en est pas de même pour la distinction entre les zones de roche affleurante et les zones très peu couvertes de végétation qui sont englobées dans le groupe des zones urbaines et des zones de végétation.

4.4.3.3.3. Cosinus-directeurs

Il s'agit ici à nouveau de combinaisons destinées à des pré-traitements ; le facteur de normalisation est constitué par la racine carrée de la somme des carrés des valeurs de luminance et, par analogie avec le cas à deux dimensions, on peut qualifier cette technique par le terme de "cosinus-directeurs" (QUIEL, 1975).

Les diagrammes présentés sur les *figures 58, 59 et 60* font état de peu de différences par rapport aux résultats précédents (*figures 55 à 57*) ; ils ne fournissent pas de renseignements particulièrement importants dans la mesure où les mêmes distinctions ou confusions parmi les sous-classes d'écotopes sont mises en évidence.

5. METHODES DE CLASSEMENT

Après l'analyse des caractéristiques spectrales des classes, la dernière étape du traitement des données consiste à effectuer le classement proprement dit.

La comparaison, pour les différentes classes ou sous-classes, des valeurs moyennes de luminance, laisse entrevoir des possibilités de discrimination. Cependant, si l'on tient compte, non plus des valeurs moyennes, mais de l'étendue réelle de la distribution des niveaux de luminance (*figures 61 et 62*), la séparabilité des classes d'écotopes n'apparaît pas certaine.

Nous allons examiner successivement des méthodes déterministes et probabilistes de classement. Dans les deux cas, le critère d'efficacité de la méthode sera le pourcentage de reconnaissances exactes (nombre d'éléments de résolution d'écotopes correctement classés / nombre total d'éléments de résolution dans la classe).

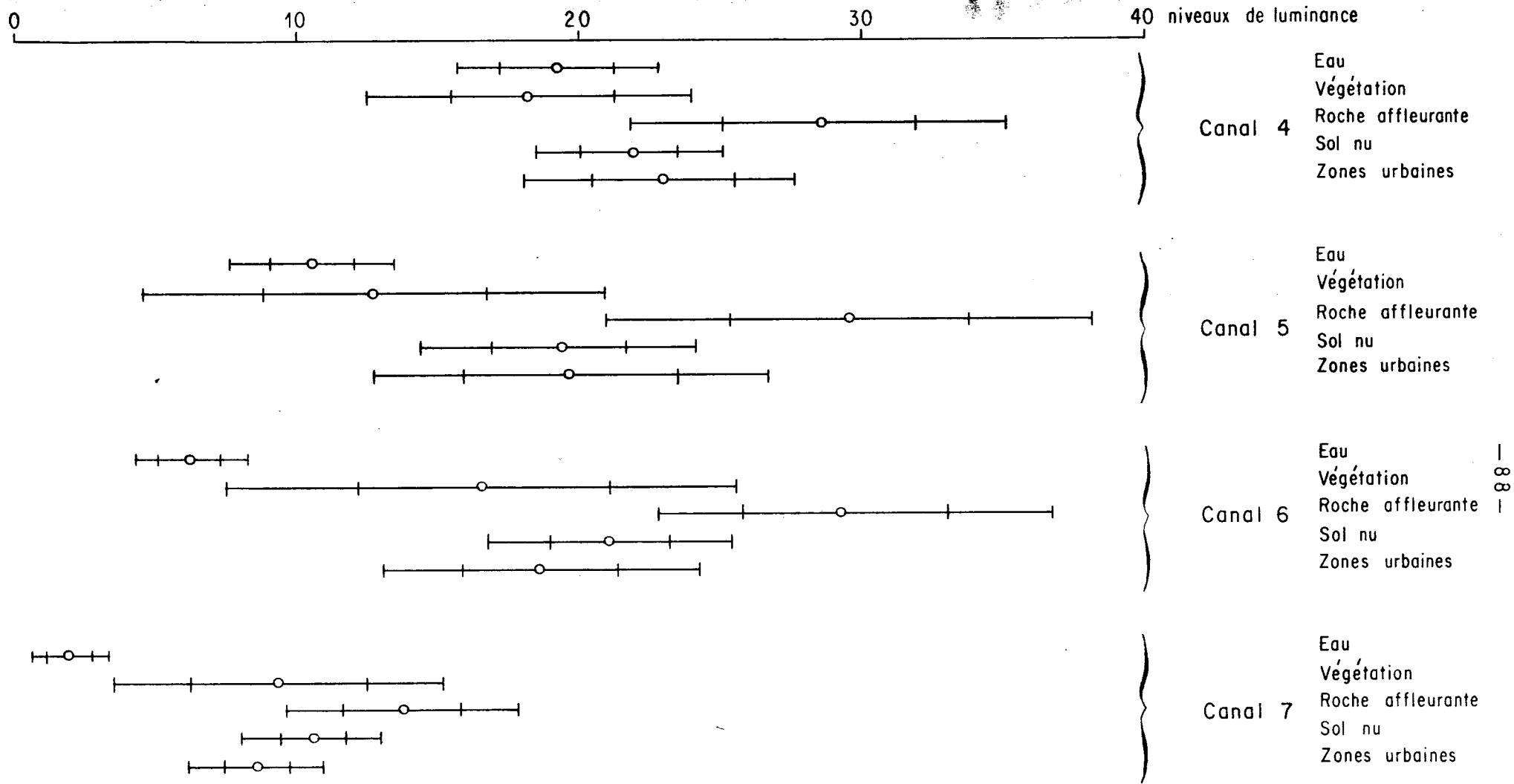


Fig. 61

Dispersion des réponses spectrales des 5 classes d'écotopes.
(valeurs moyennes \pm un ou deux écarts-types)

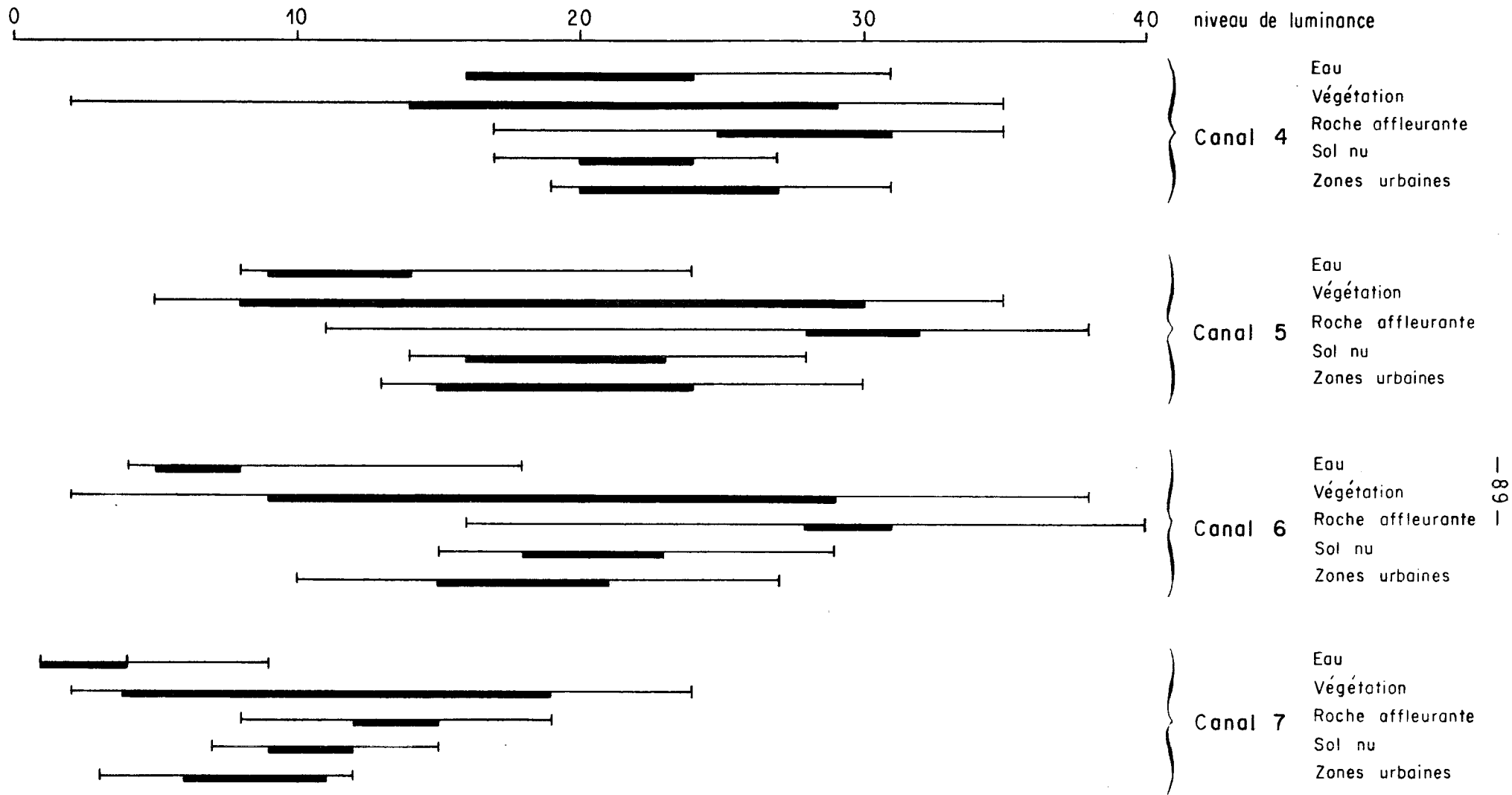


Fig 62

Dispersion des réponses spectrales des 5 classes d'écotopes.
(valeurs brutes; les fréquences les plus élevées sont soulignées)

5.1. Méthodes des niveaux

Nous considérons ici un ensemble de méthodes basées sur l'établissement de relations biunivoques entre certains niveaux de luminance et certaines classes d'écotopes. Pratiquement, on opère ou bien par tests dichotomiques utilisant un ou plusieurs canaux (combinaison de canaux), ou bien par tests simultanés sur les 4 canaux.

Dans tous les cas, il faut définir, pour chaque classe, et pour les canaux ou combinaisons de canaux considérés, un niveau maximum de luminance D_{max} et un niveau minimum D_{min} . Lors du classement, un point sera affecté à la classe A, si l'inéquation suivante est vérifiée :

$$D_{min}_i^A \leq x_i \leq D_{max}_i^A$$

x_i = luminance de l'élément x dans le canal i

$D_{min}_i^A$ = borne inférieure de luminance pour la classe A, dans le canal i

$D_{max}_i^A$ = borne supérieure de luminance pour la classe A, dans le canal i.

La difficulté réside dans la définition des bornes correspondant aux classes. Celle-ci peut être réalisée à partir des résultats de l'apprentissage (histogrammes) ; cependant, nous avons vu qu'il y a souvent chevauchement des intervalles de luminance correspondant aux différentes classes. Il est alors possible :

- soit d'utiliser les valeurs extrêmes qui ne correspondent qu'à une seule classe par exemple, dans le canal 7 :

$D_{min} = 1, D_{max} = 1$: eau de mer

$D_{min} = 20, D_{max} = 64$: zones de roche affleurante

mais cette technique conduit le plus souvent à un grand nombre d'erreurs par omission ;

- soit d'utiliser les paramètres de distribution des niveaux de luminance dans un canal par exemple :

$D_{min} = (\text{moyenne}) - k \times (\text{écart-type})$

$D_{max} = (\text{moyenne}) + k \times (\text{écart-type})$

suivant la valeur de k , et sous réserve de l'adéquation au modèle gaussien, on sélectionne ainsi les niveaux les plus probables pour chaque classe, en éliminant délibérément les niveaux extrêmes.

Nous allons donner quelques exemples de classement par la méthode des niveaux.

5.1.1. Tests de reconnaissance par canal

Les deux exemples présentés (*figures 63 et 64*) concernent les canaux 5 et 6, considérés séparément, où chaque classe a été caractérisée par les valeurs suivantes (moyenne ± 1 écart-type) :

Canal 5

Dmin = 9	Dmax = 15	: zones de végétation + zones aquatiques
Dmin = 16	Dmax = 22	: zones urbaines + zones de sol nu
Dmin = 25	Dmax = 33	: zones de roche affleurante

Canal 6

Dmin = 5	Dmax = 7	: zones aquatiques
Dmin = 12	Dmax = 21	: zones de végétation, urbaines et de sol nu
Dmin = 26	Dmax = 33	: zones de roche affleurante.

Les résultats de reconnaissance automatique des écotopes sont exprimés dans les *figures 65 et 66*. Ils sont d'un niveau de précision nettement insuffisant.

Il faut signaler cependant qu'il est possible de combiner les tests sur plusieurs canaux ; par exemple :

Dmin = 1	Dmax = 15	dans le canal 4	
et			⇒ zone de végétation
Dmin = 12	Dmax = 21	dans le canal 6	

Cette méthode permet d'obtenir une cartographie automatique simple à mettre en oeuvre sur le plan informatique, et qui peut dans certains cas

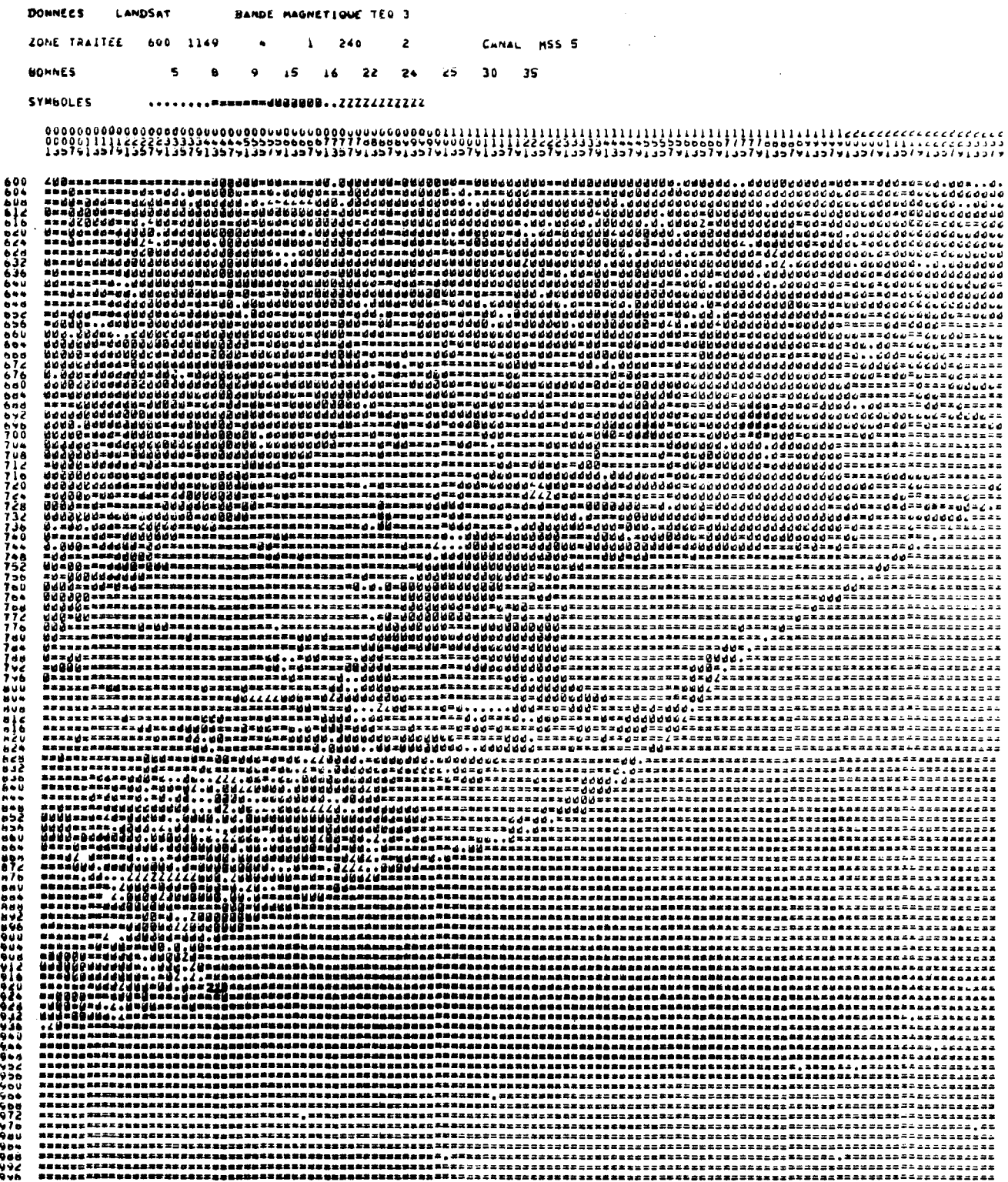


Figure 63

Classification par les niveaux moyens (canal 5)

- ... non classé
- = = végétation + zones aquatiques
- z z zones urbaines + sol nu
- z z zones de roche affleurante

DONNEES LANDSAT BANDE MAGNETIQUE TEO 3

ZONE TRAITEE 50 1149 4 1 240 2 CANAL MSS 0

BORNES 7 11 12 21 25 26 33 45

SYMBOLESZZZZZZL.....

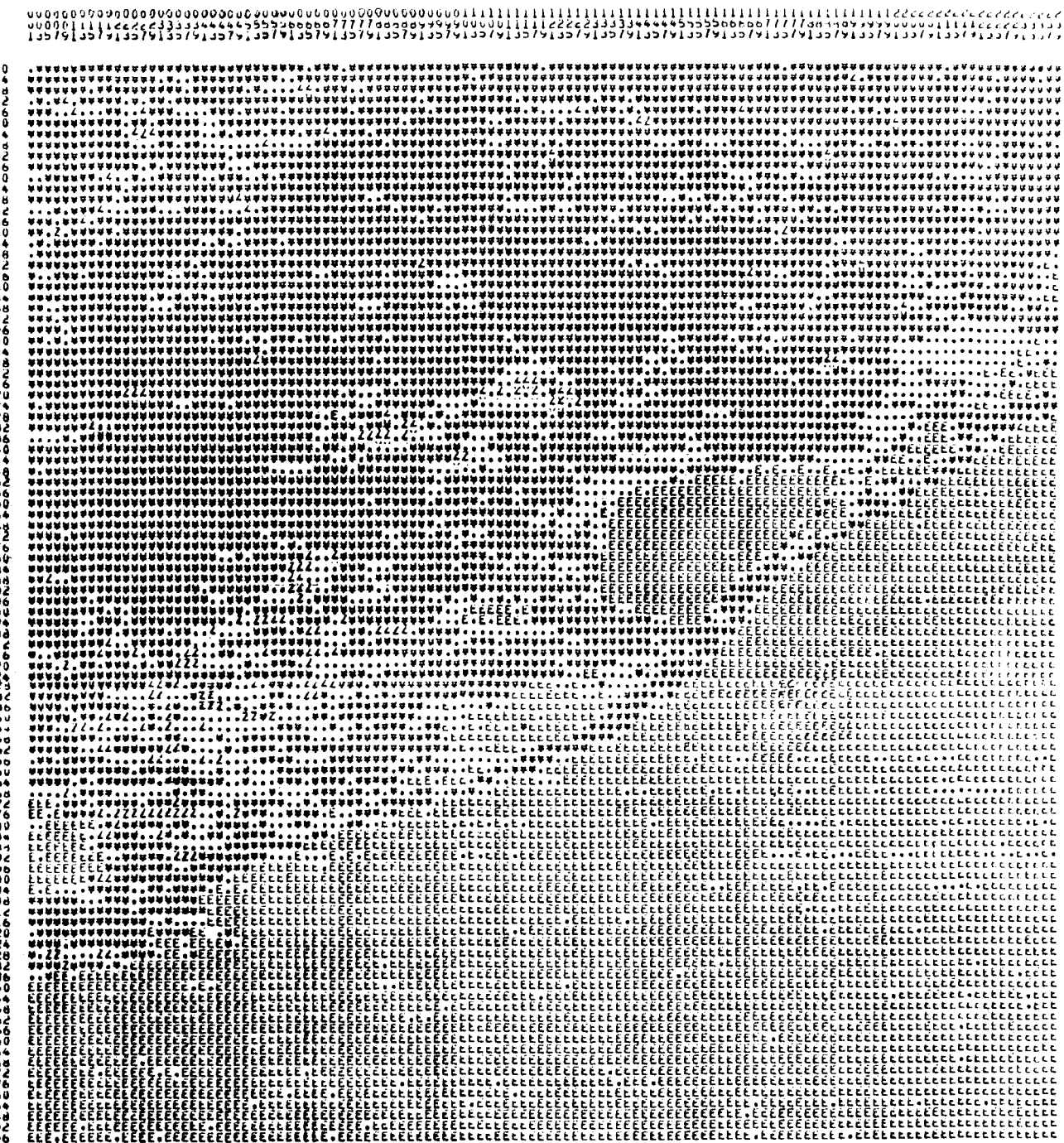


Figure 64

Classification par les niveaux moyens (canal 6)

... non classé

E zones aquatiques

≠ végétation + zones urbaines + sol nu

Z zones de roche affleurante

Zones classées Classes d'écotopes	Zones de végé- tation + Zones aquati- ques	Zones urbaines + Zones de sol nu	Zones de roche affleurante	Zones non classées
Zones de roche affleurante			100 %	
Zones de sol nu	1,6 %	85,5 %	1,6 %	11,2 %
Zones urbaines	4,3 %	63 %	15,2 %	17,3 %
Zones aquatiques	99,4 %	-	-	0,6 %
<u>Zones de végétation</u>				
Chêne kermès	98,8 %	-	-	1,2 %
Chêne vert	85,5 %	1,2 %	1,88 %	11,3 %
Pin d'Alep	96,5 %	3,5 %		
Romarin	100 %			
Brachypode rameux	0 %	100 %		
Buis (végétation très claire)	12,5 %	25 %	37,5 %	25 %
Genévrier	42,8 %	57,1 %		
Phragmite	100 %			

Figure 65

Pourcentage de reconnaissance des écotopes.

Résultats de la classification par les niveaux moyens

(exemple du canal 5)

Zones classées Classes d'écotopes	Zones aquatiques	Zones urbaines de végétation et de sol nu	Zones de roche affleurante	Zones non classées
Zones de roche affleurante			100 %	
Zones de sol nu	-	73,5 %	-	26,5 %
Zones urbaines	-	66,6 %	12,9 %	16,6 %
Zones aquatiques	94,0 %	-	-	3,9 %
<u>Zones de végétation</u>				
Chêne kermès		96,3 %		3,7 %
Chêne vert	3,7 %	74,2 %	1,8 %	20,1 %
Pin d'Alep		90,1 %		9,8 %
Romarin		100 %		
Brachypode rameux		85,7 %	4,7 %	
Buis		12,5 %	75 %	12,5 %
Genévrier		85,7 %		14,3 %
Phragmite		62,5 %		37,5 %

Figure 66

Pourcentage de reconnaissance des écotopes.
 Résultats de la classification par les niveaux moyens
 (exemple du canal 6)

donner des résultats intéressants (DAVID et al., 1974).

5.1.2. Tests de reconnaissance utilisant des combinaisons de canaux

Certaines possibilités de discrimination sont apparues sur les diagrammes (*figures 53 et 54*) et sur les réponses spectrales moyennes (*figure 67*).

Parmi les principales combinaisons de canaux, la comparaison "canal 4 - canal 5" et "canal 6 - canal 5" nous semble la plus intéressante car elle permet de tirer profit des différences d'intensité et de typologie des réponses spectrales dans les trois canaux les plus discriminants.

L'exploitation du diagramme obtenu (*figure 68*) conduit à une classification du type *hiérarchique descendant* (programme CLASSYX : DERINK et LACAZE, 1976), dont un fragment est présenté à la *figure 69*.

Les résultats de cette classification (*figures 70 et 71*) nettement plus probants que ceux provenant des méthodes précédentes, sont cependant insuffisants. Les pourcentages de reconnaissance des écotopes sont faibles et les confusions sont encore trop importantes.

5.1.3. Tests de reconnaissance utilisant les 4 canaux

On utilise ici le test sur les niveaux de luminance, mais en exigeant qu'il soit vérifié dans tous les canaux. En cas de chevauchement des intervalles de luminance, le critère d'affectation devient alors celui de la minimisation de la quantité suivante (ELLS et al., 1972).

Les résultats obtenus (*figure 72*) sont peu satisfaisants dans l'ensemble. Ceci confirme donc qu'il est difficile d'établir une relation biunivoque luminance-classe et qu'une approche probabiliste de la classification est nécessaire.

5.2. Méthodes utilisant moyennes et écarts-type

Dans cette étape, nous considérons que la distribution des niveaux de luminance de chaque classe est caractérisée par la valeur moyenne et l'écart-

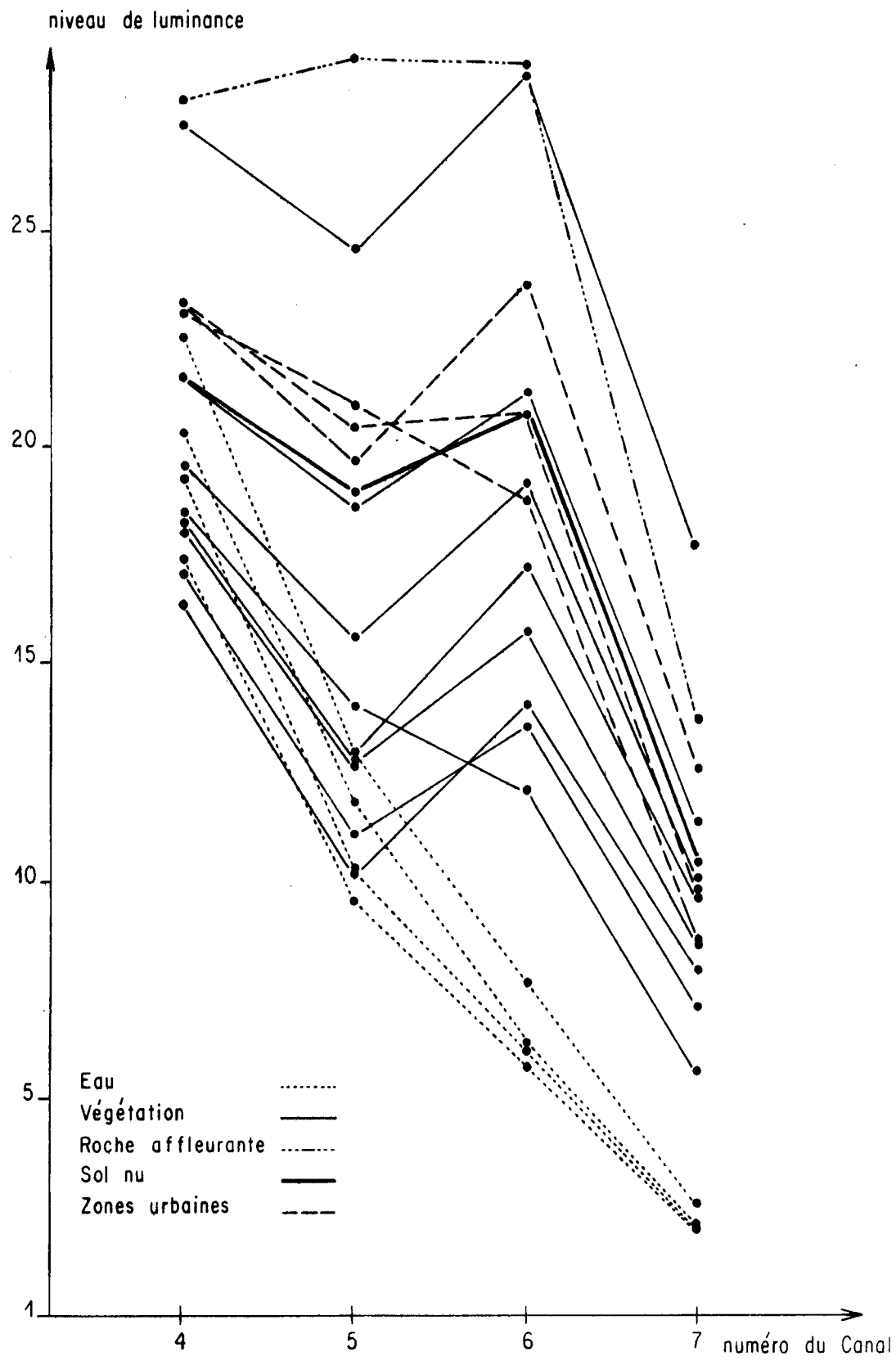


Fig. 67

Valeurs moyennes des réponses spectrales des sous-classes d'écotopes.

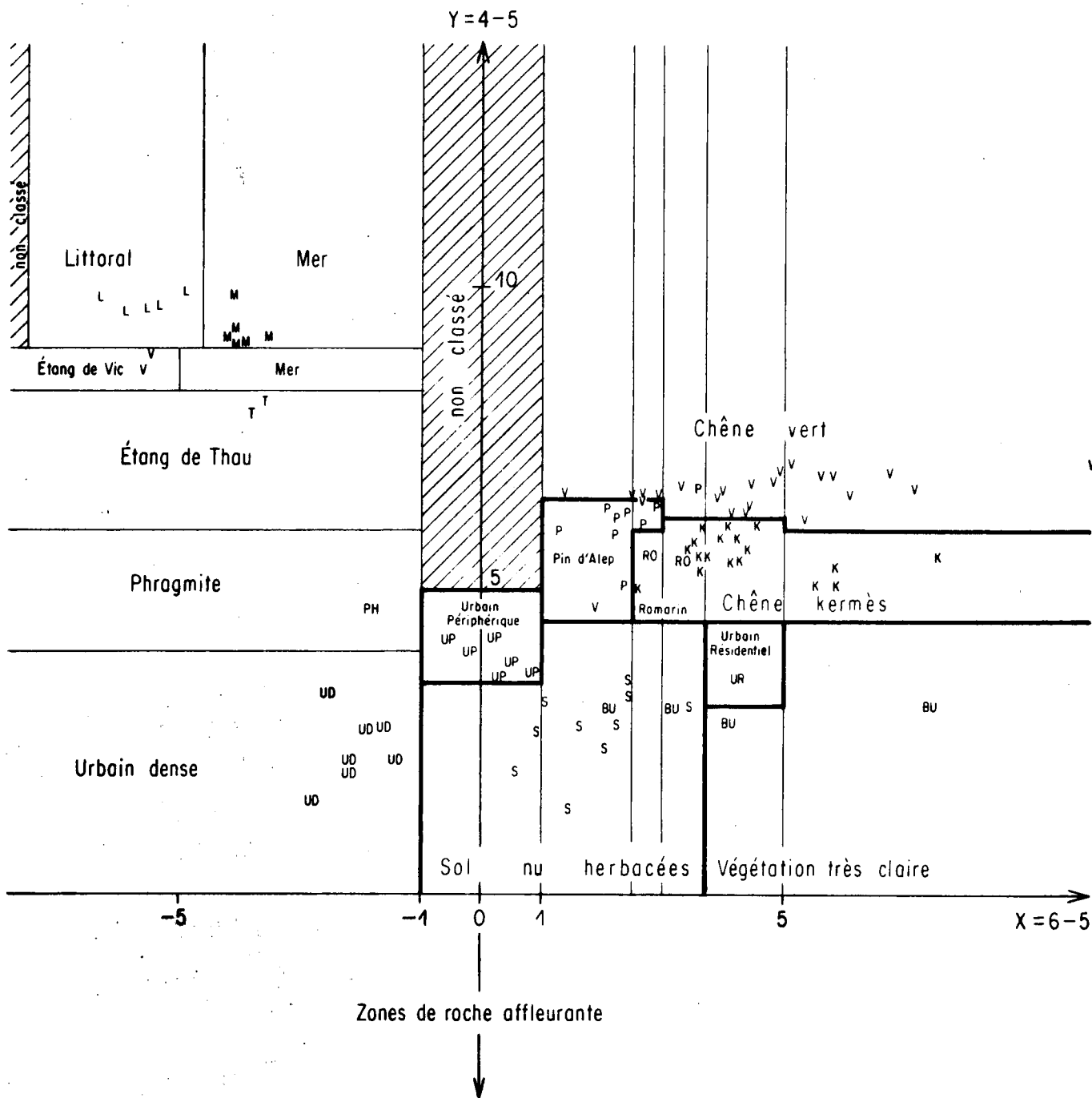


Fig. 68

Diagramme de dispersion des réponses spectrales des écotopes. Comparaison des combinaisons de canaux : canal 6 - canal 5 et canal 4 - canal 5.

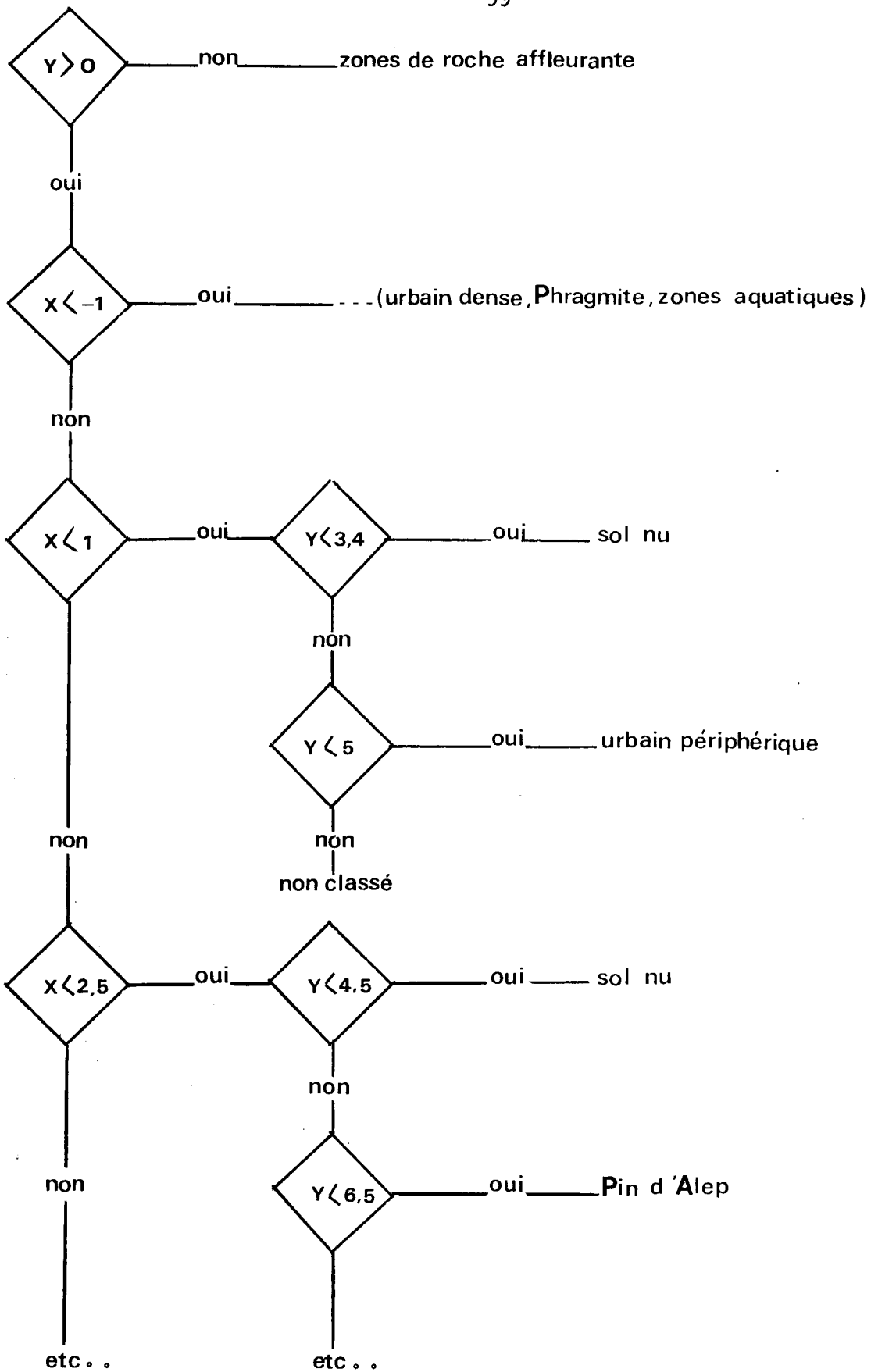


Figure 69

Fragment de la classification hiérarchique descendante basée sur la comparaison des combinaisons de canaux
[Canal 4 - Canal 5] = Y et [Canal 6 - Canal 5] = X

Classification Classes d'écotopes	EAU				URBAIN			Roche affleurante	Sol nu	VEGETATION						
	Littoral	Thau	Vic	Mer	dense	périphérique	résidentiel			très claire (Buis)	Chêne kermès + Romarin	Chêne kermès	Chêne vert	Pin d'Alep	Phragmite	non classé
	<u>Eau</u> (% global)	9,0	42,1	13,2	31,1											
Littoral	47,06	11,7	35,2											1,8		
Thau		68,42		29,85												
Vic		44,4	44,4	3,7										2,63		
Mer	8,3	35,7	4,7	51,19										7,4		
<u>Urbain</u> (% global)		2,1			42,5	8,5	0	6,3	17,0	4,2	4,2	4,2		4,2	6,3	
<u>Sol nu</u> (vignes hiver)					8,8	5,8	4,4	10,2	32,3	23,5	7,3	1,4		5,8		
<u>Zones de roche affleurante</u>								57,1	42,8							
<u>Végétation</u>																
Buis (végétation très claire)									37,5	50	12,5					
Brachypode						4,1		4,1	33,3	29,1	20,8	4,1		4,1		
Genévrier							14,2		14,2	42,8	14,2			14,2		
Romarin						5,8			11,7	11,7	11,7			23,5	23,5	
Chêne vert		3,9				2,6	0,6		0,6	2,6	21,5	2,6	49,6	4,5	2,6	
Pin d'Alep					1,6	4,9	3,2		8,2	3,2	14,7	6,5	29,5	22,9		
Chêne kermès						1	3,1		3,1	11,5	40	13,6	17,8	7,3		
Phragmite (milieu aquatique)					50	12,5									37,5	

Figure 70

Pourcentage de reconnaissance des écotopes. Résultats de la classification descendante hiérarchique basée sur la comparaison des combinaisons de canaux [canal 4 - canal 5] et [canal 6 - canal 5]

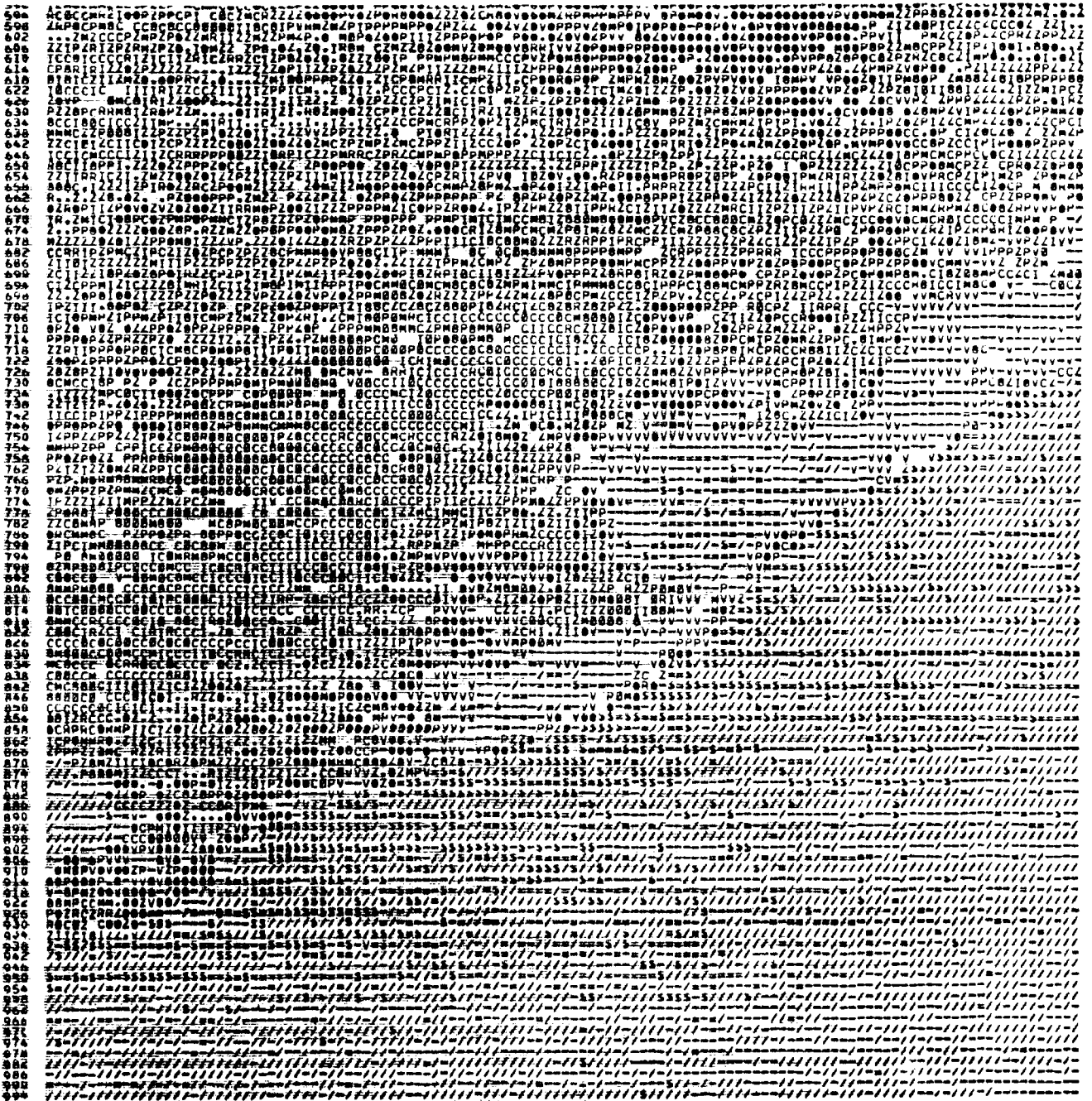


Figure 71

Classification d'après la combinaison de canaux 4 - 5 / 6 - 5

- . Zone nue
- @ Urbain dense
- V Phragmite
- Etang de Thau
- = Etang de Vic
- / Mer
- \$ Littoral
- Z Sol nu
- P Urbain périphérique
- M Pin d'Alep
- Ø Chêne vert
- I Zone à végétation très claire
- ☼ Chêne kermès et Romarin
- R Urbain résidentiel
- C Chêne kermès

type correspondant, dans chaque canal.

Les critères de classement (programme CLASS 3 ; DERINK et LACAZE, 1976) peuvent alors être basés sur les distances suivantes :

$$\text{distance } D_1 = \sum_{i=1}^{\text{ncan}} \frac{|x_i - m_i^A|}{\sigma_i^A}$$
$$\text{distance } D_2 = \sum_{i=1}^{\text{ncan}} \left(\frac{x_i - m_i^A}{\sigma_i^A} \right)^2 \quad (\text{distance euclidienne pondérée})$$

Outre les réserves dues à la caractérisation par la moyenne et l'écart-type, il faut signaler ici que la pondération par l'écart-type ou la variance conduit à affecter préférentiellement les points testés aux classes présentant une forte dispersion.

Les résultats (*cf. figure 73*) montrent que certaines erreurs grossières restent commises (par exemple, "eau" classée en "Chêne vert").

5.3. Méthode basée sur l'analyse en composantes principales

Afin d'améliorer les résultats, il est possible d'utiliser, lors de la classification, un critère de distance euclidienne, mais en opérant non dans l'espace original, mais dans l'espace "réduit" obtenu après analyse en composantes principales (SMITH *et al.*, 1972).

L'analyse en question porte sur un ensemble de données correspondant aux réponses spectrales des écotopes sélectionnés dans la phase d'apprentissage.

Dans l'étape de classement, (programme CLACP 1 : DERINK et LACAZE, 1976), on opère, par exemple, dans l'espace des deux premières composantes, après avoir déterminé les coordonnées des points moyens correspondant aux différentes classes (*cf. figure 74*).

Les résultats obtenus sont relativement satisfaisants. Les *figures 75 et 76* en donnent deux exemples. Il est cependant difficile d'apprécier

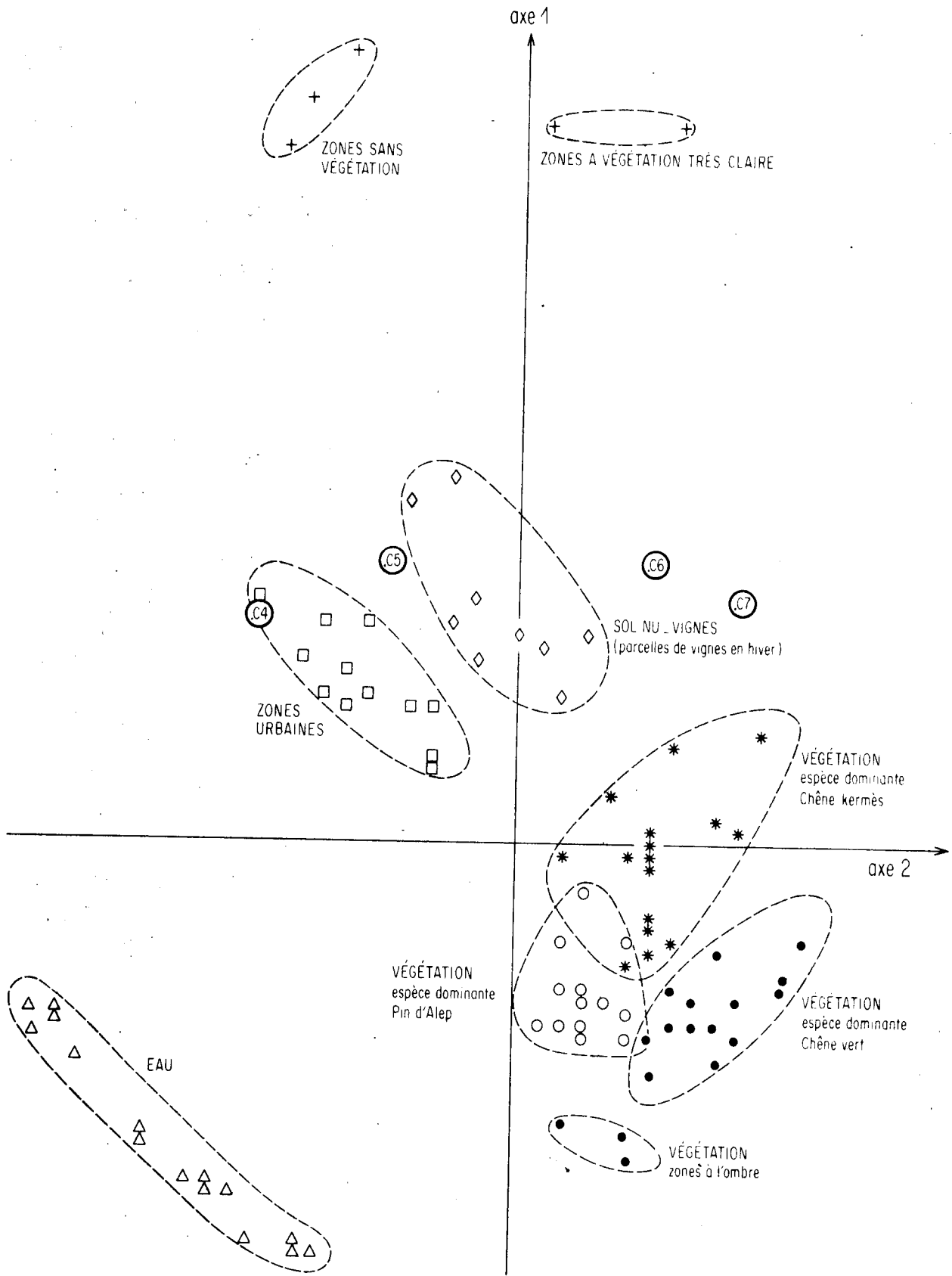


Fig. 74

Diagramme résultant de l'analyse en composantes principales des 109 écotopes.

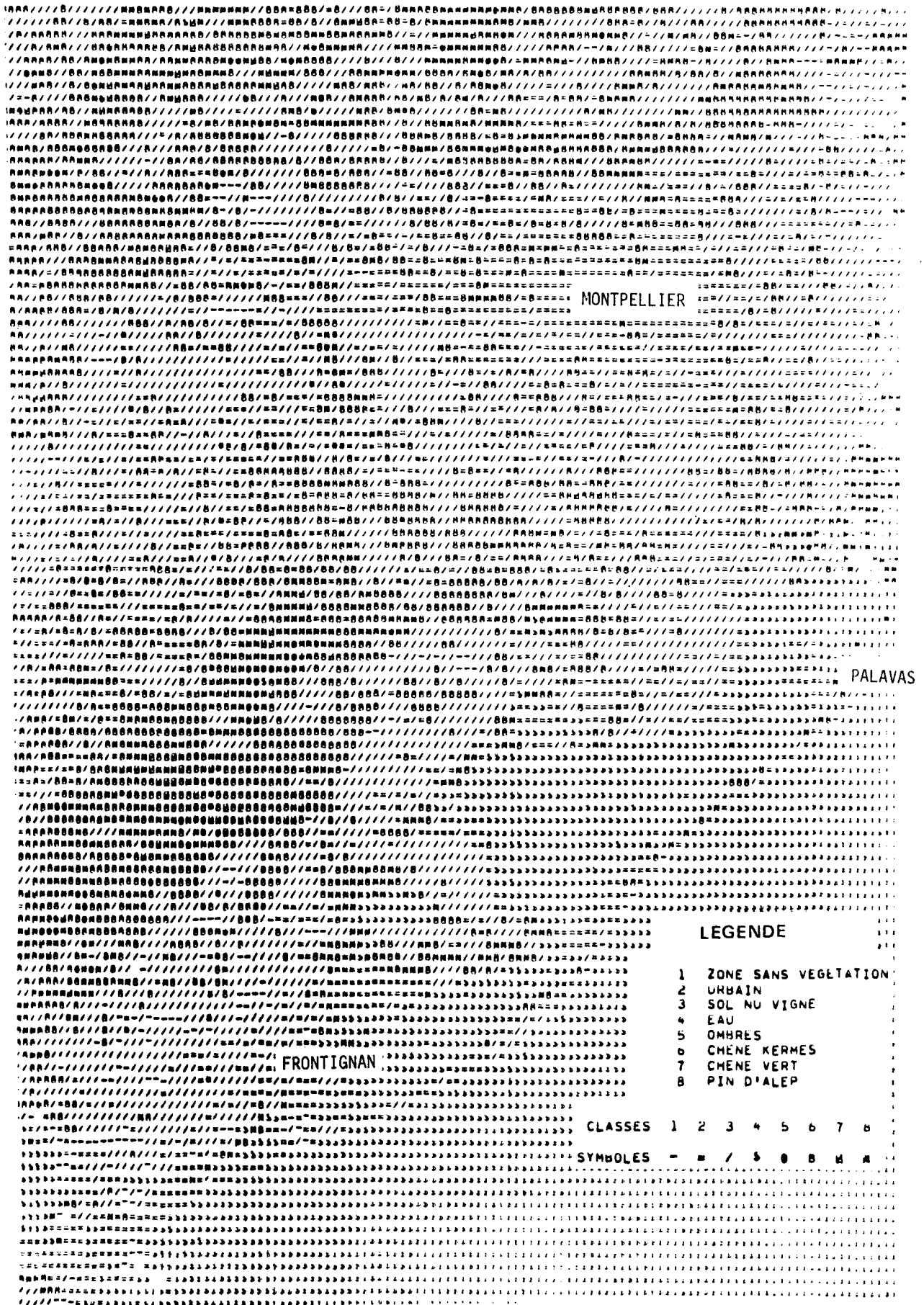


Figure 75

Résultats de classification. Méthode basée sur l'analyse en composantes principales (exemple 1).

complètement les résultats sur de telles visualisations non corrigées du point de vue géométrique, et par conséquent non superposables à une carte. Il faut donc exprimer quantitativement les reconnaissances exactes au niveau de chaque écotope (voir la *figure 77*), pour cumuler les résultats par classes : on obtient alors la matrice de confusion de la *figure 78*. Pour être vraiment significatifs, ces résultats doivent porter sur un ensemble d'écotopes disjoint de l'ensemble qui a servi à l'apprentissage.

Les résultats de la *figure 78* indiquent que, pour la date du 26 janvier 1973, les grandes classes considérées sont assez bien reconnues, les confusions restant dans la limite du tolérable (sol nu / urbain / zones de roche affleurante ; Chêne vert / Chêne kermès).

Bien sûr, certaines unités qui n'ont pas fait l'objet d'une description adéquate sont mal classées : les zones herbacées sont classées soit en "sol nu", soit en "Chêne kermès". D'autre part, certaines surfaces couvertes d'espèces dominantes en mélange donnent des résultats difficilement interprétables : il faudrait savoir si l'hétérogénéité notée lors de la cartographie sur le terrain, correspond à une hétérogénéité réelle au pas d'échantillonnage considéré lors de l'enregistrement des données satellites.

En pratique, il faut établir un seuil de distance au-delà duquel les points sont considérés comme non-classés.

5.4. Méthode basée sur l'hypothèse multigaussienne

Ici nous considérons chaque classe caractérisée par un vecteur moyennes et une matrice de variance / covariances (fournies par le programme "APPRENTISSAGE").

Le critère de classification est celui de la maximisation de la quantité suivante (SMITH et al., 1972) :

$$-\frac{1}{2} \ln |\Sigma^A| - \frac{1}{2} (X - M^A)^T (\Sigma^A)^{-1} (X - M^A)$$

\ln = logarithme népérien

X = vecteur mesures du point considéré

GRUPE DE RECHERCHES SUR LA TELEDETECTION CEPE/CNRS MONTPELLIER
 SYSTEME ANTIDOTE VERSION MITRA 15 PHASE4 CLASSIFICATION

LANGUEDOC JANVIER BANDE MAGNETIQUE TE002

FICHER 0 ZONE TRAITEE 797 803 1 689 694 1 CK 260

MOYENNES DANS LES QUATRE CANAUX 19.6014.2015.90 8.20

ECARTS TYPES DANS LES QUATRE CANAUX 3.10 4.80 5.50 3.40

VALEURS PROPRES 3.10 0.90

VECTEURS PROPRES 0.80-0.59 0.94-0.32 0.94 0.33 0.82 0.56

1	2.50-0.17	ZONE SANS VEGETATION
2	0.51-0.37	URBAIN
3	0.68-0.00	SOL NU VIGNE
4	-1.00-0.77	EAU
5	-1.00-0.22	OMBRES
6	0.00 0.30	CHENE KERMES
7	-0.60-0.44	CHENE VERT
8	-0.56 0.18	PIN D ALEP

CLASSES	1	2	3	4	5	6	7	8
SYMOLES	-	=	/	S	0	8	B	N

666666
 899999
 901234

797 NB/888
 79A MM888A
 799 888888
 800 888888
 801 M88888
 802 888888
 803 888888

CLASSES	1	2	3	4	5	6	7	8
NOMBRE DE POINTS	0	0	1	0	0	36	1	4
POURCENTAGES	0.00000	0.00000	2.38095	0.00000	0.00000	85.71428	2.38095	9.52381

Figure 77

Exemple de résultat pour un écotope
 (végétation ligneuse basse ; Chêne kermès = espèce dominante).

Résultats.

1 \ 2	EAU	ZN	URBAIN	SOL NU	CV	CK	PA	Ombres ^(**)
EAU	100							
ZN		81	08	11				
URBAIN		11	74	10		5		
SOL NU		2,5	3	82		12,5		
CV					65	24	4	7
CK				5	6	76	13	
PA					8	8	62	22

1 : classes d'origine des écotopes

2 : classes d'affectation

Pourcentage moyen de reconnaissance : 77 %

Figure 78

Matrice de confusion

[Résultats de la méthode de classification

basée sur l'analyse en composantes principales]

GRUPE DE RECHERCHES SUR LA TELEDETECTION CEPE/CNRS MONTPELLIER
SYSTEME ANTIDOTE VERSION MITRA 15 PHASE4 CLASSIFICATION

LANGUEDOC LE 26 JANVIER 1973 BANDE MAGNETIQUE TE003

FICHIER 0 ZONE TRAITEE 511 611 1 100

MOYENNES DANS LES QUATRE CANAUX 19.6014.2015.90 8.20

ECARTS TYPES DANS LES QUATRE CANAUX 3.10 4.80 5.50 3.40

VALEURS PROPRES 3.10 0.90

VECTEURS PROPRES 0.80-0.59 0.94-0.32 0.94 0.33 0.82 0.56

- 1 ZONE SANS VEGETATION
- 2 URBAIN
- 3 SOL NU VIGNE
- 4 EAU
- 5 OMBRES
- 6 CHENE KERMES
- 7 CHENE VERT
- 8 PIN D'ALEP

CLASSES 1 2 3 4 5 6 7 8
SYMBLES - = / 5 6 8 2 M

LEGENDE

des figures 80, 81, 82.

La zone visualis e est la même que celle pr sent e
  la figure 14.

M^A = vecteur moyennes pour la classe A
 T \Rightarrow matrice transposée
 Σ^A = matrice de variances / covariances
 $|\Sigma^A|$ = déterminant de la matrice variances / covariances
 -1 \Rightarrow matrice inverse

La *figure 79* montre un exemple de résultats obtenus grâce au programme CLAMG 1 (DERINK et LACAZE, 1976). Dans sa version actuelle, non optimisée, ce programme fournit des résultats nettement moins bons que ceux cités au paragraphe précédent.

Nous insisterons donc sur le fait que l'utilisation simultanée des 4 canaux ne constitue pas forcément une panacée ; si l'utilisation des données d'un seul canal est en général nettement insuffisante, il est possible en revanche qu'une combinaison de 2 ou 3 canaux s'avère plus discriminante que celle où figure l'ensemble des canaux.

La "séparabilité" des classes pour les différentes combinaisons de canaux peut d'ailleurs être testée grâce au programme "DIVERGENCE" (DERINK et LACAZE, 1976). Il est alors possible d'effectuer le choix de canaux le mieux adapté au but proposé.

5.5. Amélioration des programmes de classification

Etant donné le temps de calcul important pour classer les données, il est possible d'utiliser certains algorithmes permettant d'accélérer la classification.

Par exemple, on peut utiliser un test sur le point précédent : il s'agit, avant de classer un élément, de vérifier qu'il possède des propriétés spectrales différentes de celles de l'élément le précédant le long de la ligne de balayage. En effet, si ce n'est pas le cas, il suffit d'affecter l'élément à la classe choisie pour son prédécesseur sans passer par le processus de classification lui-même (programme CLACPP, DERINK et LACAZE, 1976).

Là encore, il faut choisir un seuil de ressemblance approprié : de nombreux essais sont nécessaires pour optimiser ce choix. En particulier, si

Ce seuil est trop élevé, on constatera une tendance à une distribution trop "contagieuse" de certaines classes le long de la ligne de balayage (voir la *figure 80*).

Une autre modification consiste à opérer la classification non élément par élément, mais par zones de 4 ou 9 éléments contigus. On aboutit de ce fait à une homogénéité plus grande des résultats, qui vient compenser les variations fortuites qui peuvent survenir au niveau d'un élément considéré isolément.

Il est possible de combiner les deux modifications citées ci-dessus : les *figures 81 et 82* montrent des exemples de résultats obtenus avec les programmes CLAP 4 et CLACP 9 (DERINK et LCAZE, 1976). On notera qu'ici il faut définir deux seuils de distance, et que l'on peut jouer sur le recouvrement entre zones élémentaires successives, ce qui accentue plus ou moins fortement l'homogénéisation. Cette homogénéisation peut quelquefois entraîner des erreurs : par exemple "pin d'Alep" classé en "ombres" sur les *figures 76 et 77*. Mais d'un point de vue général, les résultats obtenus par ces programmes sont en général proches des cartographies thématiques établies par des moyens traditionnels, car un processus analogue de "lissage" des données est souvent effectué par le thématicien lors de la phase de photo-interprétation.

CONCLUSION

Nous indiquerons, en premier lieu, les problèmes techniques qui sont apparus au cours de l'étude, et dont une partie seulement ont pu être résolus, de façon provisoire, avec les moyens existants au C.E.P.E. Il s'agit essentiellement des impératifs suivants :

- nécessité de visualisation correcte des données
- nécessité de pouvoir confronter facilement ces visualisations avec des documents cartographiques
- nécessité de traitement interactif des données (amélioration de l'efficacité du traitement, et en particulier du repérage des zones d'apprentissage)
- nécessité d'utiliser des algorithmes de classification rapide des données

- nécessité d'une présentation graphique efficace des résultats.

En conséquence, il apparaît donc que si le système informatique minimum de traitement des données LANDSAT peut être basé sur un ordinateur de capacité mémoire moyenne, celui-ci doit être relié à un dispositif de visualisation sur écran cathodique, pouvant servir de support à un traitement interactif.

La présentation ultime des résultats, sur papier ou sur film, requiert un matériel spécial, qui n'est pas obligatoirement directement relié au système précédent.

Le recours à des systèmes informatiques plus puissants ne se justifie que pour certaines phases du travail (corrections géométriques, certaines analyses de texture, etc.). En effet, il faut se garder d'utiliser systématiquement des procédés de calcul complexes, compte tenu de l'énorme quantité de données à traiter.

Sur le plan méthodologique, il faut insister d'abord sur le caractère provisoire des conclusions que l'on peut dégager de l'étude précédente. Celles-ci sont liées en effet aux caractéristiques de la zone d'étude à la date d'enregistrement considérée (26 janvier 1973).

Rappelons à ce sujet que l'un des principaux avantages de la télédétection spatiale est la possibilité d'utilisation des données de plusieurs dates d'enregistrement, dont la réalisation est liée à la capacité de traiter la quantité de données correspondantes.

D'autre part, nous avons utilisé comme "vérité-terrain" des documents cartographiques existants, basés sur l'exploitation de photographies aériennes au passage du satellite. Il va de soi qu'une étude plus précise devrait reposer sur des données photographiques et des "données-terrains" relatives à la même période que l'enregistrement des données du satellite. Dans le cas d'une étude diachronique, ceci représente un important effort d'acquisitions de données par les thématiciens. Cet effort est une condition nécessaire à la réussite de la phase d'"étalonnage" du processus de classification des données multispectrales.

Compte tenu des réserves que nous venons d'indiquer, que pouvons-nous dire des résultats obtenus ? Essayons d'abord de les replacer dans un schéma de classification hiérarchique, dont les degrés correspondent à

des niveaux de plus en plus grande précision :

- | | | |
|---|------------------------------|---------------------------|
| I Formations végétales ligneuses hautes denses | II Feuillus | III Chêne vert dominant |
| | | III Chêne blanc dominant |
| | II Résineux | III Pin d'Alep dominant |
| I Autres formations végétales, de recouvrement > à 20 % | II Ligneux bas denses | III Chêne kermès dominant |
| | II Herbacés denses | |
| | II Complexes LBH | |
| | II Complexes LHBH | |
| I Végétation très claire ou nulle (recouvrement < 20 %) | II Zone de roche affleurante | |
| | II Zones urbaines | III Urbain dense |
| | | III Urbain résidentiel |
| | II Sol nu | |
| I Eau | II Eau de mer | |
| | II Eau littoral et étangs. | |

Nous pouvons alors indiquer que les données de type "LANDSAT" concernant une seule date de prises de vues, permettent généralement une classification correcte (90 à 100 % de reconnaissances exactes) au premier niveau de précision : forêt / végétation non-forestière assez dense / végétation claire ou nulle / eau.

Dans le cas de notre étude, nous obtenons un pourcentage de reconnaissances exactes relativement acceptable (supérieur à 70 %) pour la plupart des classes des niveaux II ou III qui ont été étudiées. Il faut cependant conclure que si les grandes classes d'utilisation du sol sont assez aisément discriminables les taux de reconnaissance obtenus pour les classes plus détaillées de l'occupation des terres ne sont pas en général compatibles avec les exigences des inventaires thématiques. Des conclusions analogues ont été formulées par certains auteurs américains (HELLER et *al.*, 1975).

Sur le plan plus restreint de l'analyse de la végétation, il faut souligner que les premiers niveaux de reconnaissance automatique correspondent à des unités physiologiques ; le premier niveau "floristique" étant celui où l'on introduit le caractère de dominance d'une espèce. Les données du satellite LANDSAT-1 permettent donc essentiellement de faire un tri dans le couvert végétal, de dégager des zones d'égales luminances dont on peut penser qu'elles ont des caractéristiques structurales voisines. Les caractéristiques qui sont en cause ici concernent l'homogénéité du toit de la végétation (pour les zones à faible recouvrement), considérées au pas d'analyse correspondant à la résolution de l'enregistrement.

On peut se demander si, en privilégiant certaines classes thématiques, dans le cadre d'une région écologique donnée, il ne serait pas possible d'améliorer les résultats. Ceci pourrait vraisemblablement être obtenu à l'aide de méthodes d'analyse discriminante ; cependant, il faut souligner alors les deux points suivants :

1) il est nécessaire de replacer la classe thématique visée dans un schéma d'analyse exhaustive du territoire considéré (afin de vérifier que d'autres unités n'ont pas la même réflectance, ce qui entraînerait des erreurs par commission).

2) il ne faut pas chercher à tout prix à reconnaître une classe définie *a priori* par le thématicien.

En effet, les résultats de classification des données de télédétection peuvent aboutir à une "parataxonomie" (DAVID et al. 1974) qui peut venir enrichir les classifications habituelles.

Du point de vue écologique, cette "parataxonomie" peut être très intéressante dans la mesure où elle résulte de l'exploitation de valeurs de luminance liées indirectement à la quantité d'énergie absorbée par les biogécénoses.

BIBLIOGRAPHIE

- Atlas du Languedoc-Roussillon., 1969. - Editions Berger-Levrault.
- BENZECRI J.P. et coll., 1973. - L'analyse des données ; tome 1 : La Taxinomie, 614 p ; tome 2 : L'analyse des correspondances, 619 p. Dunod édit., Paris.
- DAVID D.J., DERIES J. et VERGER F., 1974. - Cartographie automatique des marais et wadden à partir des données multispectrales d'ERTS-1 *Mémoires du Lab. de Géomorphologie de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes*, n° 26, 80 p.
- DERINK B., LACAZE B., 1976. - Le système ANTIDOTE (analyse et traitement informatique des données de télédétection). Etat du logiciel au 31.12.75. (en cours d'édition).
- DUGRAND R., 1964. - La garrigue montpelliéraine. Essai d'explication d'un paysage. P.U.F., Paris, 1 vol, 292 p.
- ELLS T., MILLER L.D. et SMITH J.A., 1972. - Programmer's Manual for RECOG (Pattern Recognition Programs). *Science Series n° 36*, Département of Watershed Sciences, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, U.S.A., 350 p.
- GODRON M., et al., 1968. - Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu - CNRS, Paris 292 p.
- HELLER R.C., et al., 1975. - Evaluation of ERTS-1 data for forest and rangeland surveys. USDA Forest Service Research paper PSW-112. 67 p.
- LACAZE B., 1975. - Le traitement des données multispectrales acquises par télédétection. Applications à l'étude de la végétation. Thèse de Docteur-Ingénieur. Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- N.A.S.A., 1972. - Data User Handbook, NASA/GSFC, Greenbelt, Hd, document révisé régulièrement.
- QUIEL F., 1975. - Directional-cosine and related pre-processing techniques : possibilities and problems in earth-resources surveys. *ESA/ASE Scientific & Technical Review*, 1, p. 1-21.
- REEVES R.G., 1975. - Manual of remote sensing. The american society of photogrammetry. Falls Church. Va. 2144 + XXVI pages.
- SCHMITHÜSEN J., 1948. - "Fliesenfefüge der Landschaft und "Okotop". *Berichte zur deutschen Landeskunde*, Band 5, p. 74-83 ; réédité in *Landschaft und Vegetation*, Selbstverlag des Geographischen Instituts der Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1974, p. 163-181.

- SMITH J.A., MILLER L.D. et ELLS T., 1972. - Pattern Recognition Routines For Graduate Training in the Automatic Analysis of Remote Sensing Imagery. *Science Series n° 3A*, Depart. of Watershed Sciences, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, U.S.A., 86 p.
- TRABAUD L., 1973. - Notice des cartes à grande échelle des formations végétales combustibles du département de l'Hérault. Document CEPE/CNRS n° 68, Montpellier, 33 p.
- TROLL C., 1939. - Lufbildplan und ökologische Bodenforschung. *Zeitschr. d. Gesellsch. F. Erkunde zu Berlin*.
- TROLL C., 1966. - Landscape ecology. *Publ. of the ITC-UNESCO Centre for Integrated Surveys*, Delft, Hollande, 17 p.