

3 OCT. 1983



9 SEP. 1986

PROYECTO

THESE

présentée

à l'Université PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

pour obtenir le titre de Docteur Ingénieur

par

Colette M. GANNEAU épouse GIRARD

UTILISATIONS DE LA TELEDETECTION EN AGRONOMIE

Soutenue le 17 Juin 1975 devant la Commission d'Examen

MM. LEMEE Président

ALOUGES Rapporteur

BOULAIN

GOILLOT

ROGNON

UTILISATIONS DE LA TELEDETECTION EN AGRONOMIE

Avant-Propos

INTRODUCTION

1

Prémière Partie : La Télédétection, phénomènes de base et méthodes 3

Chapitre I. LA COMPREHENSION DES PHENOMENES 3

I. Les caractéristiques des domaines du spectre électromagnétique	3
II. Les sources d'énergie électromagnétique	5
III. Le milieu perturbateur : l'atmosphère	5
IV. Le comportement des objets dans les différents domaines du spectre	6
A - Le visible et le proche infra-rouge	6
1) Les végétaux	6
a) les pigments	6
b) la structure interne	7
c) l'eau	8
2) Les sols	8
a) la texture	8
b) les éléments chimiques	8
c) l'humidité	10
d) l'état de la surface	11
B) L'infra-rouge moyen et thermique	11
1) Les végétaux	11
2) Les sols	12

Chapitre II. LES APPAREILS DE TELEDETECTION 14

I. Les appareils photographiques. Les photographies	14
A - Les émulsions et les filtres	14
1) Le visible	14
a) Le panchromatique	14
b) La couleur	15
2) Le proche Infra-rouge	15
a) l'infra-rouge noir et blanc	15
b) les émulsions fausse-couleur	17
B - Les photographies multispectrales	18
II. Les appareils non photographiques.	18
A - Les scanners multispectraux	19
B - Les scanners infra-rouge	21
1) Le Cyclope	21
2) Le L.M.D.	21

<u>Chapitre III. LE TRAITEMENT DES DONNEES</u>	23
I. La visualisation	23
A - Les visualisations sur papier photographique	23
B - Les visualisations sur listage d'ordinateur	24
II. L'augmentation des contrastes	24
<u>Chapitre IV. LES CONDITIONS D'UTILISATION</u>	26
I. Utilisation suivant les domaines spectraux, et les appareils	26
II. Utilisation suivant les supports	28
A - Les avions	28
B - Les ballons stratosphériques	28
III. Utilisation suivant les échelles et la résolution au sol	30
A - Les échelles	30
B - La résolution au sol	31
IV. Utilisation suivant les saisons	32
Deuxième Partie : Applications en Agronomie	35
<u>Chapitre V. LES PHOTOGRAPHIES FAUSSE-COULEUR</u>	35
I. Identification d'espèces et de variétés	35
II. Influence des apports chimiques	38
A - La fumure azotée	38
B - Le précédent cultural	39
C - Le désherbage chimique	39
III. Age de la culture	40
IV. Verse des céréales	41
V. Discussion	41
<u>Chapitre VI. LES ENREGISTREMENTS DANS L'INFRA-ROUGE</u>	43
I. L'infra-rouge moyen (3-5 µm)	43
A - Interprétation des données	43
B - Discussion	44
II. L'infra-rouge thermique (10-12 µm)	46
A - Le traitement de l'information	46
1) Le listage brut	46
2) Les listages des différents niveaux	46
3) Le listage trichrome	48
B - Interprétation des résultats	48

<u>Chapitre VII.</u>	<u>LA SPECTRORADIOMETRIE SUR LE TERRAIN</u>	51
I.	La réalisation des mesures	51
A -	Contraintes liées à la manipulation	53
1)	Le support	53
2)	L'horizontalité	53
3)	L'influence de l'expérimentateur	53
B -	Contraintes liées au soleil	54
1)	La couverture nuageuse	54
2)	Variations de l'angle solaire	54
C -	Contraintes liées à l'appareil	55
II.	Etablissement des courbes de réflectance	55
III.	Commentaire des courbes	57
A -	Influence du recouvrement du sol	57
B -	Influence de la teneur en eau des tissus	60
C -	Identification d'espèces	60
<u>Chapitre VIII.</u>	<u>LES ENREGISTREMENTS MULTISPECTRAUX EN ALTITUDE</u>	63
I.	Visualisation et analyse de l'information	63
A -	Identification d'espèces	63
B -	Influence du recouvrement du sol	65
C -	Influence de la structure interne du feuillage	65
II.	Comparaison entre les mesures au sol et les mesures en altitude	66
A -	Comparaison des bandes spectrales	66
B -	Comparaison des résultats	67
1)	Influence du recouvrement du sol	67
2)	Identification d'espèces	67
3)	Influence du port des végétaux	68
4)	Influence de la structure du champ	68
C -	Conclusion	69
<u>Chapitre IX.</u>	<u>LES PHOTOGRAPHIES PRISES A HAUTE ALTITUDE</u>	70
I.	Problèmes d'interprétation des photographies-ballon	70
II.	Interprétation des photographies	71
A -	Description des unités	71
B -	Exemple d'interprétation d'une photographie prise de ballon	72
C -	Exemple de description d'une unité	72
D -	Discussion	73

III. Les cartes synthétiques	73
A - Calcul des distances	73
B - Traitement des données	76
C - L'interprétation des résultats. Cartographie	76
IV. Les cartes thématiques	76
A - La géologie	77
B - La géomorphologie	77
C - L'occupation du sol	79
D - Discussion	80
V. Comparaison des unités de paysage et des petites régions agricoles	80
A - Les petites régions agricoles	80
B - Les unités de paysage	81
C - Comparaison des petites régions agricoles et des unités de paysage	81
VI. Conclusion	83
<u>CONCLUSIONS GENERALES</u>	85
Bibliographie	88

AVANT - PROPOS

Ce n'est pas en une page que je pourrai remercier tous ceux qui ont permis, à quel que titre que ce soit, la réalisation de ce mémoire ; qu'ils trouvent néanmoins ici le témoignage de ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord assurer de ma respectueuse gratitude Monsieur le Professeur LEMEE, Directeur du Laboratoire d'Ecologie Végétale de l'Université Paris-Sud, qui m'a fait le grand honneur de bien vouloir patronner cette thèse.

Je remercie également Monsieur ALOUGES, Gérant du G.D.T.A., grâce à qui j'ai pu disposer des divers documents : photographies et images, qui ont fait l'objet des applications en Agronomie. Malgré les difficultés rencontrées pour la réalisation des missions, c'est souvent grâce à sa bonne volonté et à sa bienveillance que j'ai pu disposer de documents sur la zone de Grignon.

Monsieur le Professeur ROGNON, du laboratoire de Géographie Physique, Paris VI, a bien voulu s'intéresser à mon travail et revoir le manuscrit de cet ouvrage : qu'il en soit très vivement remercié ici.

Monsieur le Professeur BOULAINNE, m'ayant reçue dans son laboratoire, m'a conseillé d'entreprendre ces études en Télédétection et n'a cessé de me prodiguer conseils et encouragements pour l'orientation de ces travaux : qu'il trouve ici le témoignage de ma reconnaissance.

Monsieur GOILLOT m'a prodigué toute l'aide dont j'avais besoin dans le domaine de la Physique et de la Métrologie. J'ai trouvé auprès de lui une compréhension des problèmes liés aux mécanismes biologiques dont je tiens à le remercier particulièrement.

Je tiens à remercier Messieurs FOURBET, HUET et RECAMIER, du S.E.I., qui m'ont apporté toute l'information au sol concernant les parcelles expérimentales de Grignon.

Monsieur COSTES, Directeur du Laboratoire de Chimie analytique, a bien voulu nous prêter pendant une année son spectroradiomètre ISCO. Il m'a manifesté depuis longtemps son intérêt pour la Télédétection et m'a encouragée dans cette voie : qu'il en soit vivement remercié ici.

Je voudrais aussi remercier Monsieur GUY qui a bien voulu, dès le début de ces recherches, me prodiguer sa confiance, ses conseils et son aide bienveillante.

Je tiens à remercier l'ESRO en la personne de Monsieur TESSIER pour l'abondante bibliographie qu'il a bien voulu m'adresser.

Je remercie le personnel du C.N.E.S., tant du centre de calcul que du laboratoire de photographie, grâce à qui les différentes visualisations ont pu être réalisées.

Je remercie également Mesdames ELIE et JEZEQUEL, Messieurs BOSSE et VALLEE, pour leur collaboration technique ; grâce à eux, ce volume a pu être prêt en temps utile.

INTRODUCTION

S'il y a plus de trente ans que la photographie aérienne panchromatique est d'un usage courant, ce n'est qu'en 1966 que sont apparues les premières utilisations civiles des photographies aériennes en fausse-couleur. A cette même époque on commençait à parler de photographies multispectrales, ainsi que des possibilités d'utilisation de radiomètres dans l'infra-rouge.

C'est à partir de 1969 que le Centre National d'Etudes Spatiales a développé une branche d'activités "Ressources Terrestres" dont le but était de mettre au point des systèmes nouveaux de Télédétection et d'en promouvoir l'utilisation.

Dans cette intention, le Centre National d'Etudes Spatiales fit appel à des laboratoires qui s'intéressaient à ces techniques de télédétection, tels que le laboratoire de Pédologie de l'I.N.A. Paris-Grignon, qui a participé dès le début aux activités du groupe Ressources Terrestres du C.N.E.S.

C'est donc en tant que membre de ce groupe que nous avons d'abord travaillé de 1970 à 1971 sur des photographies multispectrales (dans le visible et le proche infra-rouge) sur la zone des parcelles expérimentales de Grignon, et sur une partie de la forêt de Rambouillet.

Pendant cette même période, des essais de radiométrie infra-rouge (dans la bande 3-5 µm) étaient réalisés.

Au cours de l'année 1972 une mission de radiométrie dans l'infra-rouge thermique(bande 10-12 µm) a été effectuée au-dessus du site de la station expérimentale de la Minière.

En 1973, une série de mesures de réflectance sur le terrain ont été faites de la fin de l'hiver jusqu'en été. Elles ont permis d'étudier, au champ, les variations de réflectance des sols selon leur nature, et de la végétation cultivée selon la période végétative. Une mission aéroportée avec un scanner multispectral a donné, en altitude, l'appréciation des réflectances des sols et des végétaux.

Cette mission ayant eu lieu en Juin, au même moment qu'une série de mesures au sol, la comparaison des deux types de documents était envisageable.

L'année 1974 a été placée pour nous sous le signe des ballons stratosphériques, puisqu'il nous a été alors possible d'étudier une mission ballon réalisée en 1971 et de la comparer avec des études couvrant le même territoire.

Toutes ces missions dans des bandes spectrales différentes et à des altitudes différentes ont été analysées en vue de leur utilisation en Agronomie. C'est l'ensemble de ces recherches qui est présenté ici et qui nous permettra de déterminer l'intérêt que représente chacune d'entre elles. En conclusion, nous verrons les voies de recherche prise actuellement en télédétection et comment elle peuvent être utilisées en Agronomie.

Première Partie

LA TELEDETECTION :

PHENOMENES DE BASE ET METHODES

Chapitre I

LA COMPREHENSION DES PHENOMENES

La télédétection constitue l'étude à distance des ondes électromagnétiques émises ou réfléchies par les objets.

Pour mener à bien cette étude, il faut connaître les différents domaines du spectre électromagnétique, les sources d'énergie utilisées ainsi que les perturbations pouvant être apportées par l'atmosphère.

Ensuite, pour interpréter correctement les enregistrements, il faut savoir quel est le comportement des objets dans les diverses bandes spectrales.

I.- LES CARACTERISTIQUES DES DOMAINES DU SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE

Le spectre électromagnétique est divisé en plusieurs domaines, qui ne sont pas tous utilisés en télédétection. Nous ne citerons que ceux utilisés. Le tableau 1 présente les noms donnés aux bandes spectrales, les longueurs d'onde les délimitant et les modes de télédétection adaptés à ces diverses bandes.

L'ultraviolet (290-400 nm) qui figure en tête est peu utilisé en télé-

détection, car il correspond à des longueurs d'onde fortement absorbées par l'atmosphère.

Il est immédiatement suivi par le domaine du *visible* (400-700 nm), dont les longueurs d'onde sont perçues par l'oeil humain. Ensuite se trouve l'*infra-rouge* dont trois bandes seulement sont utilisées en télédétection. Ce sont celles de l'*infra-rouge proche* (700-900 nm), de l'*infra-rouge moyen* (3 000-5 500 nm) et de l'*infra-rouge lointain* (8 000-14 000 nm) qui ne sont pas trop absorbées par l'atmosphère.

Enfin, avec les *hyperfréquences*, on aborde des longueurs d'onde d'ordre millimétrique, métrique et plus. Elles sont parfois utilisées en télédétection, car elles ont une bonne propagation dans l'atmosphère quelles que soient les conditions météorologiques. Elles n'ont pas encore été utilisées en France pour l'étude des ressources terrestres, car les appareils de détection sont sous secret militaire.

Domaine spectral	longueur d'onde	Appareils de Télédétection
<i>Ultra violet</i>	290 nm (*) 400 nm	Scanner ultra violet
<i>Visible</i>	700 nm	Photographies noir et blanc, couleur + Fausse-couleur
<i>Proche</i>		Infra-rouge noir & blanc
<i>Moyen</i>	900 nm 1 100 nm 3 000 nm 5 500 nm	Scanner infra-rouge et
<i>Thermique</i>	8 000 nm 14 000 nm	Thermographie infra-rouge
<i>Micro-ondes ou hyperfréquences</i>	K X C S L UHF P	Radar S.L.A.R. Scanner H.F. Radiomètre H.F.

(*) L'unité internationale des longueurs d'onde est le mètre. Il est recommandé d'employer ses sous-multiples : mm = 10^{-3} m, $\mu\text{m} = 10^{-6}$, nm = 10^{-9} m.

II.- LES SOURCES D'ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE

Dans les cas présentés, les sources d'énergie sont de deux types.

a) Pour le visible et le proche infra-rouge, c'est l'énergie réfléchie par les objets terrestres qui est captée. Cette énergie provient du rayonnement solaire.

Le soleil peut être assimilé à un corps noir dont la température absolue est de 6000°K. Il émet principalement autour de 450 nm.

b) Pour l'infra-rouge moyen et lointain, les appareils captent l'énergie émise par les objets.

La Terre qui constitue alors une des sources d'énergie peut être assimilée à un corps noir à la température moyenne de 300 °K. Elle émet principalement dans des longueurs d'onde autour de 10 μm.

III.- LE MILIEU PERTURBATEUR : L'ATMOSPHÈRE

Le rayonnement traversant l'atmosphère est soumis à des perturbations diverses, sélectives en fonction de la longueur d'onde. Elles sont dues à :

- l'absorption plus ou moins grande par le milieu,
- la diffusion ou diffraction,
- l'émission propre du milieu,
- la réfraction.

Donc, seule une partie du rayonnement solaire est transmise par l'atmosphère, et ceci, pour des portions bien définies du spectre électromagnétique. C'est ce que l'on appelle les "fenêtres de transmission" de l'atmosphère.

L'absorption d'énergie est due aux gaz atmosphériques. Les principaux gaz absorbants de l'atmosphère sont :

L'oxygène (O_2), l'ozone (O_3), l'eau (H_2O), le gaz carbonique (CO_2), l'azote (N_2).

IV.- LE COMPORTEMENT DES OBJETS DANS LES DIFFERENTS DOMAINES DU SPECTRE

A - LE VISIBLE ET LE PROCHE INFRA-ROUGE

Dans cette portion du spectre, les appareils de télédétection captent l'énergie solaire réfléchie par les objets.

La réflexion se fait de deux façons différentes selon que la surface réfléchissante est lisse ou rugueuse.

Dans le premier cas, il s'agit de la réflexion spéculaire obéissant à la loi de DESCARTES, dans le second cas, il s'agit de la réflexion diffuse (LAMBERT).

Pour un même objet, à une longueur d'onde donnée, il peut y avoir simultanément les deux types de réflexion. La réflexion totale correspond alors à la somme de la réflexion spéculaire et de la réflexion diffuse.

On définit la réflectance totale d'un objet pour une longueur d'onde donnée R_λ , comme le rapport de l'énergie totale réfléchie par unité de surface, à l'énergie incidente sur cette unité de surface.

Les sensations de couleur résultent de la réflectance des objets dans le visible.

La réflectance se mesure au moyen d'appareils tels que les spectroradiomètres. Les enregistrements permettent de tracer des courbes donnant la réflectance en fonction de la longueur d'onde.

Les courbes de réflectance varieront selon les objets.

1) Les végétaux .- Les courbes de réflectance des végétaux ont toutes la même allure. Elles présentent un maximum vers 550 nm, un minimum vers 650 nm, une brusque augmentation vers 750 nm qui se prolonge en un palier jusqu'à 1 300 nm suivie par un nouveau minimum à 1 400 nm.

Les causes de ces différentes valeurs sont les suivantes (figure 1) :

a) Les pigments :

Des recherches au laboratoire (L.A.R.S.*.) ont montré que les valeurs de la réflectance dans le visible étaient en relation avec la pigmentation des végétaux.

En effet, les chlorophylles contenues dans les chloroplastes des cellules végétales, absorbent les radiations vers 400 et 650 nm, tandis qu'elles n'absorbent pas les radiations vers 550 nm.

Il semble donc que les faibles valeurs de la réflectance dans le visible soient dues à l'absorption de certaines radiations par les pigments chlorophylliens.

* L.A.R.S.: Laboratory for Agricultural Remote Sensing.

Les autres pigments tels que le carotène et le xanthophylle ne semblent avoir que peu d'influence sur le comportement spectral des végétaux.

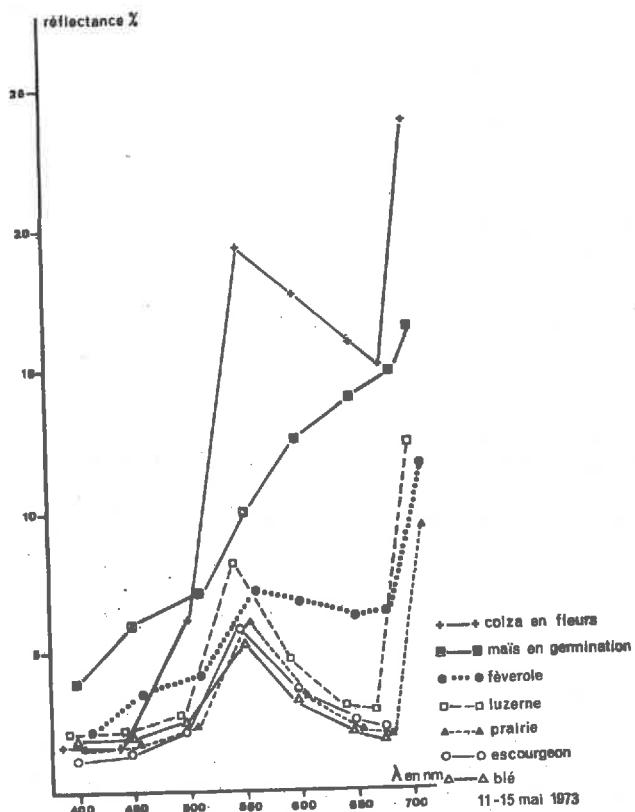


Figure 1 - Courbes de Réflectance dans le visible de plusieurs cultures.

b) La structure interne :

Dans la bande 750-1 300 nm, les pigments semblent influer peu sur la réflectance des végétaux. Les chercheurs se sont longtemps interrogés sur les facteurs responsables du fort pouvoir réfléchissant de la plupart des végétaux dans ce domaine spectral.

Les travaux les plus récents comme ceux de GAUSMANN conduisent à penser que c'est la structure interne du feuillage qui est principalement responsable des différentes valeurs de réflectance.

Les principaux tissus constituants habituels d'une feuille sont :

- l'épiderme supérieur recouvert par une cuticule plus ou moins épaisse.
- le parenchyme palissadique aux cellules allongées bien ordonnées
- le parenchyme lacuneux aux cellules de forme irrégulièr et présentant de nombreuses lacunes remplies d'air ou d'eau.
- l'épiderme inférieur. Compte-tenu de son revêtement cireux, la cuticule réfléchit bien les rayons lumineux.

Les ondes non réfléchies pénètrent l'épiderme et le parenchyme palissaire où les possibilités de cheminement sont réduites puisque les surfaces ne présentent que deux directions et que les indices de réfraction (du cytoplasma et des parois) sont voisins.

Par contre, dans le parenchyme lacuneux, les orientations de surface sont très différentes, et la présence d'air, de cytoplasma... conditionne des interfaces aux indices de réfraction très différents.

La possibilité de réflexion de la lumière est donc importante.

Si le parenchyme lacuneux est responsable de la réflexion dans le proche infra-rouge, on comprend pourquoi les végétaux qui ont un parenchyme lacuneux peu développé (le Blé, par exemple) réfléchissent moins bien le proche infra-rouge, que ceux qui ont un parenchyme lacuneux très développé (la Pomme de Terre, par exemple).

c) L'eau :

Au delà de 1 500 nm, les propriétés spectrales des feuilles des végétaux semblent être sous la dépendance directe de leur teneur en eau.

En effet, la comparaison de la courbe de réflectance d'une feuille avec la courbe d'absorption de l'eau montre que les faibles réflectances de la feuille coïncident avec la forte absorption par l'eau.

2) Les sols .- Ils ont des courbes de réflectance très différentes de celles des végétaux. D'autre part, des sols de nature différente auront des courbes de forme différente.

Les principaux caractères des sols influant sur leur réflectance sont les suivants.

a) La texture :

La texture joue apparemment un grand rôle dans le comportement spectral des sols : le comportement des sols argileux est différent de celui des sols sabloix.

Dans les sols argileux, l'eau liée est importante. Même sec, ils contiennent de l'eau qui pourra influer sur leur réflectance. Au contraire, les sols sabloix, lorsqu'ils sont très secs, ont une réflectance indépendante de l'eau.

b) Les éléments chimiques :

Des facteurs tels que la teneur en calcaire ou en matière organique risquent d'influier sur la réflectance des sols. Dans le visible, cela correspond à un phénomène connu. Dans la région parisienne, des sols riches ayant plus de 25 % de calcaire total ont des couleurs claires, et les sols ayant plus de 2 % de matière organique ont des couleurs sombres.

Nous avons établi sur le terrain des courbes de réflectance pour 3 sols différents. Les mesures ont été faites au mois de Mars sur les sols encore nus. L'analyse de ces sols a donné les proportions suivantes en calcaire et en fer.

—"sol à glauconie"	Ca CO ₃	57 %	- Fe	3,3 %
—"sol jaunâtre"	Ca CO ₃	65 %	- Fe	1,3 %
—"sol blanchâtre"	Ca CO ₃	67 %	- Fe	0,6 %.

L'étude des courbes de réflectance de ces sols montre que le "sol blanchâtre" riche en calcaire a les réflectances les plus fortes dans le visible et le proche infra-rouge.

Le "sol à glauconie" riche en fer, a, au contraire, les réflectances les plus faibles pour la même bande spectrale.

Le "sol jaunâtre" a des valeurs intermédiaires (figure 2).

Nous pensons que le calcaire, s'il est abondant, augmente la réflectance d'un sol, tandis que le fer, au contraire, la diminue, mais nous en ignorons la cause.

Nous ne possédons pas actuellement de moyens d'étude du mode d'action de ces facteurs dans le proche infra-rouge.

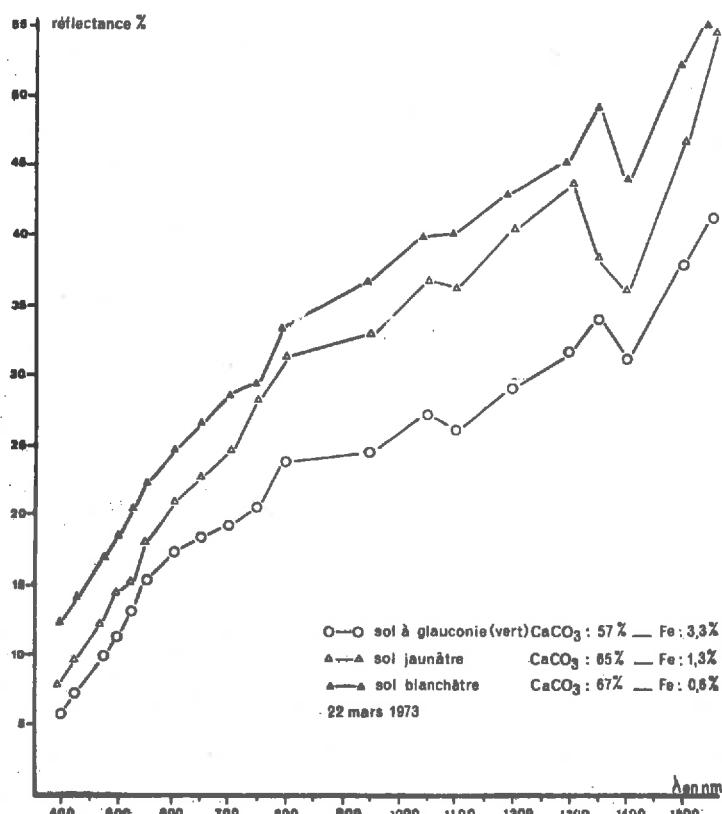


Figure 2 - Courbes de réflectance de différents sols établies à partir de mesures sur le terrain.

c) L'humidité :

Des mesures ont été faites sur le terrain au-dessus d'un sol plus ou moins humide. Nous avons ainsi pu établir des courbes de réflectance pour les 5 premiers cm du sol avec des taux d'humidité différents (voir figure 3).

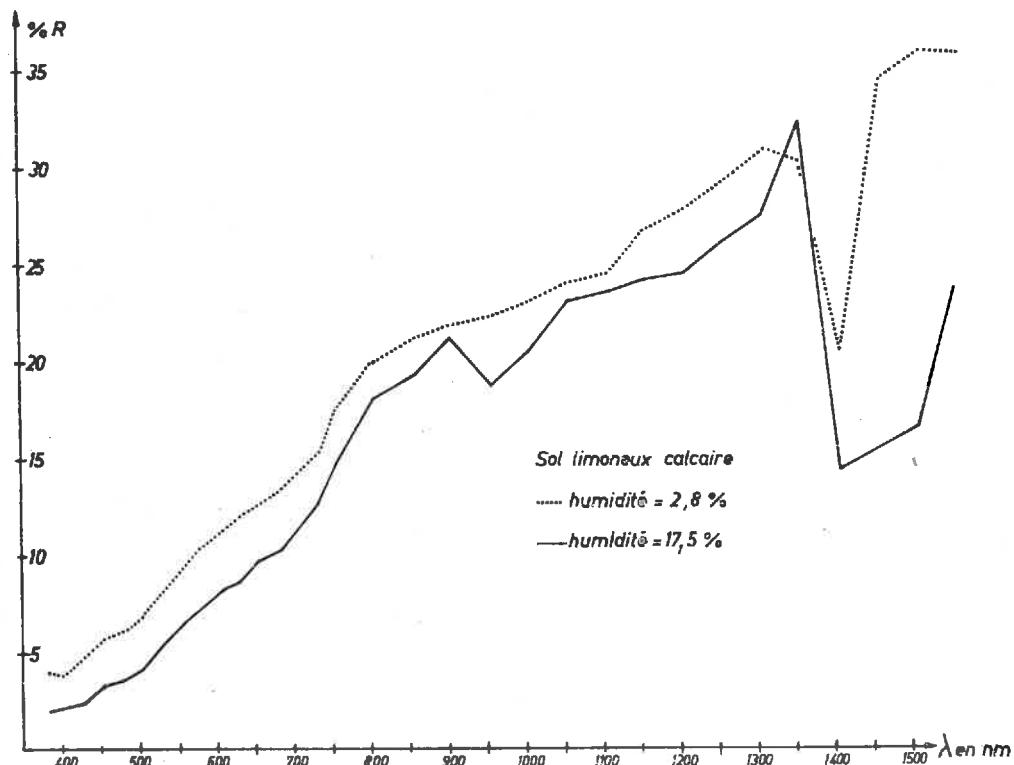


Figure 3 - Courbes de réflectance d'un sol plus ou moins humide.

Le sol dont l'humidité est la plus faible (2,8 %) a les plus fortes valeurs de réflectance dans le visible et le proche infra-rouge. La bande d'absorption de l'eau vers 1 400 nm est visible. Le sol plus humide (17,5 %) a des réflectances faibles dans le visible et le proche infra-rouge. La bande d'absorption due à l'eau est très marquée.

Les sols humides ont des réflectances plus faibles que les mêmes sols secs.

d) L'état de la surface :

L'observation visuelle de photographies aérienne et l'étude d'enregistrements dans le proche infra-rouge montrent que les sols à surface lisse (passage de rouleau, labour très ancien) ont une réflectance plus forte que les sols à surface rugueuse (labours récents, hersage). Mais nous ne disposons pas de mesures spectro-radiométriques dans ce cas, de même que nous n'avons pas de moyens d'apprécier facilement les rugosités relatives de différentes surfaces du sol.

L'état de la surface joue certainement un rôle très important dans le comportement spectral des sols, mais aucune recherche n'a vraiment été entreprise dans ce domaine, que ce soit en France ou à l'étranger.

Certains caractères sont utilisés depuis longtemps pour différencier des sols sur photographies aériennes. Il s'agit de la teinte ou de la couleur, qui permettent de distinguer des sols plus ou moins humides, ou des sols plus ou moins riches en certains éléments chimiques.

Mais si les distinctions sur ces caractères sont satisfaisantes pour une interprétation faite par un être humain, les travaux de BAUMGARDNER, GERB-MANN, KRINOW, KRISTOF,... montrent qu'une automatisation n'est pas possible.

En effet, on ne peut considérer la réflectance d'un sol, et particulièrement sa couleur dans le visible que pour la partie superficielle du sol, c'est-à-dire les premiers centimètres. En profondeur, pour un sol donné, la réflectance et la couleur varient.

D'autre part, la réflectance de la partie superficielle d'un sol peut beaucoup varier selon la plus ou moins grande rugosité de la surface du sol, et selon son humidité.

B - L'INFRA-ROUGE MOYEN (3-5 μm) ET THERMIQUE (8-14 μm).

Dans ces domaines spectraux correspondant aux fenêtres atmosphériques, on étudie surtout l'énergie émise par les objets :

- dans la bande 3-5 μm, il s'agit de réflexion et d'émission pour le jour, d'émission la nuit.
- dans la bande 8-14 μm, la réflexion est négligeable et même dans la journée, l'émission est prépondérante.

1) Les végétaux .-

L'énergie, que les végétaux reçoivent, provient du soleil et du milieu ambiant. Une plante est en équilibre d'énergie avec son environnement lorsqu'il y a égalité entre l'énergie reçue, provenant du soleil, de l'atmosphère et des ondes

réfléchies par les objets, et l'énergie perdue par la convection, la transpiration et l'émission propre au végétal.

Les végétaux ne peuvent supporter un échauffement trop grand. Si la température de l'air est élevée, certains phénomènes se produisent, abaissant la température du végétal.

Par exemple la transpiration, par évaporation d'eau, permet de perdre de l'énergie. La transpiration est contrôlée par l'ouverture des stomates. Suivant leur plus ou moins grande ouverture, la résistance à la diffusion des feuilles est plus ou moins grande.

Pendant une très belle journée d'été, on constate que les feuilles en pleine lumière ont généralement leurs stomates fermés, ce qui réduit leur dessèchement. Les feuilles dans l'ombre ont leurs stomates partiellement ou totalement ouverts.

Pendant la nuit, les radiations que peut absorber un végétal sont très faibles. Les stomates sont généralement fermés et la résistance à la diffusion est très grande.

L'équation du bilan d'énergie d'une plante, en état d'équilibre, est :

$$\Phi_a + \Phi_e + \Phi_s + \Phi_l = 0$$

où Φ_a : flux absorbé

Φ_e : flux émis

Φ_s : chaleur sensible

Φ_l : chaleur latente

Tout ceci est valable pour des végétaux sains disposant de tous les éléments nécessaires à leur vie. Certaines anomalies peuvent être détectées par radiométrie. Les végétaux souffrant d'une mauvaise alimentation en eau ont un comportement différent, car le manque d'eau se traduit par une augmentation de la température du feuillage, des phénomènes atmosphériques tels que le vent abaissant la température du feuillage. Cette baisse de température diminue la réponse enregistrée.

2) Les sols. -

Les sols, comme les végétaux, reçoivent de l'énergie provenant du soleil, de l'atmosphère, et des objets voisins. Les échanges de chaleur dans les sols sont fonction de la conduction thermique des éléments solides et liquides,

et pour les pores remplis d'air de la radiation et de la convection. Le jour, les sols absorbent de la chaleur, la nuit, ils restituent tout ou partie, parfois même plus (automne), de cette énergie. Le comportement thermique des sols est surtout fonction de sa conductivité thermique et de l'émissivité de sa surface.

Pour un même sol, la conductivité thermique est plus faible quand il est sec que lorsqu'il est humide, car la conductivité thermique de l'air ($0,06 \text{ cal cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) est inférieure à celle de la vapeur d'eau ($1,4 \text{ cal cm}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). De même, lorsque la porosité d'un sol augmente, la quantité d'air contenue dans le sol augmente et sa conductivité diminue ; il s'échauffera plus vite en surface, mais se refroidira aussi plus vite en surface.

(C'est le contraire en profondeur, puisque sa chaleur massique est augmentée).

Les variations dans le temps de la température d'un sol sont les suivantes : dans la journée, les variations des échanges de chaleur suivent avec déphasages celles de la radiation solaire.

Au lever du soleil comme au coucher du soleil, les apports d'énergie par celui-ci sont très faibles sur un sol horizontal. Dans la journée, les apports sont plus importants et le flux de chaleur dans le sol est dirigé vers le bas.

Pendant la nuit, il n'y a pas d'apport de chaleur par le soleil. Le sol perd de l'énergie, le flux de chaleur est dirigé vers le haut.

Nous avons vu que certains facteurs, comme l'humidité ou une diminution de porosité, augmentent la conductivité thermique des sols. Des facteurs extérieurs aux sols, tels qu'une couverture végétale, changent leur comportement thermique. Une culture bien développée arrêtera la progression des radiations thermiques. Le jour, celles-ci atteindront peu le sol, car elles seront arrêtées par la culture. La nuit, il n'y a pas ou très peu d'échanges thermiques entre le sol et l'air, la végétation jouant le rôle d'écran. Les variations de température d'un sol couvert d'une végétation sont plus faibles que celles d'un sol nu.

Chapitre II

LES APPAREILS DE TELEDETECTION

Les appareils présentés ci-dessous sont ceux qui ont été utilisés au cours des différentes missions que nous avons étudiées. Il faut distinguer deux types d'appareils.

- les appareils photographiques enregistrent l'énergie réfléchie par les objets dans le visible et le proche-infra-rouge. L'énergie après focalisation va impressionner une plaque sensible, où à la suite d'une réaction chimique, il y aura transformation de sels d'argent.

- les appareils non photographiques enregistrent l'énergie réfléchie par les objets dans le visible et le proche infra-rouge, et l'énergie émise par les objets dans l'infra-rouge moyen et lointain. L'énergie après focalisation sera analysée par un ou plusieurs détecteurs qui transformeront les variations d'énergie en variations de potentiel électrique. C'est un phénomène électrique qui est alors enregistré le plus souvent sur bande magnétique.

I.- LES APPAREILS PHOTOGRAPHIQUES - LES PHOTOGRAPHIES

A - LES EMULSIONS ET LES FILTRES

Il existe plusieurs émulsions enregistrant le visible, le proche infra-rouge, ou une zone spectrale comprise dans ces deux domaines. Elles vont être décrites suivant leur domaine de travail.

1) Le visible.- Il y correspond deux grands types d'émulsions.

a) Le panchromatique :

Les émulsions panchromatiques (noir et blanc) traduisent les

différences de réflectance des objets par des teintes allant du blanc pour les objets très réfléchissants au noir pour les objets non réfléchissants, et passant par diverses nuances de gris pour des réflectances moyennes.

Ces émulsions sont connues depuis longtemps et ont été les premières employées pour les photographies aériennes. Elles présentent les avantages suivants : elles sont sensibles, elles ont un bon pouvoir de résolution et elles ne nécessitent pas de précautions spéciales de conservation.

b) La couleur :

Les émulsions *couleur* enregistrent la même bande spectrale que les émulsions panchromatiques, mais au lieu de traduire les différentes réflectances par des nuances de gris, elles les traduisent par des couleurs. Leur principe de fonctionnement est le suivant : elles sont constituées de trois couches colorées disposées sur un support, chaque couche étant sensible à une petite bande spectrale. Il s'agit d'une couche jaune sensible au bleu, d'une couche magenta sensible au vert, et d'une couche cyan sensible au rouge. (Le magenta est une sorte de rouge et le cyan une sorte de bleu). Après exposition et traitement, les couches donneront des couleurs correspondant à celles réfléchies par les objets. La couche jaune donnera du bleu, la couche magenta du vert, et la couche cyan du rouge, ceci afin de restituer au mieux les couleurs naturelles.

Vis-à-vis des émulsions panchromatiques, les émulsions couleur ont un grain plus grossier et un pouvoir résolvant plus faible. D'autre part, une température élevée ou un taux d'humidité important peuvent provoquer des altérations des couches sensibles.

Pour des prises de vues aériennes, le voile atmosphérique donne un aspect bleuté et on doit utiliser un filtre jaune pour en diminuer l'effet.

L'emploi des émulsions couleur est assez délicat, et comme le résultat coloré sur tirage papier n'est pas toujours très fidèle, et le prix de revient élevé, cela explique que ces émulsions soient peu utilisées.

2) Le proche infra-rouge .-

a) L'infra-rouge noir et blanc :

A ce domaine spectral qui va de 700 à 900 nm correspondent des émulsions *infra-rouge noir et blanc*. Leur réponse en grisés se fait selon le même principe que pour les émulsions panchromatiques. Les objets très réfléchissants dans cette bande spectrale seront traduits par du blanc, ceux qui ne le sont pas seront traduits par du noir. Les objets à réflectance moyenne seront traduits par différentes

nuances de gris.

Les émulsions infra-rouge noir et blanc ont une très forte sensibilité dans le bleu, une sensibilité nulle dans le vert et une forte sensibilité dans l'infra-rouge. Pour ne garder que la bande du proche infra-rouge, il est nécessaire d'utiliser des filtres jaune éliminant les radiations bleues.

Le grain de ces émulsions est plus grossier que celui des émulsions panchromatiques.

Elles traduisent l'humidité. En effet, l'eau liquide capte les radiations infra-rouge. Toute surface d'eau liquide apparaîtra noire sur les photographies. De même, un sol apparaîtra plus sombre s'il est humide que s'il est sec.

Elles mettent en évidence des différences entre peuplements végétaux, car dans leur domaine de travail, les valeurs de réflectance des végétaux diffèrent beaucoup selon les espèces. C'est ce que montre la figure 4 qui rassemble les courbes de réflectance de trois types de cultures. Ces courbes proviennent de mesures au champ que nous avons faites le 12 Mai 1973.

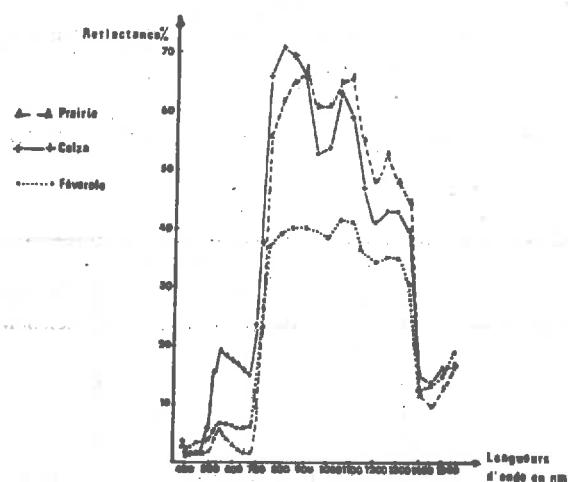


Figure 4 - Courbes de réflectances établies à partir de mesures faites sur le terrain, pour trois cultures différentes.

L'interprétation des photographies infra-rouge est moins courante et plus délicate que celle des photographies panchromatiques. Si l'on ne peut disposer que d'une seule émulsion, on choisit d'habitude le panchromatique. D'autre part, l'infra-rouge est surtout intéressant quand on peut le comparer avec une émulsion correspondant à un autre domaine spectral. Il faut alors disposer en même temps de deux caméras, ce qui augmente le prix de revient.

b) Les émulsions fausse-couleur :

Il existe un dernier type d'émulsion, dont le domaine de travail se situe dans le milieu du visible et le début du proche infra-rouge, soit de 500 à 900 nm. On les nomme émulsions *fausse-couleur*, car elles donnent un rendu coloré qui ne correspond pas à la réalité. Ce sont des émulsions à trois couches sensibles, dont le principe est semblable à celui des émulsions couleurs normales.

Par exemple, le film Kodak Aerochrome infra-rouge 2443 possède trois couches :

- .une jaune sensible à la bande verte,
- .une magenta sensible à la bande rouge,
- .une cyan sensible au proche infra-rouge, mais aussi à une partie du vert.

On incorpore à l'émulsion un filtre jaune placé au-dessus de la couche cyan pour éliminer cette sensibilité au vert.

D'autre part, les trois couches sont sensibles à la bande bleu, et on utilise l'émulsion avec un filtre jaune ou orange opaque placé devant l'objectif de la caméra. Après exposition et traitement du film, on obtient respectivement pour chaque couche la couleur qui suit : du bleu, du vert et du rouge. Le tableau suivant permet de mieux comprendre le fonctionnement de cette émulsion en mettant en comparaison un film couleur et un film fausse-couleur de Kodak.

Tableau 1.- Principes de fonctionnement du film couleur et du film fausse-couleur (*infra-rouge couleur*).

<i>Bandes spectrales</i>	<i>Bleu</i>	<i>Vert</i>	<i>Rouge</i>	<i>Infra-rouge</i>
<i>Kodachrome</i>				
Sensibilité normale	bleu	vert	rouge	-
Couleur des couches	jaune	magenta	cyan	-
Couleur résultante	bleu	vert	rouge	-
<i>Infra-rouge couleur</i>				
Sensibilité normale	bleu	vert	rouge	<i>infra-rouge</i>
Sensibilité avec filtre Wratten B 12	-	vert	rouge	<i>infra-rouge</i>
Couleur des couches	-	jaune	magenta	cyan
Couleur résultante	-	bleu	vert	rouge

La combinaison des sensibilisations des couches donne des photographies où la végétation saine, compte-tenu de sa forte réflectance dans le proche infrarouge, est de diverses couleurs rouges et les sols qui ont de fortes réflectances dans le jaune orangé sont de couleur bleu verdâtre. Tous les objets rouges apparaissent en jaune.

Voici par exemple un classement des colorations de certains végétaux établi d'après nos propres observations de photographies fausse couleur

ROSE	ROUGE	BRUN	VIOLET
<u>Betula verrucosa</u>	<u>Fagus sylvatica</u>		<u>Picea excelsa</u>
	<u>Quercus pedunculata</u>	<u>Larix</u> sp.	
<u>Castanea sativa</u>			<u>Pinus sylvestris</u>
	<u>Pteris aquilina</u>		<u>Calluna vulgaris</u>

B - LES PHOTOGRAPHIES MULTISPECTRALES

Ce sont des photographies prises simultanément par plusieurs caméras dont les émulsions ont été dans les cas que nous avons étudiés : le panchromatique, la couleur, l'infra-rouge noir et blanc et la fausse-couleur.

Ces photographies multispectrales donnent quatre photographies du même paysage.

III.- LES APPAREILS NON PHOTOGRAPHIQUES

Les appareils que nous avons utilisés, que ce soit dans le visible ou dans l'infra-rouge étaient des appareils passifs (uniquement récepteurs) à balayage.

Le principe du balayage est illustré par la figure 5. Un réflecteur rotatif (miroir, plan, polygonal...) dont la vitesse de rotation est adaptée à la vitesse de déplacement du véhicule (avion ou satellite), balaye la zone survolée suivant des bandes parallèles. Ces bandes sont perpendiculaires à la ligne de vol de l'avion.

A un instant donné, t , le réflecteur reçoit l'énergie provenant de la surface s . A l'instant $t + 1$, le réflecteur reçoit l'énergie provenant de la surface s_1 . s et s_1 sont adjacentes sur la bande de balayage considérée.

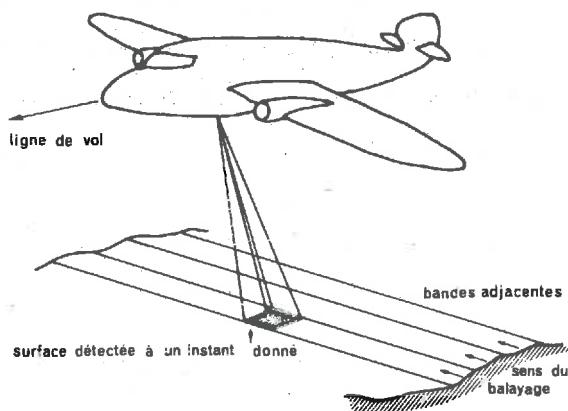


Figure 5 - Principe du balayage.

Quand le réflecteur entame la rotation ou l'oscillation suivante, il y correspond sur le terrain une autre bande de balayage.

A - LES SCANNERS MULTISPECTRAUX

Le Centre National d'Etudes Spatiales a réalisé des missions avec le scanner DAEDALUS.

Ce scanner enregistre l'énergie réfléchie par les objets dans une bande spectrale, s'étendant de 380 à 1 100 nm, découpée en canaux, de la façon suivante :

		Δe		Δe		
Canal 1	380-420 nm	3 %	-	Canal 6	600-650 nm	0,2 %
Canal 2	421-450 nm	1,3 %	-	Canal 7	650-700 nm	0,2 %
Canal 3	450-500 nm	0,4 %	-	Canal 8	700-800 nm	0,2 %
Canal 4	500-550 nm	0,3 %	-	Canal 9	800-890 nm	0,25 %*
Canal 5	550-600 nm	0,2 %	-	Canal 10	920-1100 nm	0,35 %

Δe représente la différence de réflectance relative minimale détectable.

* signalons qu'entre le canal 9 et le canal 10, il n'y a pas de détecteur enregistrant l'énergie comprise entre 890 et 920 nm.

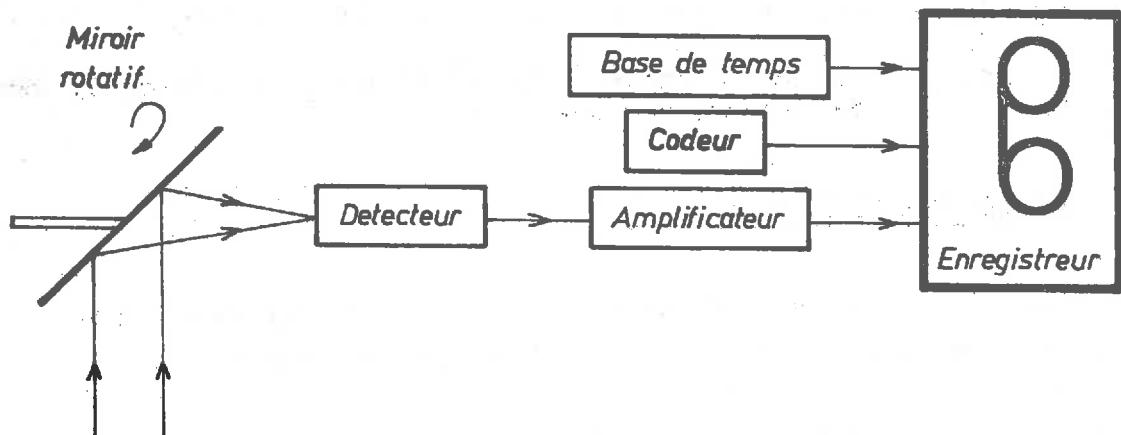


Figure 6 - Schéma de fonctionnement du scanner DAEDALUS.

Le réflecteur est un miroir rotatif tournant à 80 tours par seconde. A un tour correspondent 1 000 points. Le champ instantané du miroir est de 2,5 mrd. (voir figure 6).

L'énergie reçue par le réflecteur est dirigée vers les détecteurs qui la transforment en tension électrique, pré-amplifié dans l'amplificateur. Ce signal électrique est ensuite enregistré sur une bande magnétique.

Sur cette même bande magnétique, la base de temps imprime ses signaux qui servent de référence temporelle. Ils correspondent à deux sources de calibration internes qui sont vues avant et après balayage, donnant ainsi une référence pour chaque ligne de balayage et pour chaque canal (voir figure 7).

Sur la même bande magnétique, les paramètres de vol sont codés, grâce au codeur sous forme d'un message télémesure :

- 1er mot : cap
- 2e mot : roulis
- 3e mot : tangage
- 4e à 8e mot : informations Doppler.

La cadence est de 4 messages par seconde.

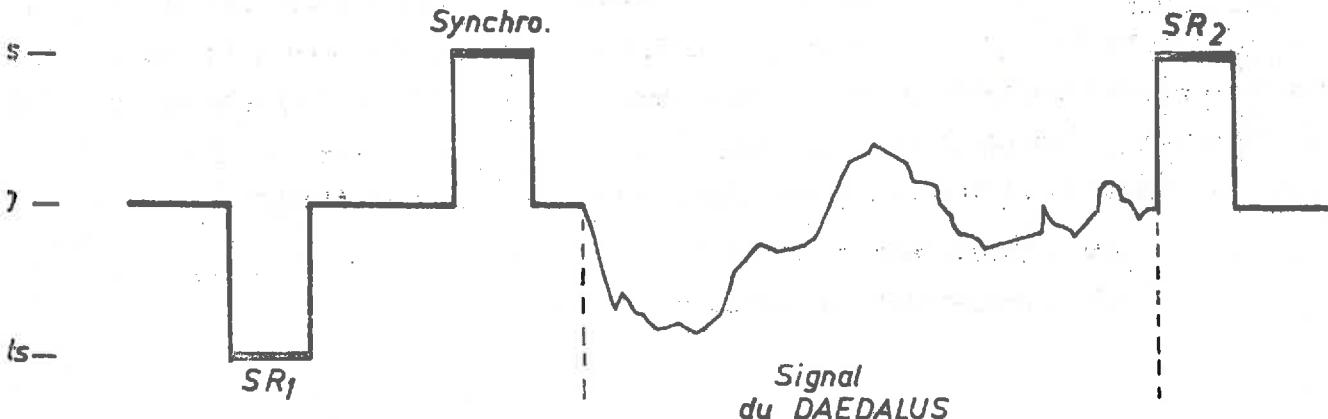


Figure 7 - Schéma du signal du scanner DAEDALUS.

SR₁ et SR₂ : flux émis par les deux sources de référence.

synchro : top de référence indiquant le roulis de l'avion au moment de la prise de vues.

B - LES SCANNERS INFRA-ROUGE

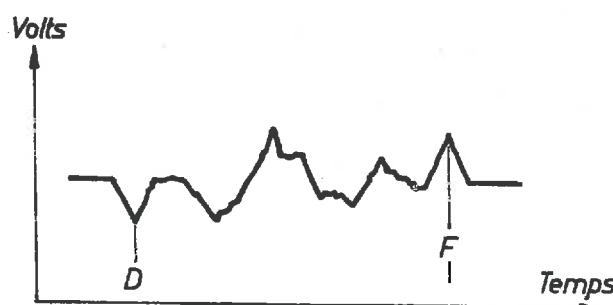
Les missions effectuées par le C.N.E.S. ont utilisé deux types de scanners infra-rouge, enregistrant l'énergie émise par les objets.

1) Le Cyclope .- Il enregistre l'énergie émise par les objets dans la bande 3-5 μm. L'appareil comporte un miroir tournant qui balaye la surface survolée bande à bande. La vitesse de rotation du miroir est de : 70 tours/seconde et le champ instantané de : 5 milliradians. L'angle de balayage : 120°.

L'énergie reçue par le miroir est ensuite dirigée vers le détecteur puis l'enregistreur qui traduit des différences d'intensité d'énergie par des différences de potentiel d'un courant électrique.

Les données enregistrées sur bande magnétique sous forme analogique, sont de nature purement qualitative, comme le montre la figure 8.

Figure 8 - Schéma du signal du Cyclope.



2) Le L. M. D. .- Le principe de fonctionnement de ce radiomètre fabriqué par le laboratoire de Météorologie Dynamique du C.N.R.S. est le même que celui du Cyclope. Une différence importante entre les deux appareils est liée à la présence, dans le cas du L.M.D., d'un corps noir, qui est "vu" à la fin du balayage et qui donne ainsi un niveau de référence énergétique, comme le montre la figure 9.

CAL : Etalonnage du corps noir

TCN : Température du corps noir.

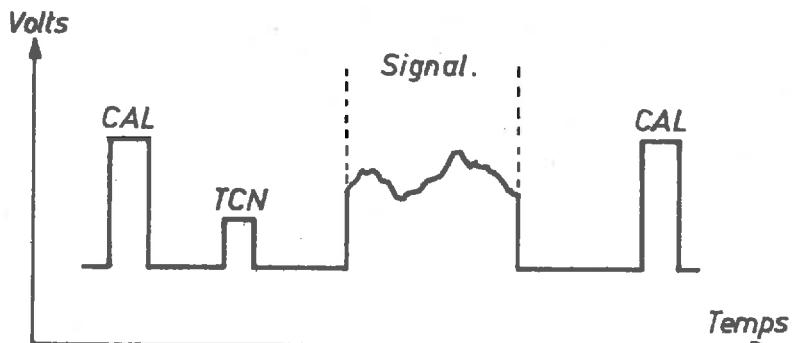


Figure 9 - Schéma du signal du LMD

Les données enregistrées par le radiomètre sont des données quantitatives et qui sont numérisées avant d'être enregistrées sur la bande magnétique.

Le L.M.D. travaille dans la bande 10-12 μ . La vitesse de rotation du réflecteur est de 1 tour/seconde. L'angle d'ouverture est de 10 milliradians. Le L.M.D. peut enregistrer les températures comprises entre -30°C et +60°C. Pour une mission particulière, on peut le régler dans une fourchette de températures données, ce qui permet d'avoir une plus grande précision dans l'intervalle ainsi choisi. La résolution thermique indiquée par le constructeur est de 0,1°C.

L'angle de balayage est de 87° 20' .

Chapitre III

LE TRAITEMENT DES DONNEES

Nous avons utilisé au cours de différentes missions des appareils de télédétection enregistrant les données sous forme analogique ou sous forme numérisée. Citons comme exemple d'enregistrement analogique : les bandes magnétiques du Cyclope ou les émulsions photographiques des caméras.

En effet, un enregistrement analogique fait correspondre à une variation d'intensité d'un phénomène, une variation d'intensité d'un autre phénomène.

Par contre, un enregistrement numérisé fait correspondre à diverses intensités d'un phénomène des valeurs chiffrées. C'est le cas du radiomètre LMD. Dans ce cas, l'enregistrement pourra être traité directement par ordinateur et subir des transformations automatiques.

I.- LA VISUALISATION

On désigne sous ce terme toute présentation des données sous une forme analysable par l'oeil. Les photographies représentent un type de visualisation. Il y en a d'autres, comme les listages d'ordinateur, les courbes, les tableaux...

A - LES VISUALISATIONS SUR PAPIER PHOTOGRAPHIQUE

Dans cette catégorie sont regroupées les photographies et les images obtenues à partir de scanners multispectraux ou de radiomètres. Tous les appareils que nous avons utilisés étant des appareils à balayage, on distingue les lignes de balayage sur l'image obtenue sur papier photographique. Leur aspect général, ainsi que les déformations géométriques qui existent souvent sur ces visualisations,

empêchent de les confondre avec de vraies photographies, bien que le support soit le même.

B.- LES VISUALISATIONS SUR LISTAGES D'ORDINATEURS

Les données enregistrées sur bandes magnétiques (dans le cas des scanners multispectraux et des radiomètres) peuvent être analysées par un ordinateur. Des programmes ont été mis au point par des informaticiens, permettant de traduire l'information sous forme de dessins en noir et blanc ou en trois couleurs avec des symboles alphanumériques.

Nous verrons dans la 2ème Partie l'utilisation que nous avons pu faire de ce type de visualisation (figure 10).

```
-----  
88 IS $$$$$$$$$$$$$$$$$ $$$$ $ $$$$$$$$$  
89 I$$$$$$$$$$$$$$$$ $$$$ $ $$$$$$$$$  
90 I$$$$ S $$$$$$$$$$$$$ $$$$ $ $$$$$$ S  
91 I$$ S $$$$$$$$$$$$$ $$$$ $ $ $$$$$$ S  
92 I$$$$$$$$$$ $$$$$$ $$$$$$ $$$$$$ S $ $$$$$$  
93 I$$$$ S $$$$$$ $$$$$$ $$$$$$ $$$$$$ $$$$  
94 I$$$ $$$$$$ $$$$$$ $$$$$$ $$$$$$ $$$$ S S  
95 I$$$ $$$$$$ $$$$$$ $$$$$$ $$$$$$ $$$$ SSS  
96 IS $S $$$$$$ $$$$$$ $$$$$$ $$$$$$ $$$$$$ SSS  
97 I $S $$$$ S $$$$$$ $$$$$$ $$$$$$ $$$$ SSS  
98 I $$$$ S $$$$$$ $$$$$$ $$$$ $$$$ SSS  
99 I $ $$$$$$ $$$$ $$$$ S $ $$$$ $$$$ $$$$  
100 I$$$$$ $$$$ $$$$ $$$$ S $ $$$$ $$$$  
101 I $$$$$$ $$$$ $$$$ $$$$ S S $ $$$$ $$$$  
102 I $ $$$$ $$$$ $$$$ S $ $ $$$$ $$$$  
103 I $S $$$$ $$$$ $$$$ S $$$$ $$$$
```

Figure 10 - Exemple de visualisation.

Une fois la visualisation réalisée sous une forme ou sous une autre, il peut être nécessaire, pour mettre en évidence certains phénomènes, d'en augmenter les contrastes.

II.- L'AUGMENTATION DES CONTRASTES

Pour étudier les visualisations sur film d'enregistrements multispectraux, nous avons utilisé un système électronique d'isodensités colorées : le Digicol 12S distribué par MATRA.

Cet appareil comprend une caméra de télévision sous laquelle on place le film à étudier. Le film est éclairé de façon uniforme par une table lumineuse. La caméra balaye ligne à ligne la surface du film étudié. L'information qu'elle capte et qui correspond à différents niveaux d'intensité lumineuse est dirigée dans un ordinateur. Le système Digicol dont nous avons pu disposer, pouvait analyser 32 niveaux différents de densité. Son système électronique permettait d'affecter

32 couleurs aux 32 niveaux. Ces couleurs étaient constituées par les 8 couleurs suivantes : bleu, jaune, vert, orange, rouge, brun, violet, magenta, divisées chacune en 4 intensités différentes.

C'est donc une image en couleur du film qui apparaissait sur l'écran de télévision. Un système électronique permettant de faire varier comme on le désire la correspondance couleur/niveau de densité, nous avons fait plusieurs essais et n'avons gardé que la combinaison qui nous semblait mettre le mieux en valeur le phénomène étudié (différences de réflectance).

En effet, s'il existe pour une image donnée beaucoup de codages très différents, tous n'ont pas le même intérêt. L'expérience nous a montré que celui donnant le plus bel effet visuel était le plus souvent le meilleur.

Un des inconvénients principaux de ce type de codage est de faire se jouxter des couleurs très voisines, ou au contraire très différentes, qui montrent des limites qui n'ont parfois aucune réalité. Les codages n'ont pas tous un sens.

Il faut donc utiliser cette densitométrie colorée avec beaucoup de prudence. Mais un utilisateur averti y trouve de précieuses indications qui lui permettent un travail plus rapide.

Chapitre IV

LES CONDITIONS D'UTILISATION

I.- UTILISATION SUIVANT LES DOMAINES SPECTRAUX, ET LES APPAREILS

Les caractéristiques spectrales des objets varient d'un domaine spectral à un autre. Par exemple, deux objets confondus dans le visible, car ils ont la même reflectance, seront distingués dans le proche infra-rouge, car leur réflectance sera alors différente. D'autre part, certains objets, comme l'eau, ont une très forte absorption dans des domaines tels que l'infra-rouge. Les bandes de l'infra-rouge ne pourront donc pas être utilisées par exemple en Océanographie.

Notre expérience personnelle de différents systèmes de télédétection, enregistrant diverses bandes du spectre électromagnétique, nous a permis d'établir le tableau suivant (tableau 2) qui regroupe les applications, en Agronomie et dans d'autres domaines de différents appareils.

Appareil	Bande spectrale	Applications possibles
Caméras métriques ou non. Caméras multibandes. Appareils multispectraux.	300 à 1 500 nm	Connaissance de l'état de développement et de santé des végétaux, en agronomie et foresterie. Etude des sols pour la cartographie. Réalisation d'inventaires. Etude du développement urbain. Utilisation pour l'aménagement du territoire. Base d'études océanographiques et aquatiques. Utilisations en géologie.
Radiomètres et Scanners infra-rouge	3 000 à 12 000 nm	Etudes micro-climatiques. Connaissance des zones gélives. Etude de l'hydromorphie et de l'aération des sols. Connaissance de l'état sanitaire des végétaux. Surveillance des zones forestières. Détection des incendies. Surveillance des troupeaux en pâture extensive. Détection de pollutions en eau douce et sur les océans. Prospection géologique et minière. Etudes météorologiques.

Tableau 2.- Domaines d'Application selon les capteurs et les domaines spectraux.

Les appareils photographiques, utilisés dans le visible et le proche infrarouge donnent des documents de bonne qualité au grain très fin et que l'on sait bien interpréter puisqu'ils sont connus depuis un certain temps.

L'identification d'espèces végétales, mais aussi de variétés cultivées d'une même espèce sont possibles sur ces photographies. C'est ce qu'il illustrera l'exemple d'utilisation de photographies en fausse-couleur donné dans la 2^e Partie.

De même, l'état d'un végétal peut être étudié grâce aux photographies, car les différences de réflectance dans le proche infrarouge sont détectées sur certaines émulsions.

Dans les mêmes bandes spectrales, nous montrerons un exemple d'utilisation de scanner multispectral. Celui-ci, en présentant 10 bandes, permet un choix de ces dernières pour l'étude des divers végétaux ou sols. Mais la qualité des documents obtenus est souvent moins bonne et l'on a intérêt à les utiliser dans le cas d'inventaires automatiques rapides, ou pour étudier le comportement des objets dans de fines bandes spectrales.

Les radiomètres infra-rouge dont nous présenterons deux exemples d'utilisation dans la 2^e Partie ont un intérêt dans l'étude de phénomènes mic-

climatiques. Ils peuvent aussi renseigner sur l'état sanitaire des végétaux ou l'état d'hydromorphie des sols, mais il faut reconnaître qu'ils donnent des documents à très mauvaise résolution au sol, présentant souvent de grandes distorsions géométriques.

Là encore, leur intérêt réside surtout dans le fait qu'ils captent l'information sur bande magnétique, qui, lorsqu'elle est sous forme numérique, peut être traitée automatiquement par ordinateur.

II.- UTILISATION SUIVANT LES SUPPORTS

Les appareils précédemment cités peuvent être transportés par des engins différents, situés plus ou moins haut en altitude. Plus les supports s'élèveront au-dessus de la surface terrestre, plus l'information reçue par le capteur aura subi des modifications de la part de l'atmosphère. Nous avons utilisé deux types de plate-formes : les avions et les ballons.

A - LES AVIONS

Les missions aéroportées dont nous avons disposé ont été réalisées suivant les cas par des avions différents, mais appartenant tous à la flotte aérienne de l'Institut Géographique National. Nous ne discuterons pas les mérites respectifs de chaque type d'appareil car là n'est pas notre propos. Nous indiquerons simplement qu'il s'agissait dans chaque cas, d'avions lourds, bien équilibrés, à longue autonomie de vol, sur lesquels les phénomènes de roulis et tangage ne sont pas trop prononcés et dont tous les paramètres de vol sont enregistrés systématiquement.

On peut donc en tenir compte si nécessaire.

Les défauts de ce type d'avions sont d'être lourds, donc onéreux à utiliser, et d'avoir un plafond de travail assez bas, vers 7 000 m environ, ce qui limite beaucoup l'échelle des photographies ou des images obtenues. On ne peut pas avoir par exemple de photographies à petite échelle avec ces avions.

Pour ces raisons, le Centre National d'Etudes Spatiales a développé depuis 1970 d'autres supports, assez stables, beaucoup plus légers, donc moins coûteux, et pouvant s'élèver à haute altitude. Il s'agit des ballons stratosphériques.

B - LES BALLONS STRATOSPHERIQUES

Nous présenterons dans la deuxième Partie l'étude des photographies prises à partir d'un vol de ballon stratosphérique. Il s'agit du vol réalisé le 3 novembre 1971.

L'enveloppe de ce ballon, comme celle des autres ballons du C.N.E.S., était en plastique fin. Sa forme est tétraédrique. Son volume était de 13 000 m³ et son poids de 80 kg, ce qui le place vis-à-vis des autres ballons envoyés par le C.N.E.S. parmi les petits ballons. En effet, les volumes varient de 1 350 à 8 700 m³ et les poids de 30 à 280 kg.

Le ballon, gonflé à l'hydrogène a été envoyé à partir de Aire sur Adour. Les ballons sont envoyés :

- de Aire sur Adour de Septembre à Mai, quand les vents dominants en altitude sont Ouest-Est,
- de Gap, de Juin à Août, quand les vents dominants sont Est-Ouest, ceci pour bénéficier d'un survol maximal du territoire français.

A l'enveloppe étaient accrochés un certain nombre d'équipements : un système pour couper la nacelle du ballon et pouvoir la récupérer, deux réflecteurs radars et un répondeur radar permettant de suivre le déplacement du ballon et prévenir les avions susceptibles de le rencontrer en phase ascensionnelle. Se trouvaient aussi suspendus : un système radio, un système donnant la pression barométrique de l'endroit où se trouve la nacelle, en bout de chaîne se trouvait la nacelle contenant deux appareils photographiques, chargés, l'un en film panchromatique, l'autre en film fausse-couleur. Le déclenchement automatique des caméras permettait une prise de vues toutes les minutes. Le vol a duré environ 4 heures, de 10 heures à 14 heures, et se décompose comme suit :

a) La phase ascensionnelle :

Elle a duré à peu près 1 h 30, l'ascendance moyenne étant de 5 m/s, 91 photographies ont été prises. Elles permettent suivre l'évolution de la perception des objets aux diverses échelles...

b) La phase de plafond :

Elle a duré à peu près 2 heures. 100 photographies ont été prises. L'altitude était de 8,5 mb, soit à peu près 32 km. La distance couverte correspondait environ à 200 km, pour une largeur de 27 km. La surface totale couverte était de 5 500 km², soit 1 % du territoire français.

La récupération de la nacelle ayant ensuite été décidée, celle-ci s'est décrochée par télécommande du ballon.

c) La phase de descente :

Elle a duré 30 mn. Pour ce vol, aucune photographie n'a été prise

pendant la descente. La nacelle guettée par avion et suivie par radar et radio a été récupérée sans difficultés.

Les pellicules impressionnées ont été développées. Elles ont donné des photographies à petite échelle, l'échelle d'origine étant 1/400 000, dont l'intérêt dans des études de synthèse sera montré plus loin.

III.- UTILISATION SUIVANT LES ECHELLES ET LA RESOLUTION AU SOL

A - LES ECHELLES

L'échelle d'une carte se définit par le rapport d'une distance entre deux points mesurée sur la carte à la distance entre les deux points correspondants mesurée sur le terrain.

L'échelle d'une photographie aérienne peut se définir de la même façon. C'est le rapport d'une distance séparant deux points mesurée sur la photographie à la distance séparant les points correspondants mesurée sur le terrain.

Si f représente la distance focale de l'appareil photographique et H la hauteur au-dessus du sol de l'appareil photographique, nous avons la relation :

$$E = \frac{f}{H}$$

$$E = \frac{1}{n}$$

La figure 11 montre que l'égalité $\frac{f}{H} = \frac{1}{n}$ est le rapport d'homothétie qui permet de passer du terrain à la photographie.

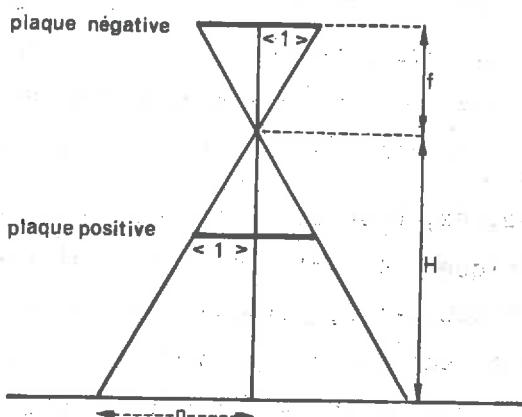


Figure 11 - Echelle d'une photographie.

L'échelle d'une photographie aérienne peut aussi se définir par comparaison avec l'échelle de la carte topographique correspondante. On a les relations suivantes :

$$Ep = \frac{dp}{D} \text{ et } Ec = \frac{dc}{D} \quad \text{d'où}$$

$$\frac{dp}{Ep} = \frac{dc}{Ec} \quad \text{soit } Ep = \frac{dp}{dc} Ec$$

où Ep = échelle de la photographie

Ec = échelle de la carte

D = distance sur le terrain

dp = la même distance sur la photographie

dc = la même distance sur la carte.

En fait, l'échelle d'une photographie aérienne n'est pas constante sur toute sa surface. Les variations d'échelle sont dues à des défauts de l'objectif de l'appareil de prise de vues, à des écarts entre l'axe optique de l'appareil et la verticale, et aux variations de relief de la zone considérée.

B - LA RESOLUTION AU SOL

On peut définir la résolution géométrique au sol d'un document comme les dimensions sur le terrain du plus petit élément que l'on peut distinguer sur ce document. Cette notion de résolution au sol est employée préférentiellement à celle d'échelle pour tous les documents obtenus à partir d'appareils à balayage. En effet, avec ces types de capteurs, les distorsions sont telles que l'échelle varie beaucoup le long d'une ligne de balayage, de même qu'elle varie d'une ligne à l'autre. Pour le L.M.D., la résolution au sol sur une même ligne varie de 18 m à 45 m selon que l'on est au centre ou sur le bord de la zone, pour une altitude de 1 500 m.

Dans la partie optique du spectre, pour des photographies, on utilise parfois cette notion de résolution géométrique au sol car elle conditionne souvent l'utilisation qui peut être faite des documents, puisque l'on ne peut identifier ou détecter un objet que dans la mesure où ses dimensions sont supérieures à la résolution au sol. Un objet de dimensions inférieures sera confondu avec d'autres objets.

Le tableau suivant donne quelques exemples d'applications correspondant à des seuils d'échelles et de résolution géométrique au sol.

Tableau 3.- Echelles et seuils d'utilisation

Echelles	Résolution au sol	Applications
En dessous de 1/5 000	Quelques dm	Etude de formations herbacées basses. Détection de certaines maladies. Etude d'urbanisme. Etude détaillée en pédologie.
de 1/5 000 à 1/30 000	de 1 m à quelques dizaine de m	Toutes les utilisations sur le terrain cartographie ou inventaire pour agronomes, pédologues, forestiers, écologistes, aménageurs. Etude de phénomènes d'extension moyenne.
de 1/30 000 à 1/200 000 et plus	une ou plusieurs centaines de m	Toutes les utilisations nécessitant une vue d'ensemble d'une zone. Particulièrement adaptées pour l'étude des phénomènes à grande extension. Par exemple : régions agricoles, occupation des sols, étude des déserts.

Dans la deuxième Partie, on trouvera des exemples d'utilisation en Agronomie de documents à différentes échelles et présentant diverses résolutions au sol.

IV.- UTILISATION SUIVANT LES SAISONS

Certains climats sont caractérisés par une certaine uniformité des températures et des précipitations tout au long de l'année. Sous ces climats, les paysages présentent tout le temps le même aspect, les variations saisonnières étant peu marquées. Il n'en est pas de même pour les régions ayant un climat à saisons différenciées. Selon les saisons, la végétation sera plus ou moins développée et les sols plus ou moins visibles. Il sera alors nécessaire de bien déterminer la saison de prise de vues pour que les éléments que l'on doit étudier soient détectables. On distingue sous climat tempéré quatre saisons. Voici sous forme de tableaux les utilisations possibles des unes et des autres. Pour les climats où il n'y a que deux saisons bien différenciées (certains climats tropicaux), il faudra garder les renseignements concernant l'été et l'hiver.

Tableau 5.- Saisons et domaines d'investigation en climat tempéré.

SAISONS	VEGETATION	SOLS
Printemps	<p><i>Forêts</i> : période de démarrage de la végétation. Possibilités d'identification.</p> <p><i>Cultures</i> : possibilité d'étude des cultures en place.</p>	Possibilités d'étude dans la mesure où ils ne sont pas couverts par la végétation. Prise de vues à effectuer 2-3 jours après des pluies.
Eté	<p><i>Forêts</i> : étude de l'état sanitaire et du développement des forêts.</p> <p><i>Cultures</i> : inventaire des cultures et prévisions de rendements.</p>	Impossibilité de les étudier car ils sont d'habitude recouverts par la végétation.
Automne	<p><i>Forêts</i> : avant la chute des feuilles, possibilités d'inventaire et d'études micro-climatiques.</p> <p><i>Cultures</i> : étude des seules cultures en place.</p>	Possibilité d'étude dans la mesure où ils ne sont pas couverts par la végétation.
Hiver	<p><i>Forêts</i> : possibilité d'étudier la stratification verticale (présence ou non de sous étages).</p> <p><i>Cultures</i> : impossibilité, car très peu de cultures sont en place.</p>	Possibilité d'étude car la végétation est soit absente, soit peu couvrante. Se méfier de la neige, une couche mince est un révélateur des propriétés du substrat. Une couche épaisse cache tout.

Pour détecter et identifier des objets facilement visibles, une prise de vues à un moment favorable sera suffisante.

Mais le plus souvent, il faut interpréter des phénomènes non perceptibles directement sur les photographies ou les images. L'interprétation se faisant à partir de modifications dans l'aspect d'objets tels que la végétation ou les surfaces d'eau libre... Il faudra pouvoir disposer de prises de vues faites à des saisons différentes. Dans certains cas, des conditions météorologiques différentes : période très sèche, période de ressuyage après de fortes pluies... mettront en évidence des phénomènes qui passeraient inaperçus sur une seule mission. C'est à la faveur d'une mince couche de neige que nous avons pu étudier l'effet de la nature des travaux culturaux sur le comportement des sols nus.

Compte tenu de notre expérience, nous pouvons donner les indications suivantes quant au choix d'une date de prise de vues.

Les périodes les plus favorables à la réalisation de missions de télé-détection sont celles correspondant à un état dynamique des objets, où l'on peut être assuré que les divers objets présenteront le plus de différences, et non à une période de stabilité.

A titre d'exemple, citons pour l'étude des cultures la montaison, la floraison, ou le début de la maturation. Pour l'étude des arbres, le débourrement ou au contraire, la période de coloration automnale seront favorables à l'identification des espèces ainsi qu'à la connaissance de leur vitalité, voire de leur état sanitaire.

Deuxième Partie

APPLICATIONS EN AGRONOMIE

Chapitre V

LES PHOTOGRAPHIES FAUSSE-COULEUR

Plusieurs missions photographiques ont été réalisées au-dessus du site de la ferme expérimentale de GRIGNON. Nous avons tout particulièrement étudié les photographies fausse-couleur pour définir l'information qu'elles apportaient en Agronomie et à quelles utilisations on pouvait les destiner.

Les missions dont nous disposions dataient respectivement du 1er Août 1970 (Illustration 1) et du 7 Juillet 1971 (Illustration 2). Elles permettaient d'observer à un an d'intervalle l'état des cultures, et comme le stade de développement atteint était peu différent pour certaines culture, de faire des comparaisons entre les deux missions.

Nous avons pu effectuer les observations suivantes.

I.- IDENTIFICATION D'ESPECES ET DE VARIETES

Les espèces cultivées, compte-tenu de la date de prise de vues se rassemblaient en deux groupes.

- les céréales murissantes ayant des couleurs allant du jaune verdâtre au vert de chrome sur les photographies
- les plantes sarclées toutes de couleur rouge sur les photographies.

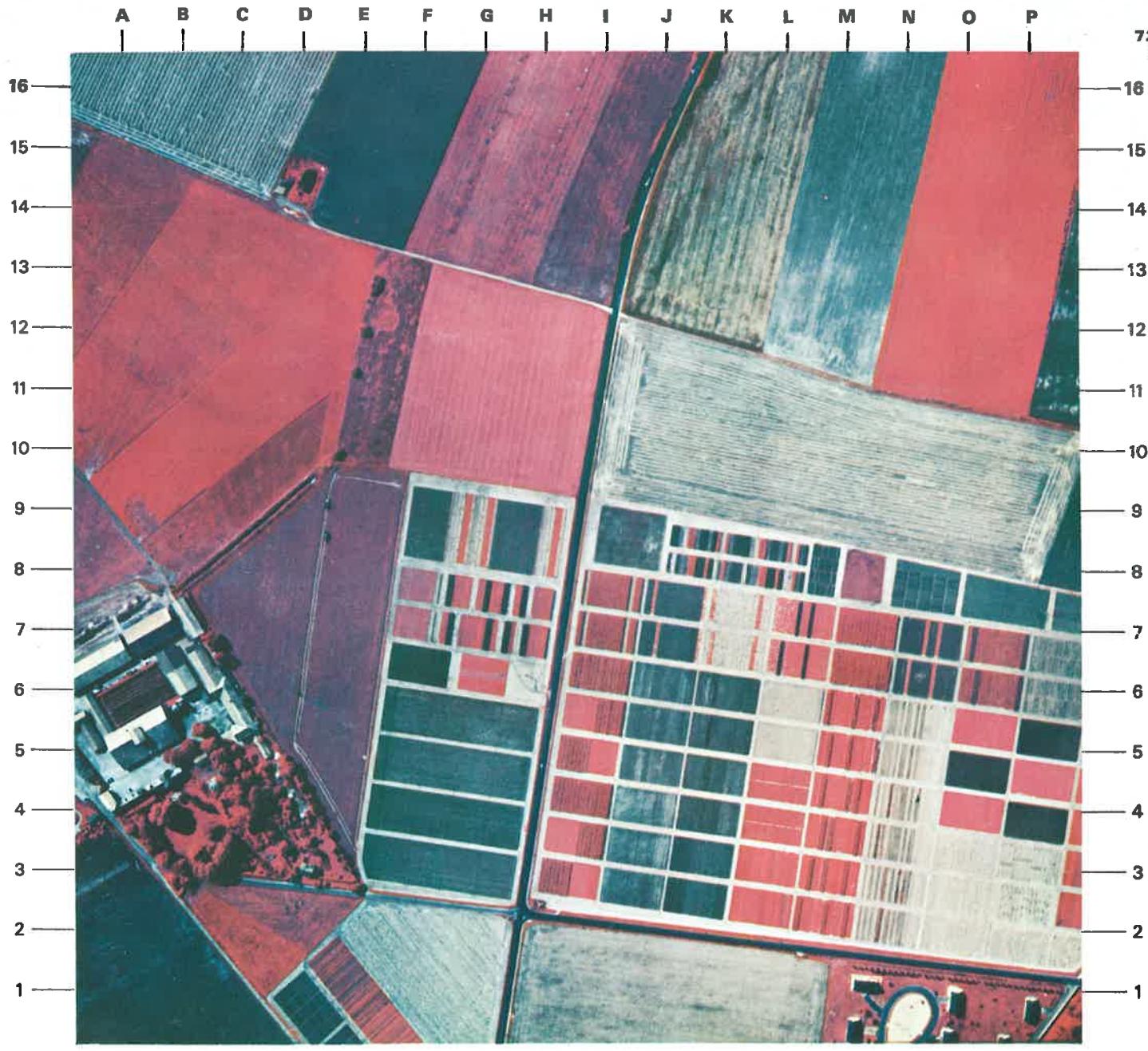
Les couleurs prises par les cultures sont dues aux caractéristiques de l'émulsion fausse-couleur. Tout végétal chlorophyllien y est traduit par une couleur où il y a du rouge. Tout objet non chlorophyllien, ou tout végétal sec, est d'une couleur allant du vert au jaune, voire au bleu très clair.

Pour une mission donnée, le tableau 6 montre que chaque espèce a une couleur différente des autres et que l'on peut même distinguer des variétés puisque le blé de printemps a une couleur différente de celle du blé d'hiver et que les pommes de terre féculières sont différentes des pommes de terre de consommation.

Végétaux	Couleur sur Fausse-Couleur	Clarté	Relief	Structure Régularité	Teinte sur infra-rouge
Blé de printemps	441 vert de chrome	très foncé	moyen	finement strié	noir
Blé d'hiver	387 vert bleuté	moyen	moyen	lisse	gris foncé
Blé dur	357 vert jaune	moyen	moyen	strié	gris foncé
Avoine	206 vert olive	foncé	moyen	strié	gris moyen
Orge	360 jaune verdâtre	clair	moyen	lisse	gris moyen
Mâts	101 grenat pourpré	très foncé	fort	en bandes parallèles	gris moyen
Betteraves	32 rouge corinthien	moyen	très faible	ponctué	blanc
Pommes de terre de consommation	92 rouge brunâtre	foncé	faible	irrégulière	gris clair
Pommes de terre féculières	62 rouge pivoine	foncé	faible	lisse	gris très clair
Luzerne	40 rose	clair	nul	finement strié	gris moyen
Luzerne - Dactyle	61 pourpre	moyen	nul	lisse	gris moyen
Jachère	71 laque carminée	foncé	nul	lisse	gris moyen
Sol nu	330	très clair	nul	lisse	gris clair

Tableau 6 - Identification de cultures sur deux photographies aériennes prises le 1er Août 1970.

Les chiffres correspondent à : E. SEGUY, *Code Universel des couleurs*, LECHEVALIER, 1936.



cliché GNES – IGNF





- A** — Blé de printemps
- B** — Blé d'hiver
- B'** — Effet de jachère sur blé d'hiver
- B''** — Blé d'hiver mal désherbé
- B'''** — Blé d'hiver récolté
- C** — Blé dur
- C'** — Adventices dans le blé dur
- D** — Avoine
- D'** — Accident de végétation dans l'avoine
- E** — Orge sur pied
- F** — Maïs
- G** — Betteraves à fumure complète
- G'** — Betteraves sans fumure azotée dans betteraves à fumure complète

- H** — Différences de fumure dans le blé d'hiver
- I** — Orge récoltée
- J** — Orge en cours de récolte
- K** — Pommes de terre de consommation
- L** — Pommes de terre féculières
- M** — Manques à lever dans les betteraves
- P** — Prairie
- P'** — Prairie fortement exploitée
- P''** — Prairie non exploitée
- Q** — Friche
- R** — Luzerne
- R'** — Luzerne coupée

Mais quelle est la fiabilité du rendu coloré ? Peut-on, après avoir estimé la couleur prise par une culture sur une photographie, se servir de cette estimation pour retrouver la culture sur une autre photographie ?

Il faut d'abord faire remarquer que l'identification d'une culture sur une photographie ne se fait pas uniquement à partir du critère teinte ou couleur sur la photographie. C'est pour cela que sur le tableau 6, la clarté, le relief et la plus ou moins grande régularité de la structure interviennent dans l'identification.

Le critère de couleur est assez subjectif et pour une émulsion donnée, d'une mission à l'autre, un objet pourra prendre des colorations différentes.

Sur une même mission, d'une photographie à l'autre, surtout s'il s'agit de contacts sur papier, la couleur pourra encore changer. Il est donc illusoire de vouloir utiliser la couleur exacte prise par une culture sur une photographie, pour la reconnaître sur une autre photographie.

Autant la valeur absolue de la couleur peut changer, autant les différences entre les couleurs prises par plusieurs cultures ne changent pas d'une photographie à l'autre.

Pour un stade de développement donné, nous avons remarqué sur toutes les photographies fausse-couleur que nous avons pu étudier, que les différences de couleur entre diverses cultures étaient toujours à peu près les mêmes.

Ainsi, lors de la maturation, le blé de printemps a une couleur voisine de celle du blé d'hiver mais plus foncée. L'orge qui est mûre la première est la céréale dont la couleur est la plus claire.

A la même époque, pour les plantes sarclées, la pomme de terre et la betterave sont rose clair. Cependant, on ne peut pas les confondre car la structure du champ de pomme de terre présente des bandes parallèles, tandis que celle du champ de betterave est lisse ou légèrement ponctuée.

En conclusion, nous pensons que le critère couleur, bien que très variable d'une photographie à l'autre, est néanmoins très utile dans l'identification des cultures. Pour une saison donnée, les couleurs prises par les différentes espèces peuvent toujours être classées de la même façon les unes par rapport aux autres, quelles que soient leurs valeurs absolues.

C'est ainsi que nous avons pu utiliser les critères d'identification du tableau 6, établis le 1er Août 1970, pour déterminer le plan d'assoulement des cultures sur les photographies du 7 juillet 1971 (voir illustrations 1 et 2).

En plus de l'identification d'espèces et de variétés cultivées, nous avons pu observer l'aspect que prenaient sur les photographies fausse-couleur diverses interventions de l'Homme, où différents états de la végétation.

II.- INFLUENCE DES APPORTS CHIMIQUES

A - LA FUMURE AZOTÉE

Sur les photographies des parcelles expérimentales de la ferme de Grignon, un bloc semé en betteraves a un aspect particulier. Il est divisé en trois bandes parallèles. La bande centrale est différente des deux bandes adjacentes.

Ce bloc fait l'objet d'un essai de fumure azotée. La partie centrale n'en a pas reçu, tandis que les deux autres reçoivent une fumure azotée normale. La fumure en phosphates et en potasse est identique pour les trois bandes.

Dans la bande centrale, le manque d'azote se traduit sur les betteraves par un feuillage moins luxuriant et jaunâtre. La différence de couleur et d'aspect peu visible sur le terrain à cette époque de l'année, se voit très bien sur les photographies aériennes de 1970 et de 1971 où la même expérimentation était en cours(voir illustrations 1 et 2).

Sur la photographie de Août 1970, une parcelle de blé dur a un aspect hétérogène, la couleur étant plus ou moins foncée sur de petites surfaces régulières.

La parcelle a reçu une fumure azotée allant de 90 à 120 unités. Les surfaces les plus foncées ont reçu 120 unités, les plus claires, 90.

Ces différences ne sont pas visibles sur le terrain. En effet, une fumure azotée abondante favorise le développement des parties aériennes et retarde la maturation des graines. Les différents niveaux de maturation sont difficiles à déceler à l'œil sur le terrain. Par contre, l'émulsion fausse-couleur souligne les différences de maturation. Les individus les plus mûrs réfléchissent moins le proche infra-rouge, et réfléchissent beaucoup plus les bandes jaunes et rouge du visible. Ils sont donc traduits par des couleurs plus claires par l'émission.

Sur la même photographie, les mêmes différences de fumure azotée se traduisent de la même façon pour du blé d'hiver. Les blés ayant reçu 120 unités d'azote sont moins mûrs que ceux en ayant reçu 90. Sur la photographie, les premiers sont de couleur brun-rougeâtre, car encore chlorophylliens, les seconds ne le sont plus et ont une couleur verte sur la photographie.



cliché CNES – IGN

0 | 0 | 0 | 7 | 4 | 0 | 1 | 3 | 0

72-3	4	0	3	1	0	4	7	0	0	0
------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

1

E FRANCE CNES - IGN Mission GRIGNON Ete 1971 Cl. n° 4040 et 4041
1 : 20 000 F 1 : 15 500 7-7-71
feuille VERSAILLES 5-6

La fumure azotée, dans la mesure où elle modifie la pigmentation des feuilles pour les plantes sarclées, et où elle retarde la maturation des céréales, aura une action visible sur des photographies en fausse-couleur. Sur ces photographies, des végétaux de même espèce ayant reçû une fumure différente auront un aspect différent. L'action différente des divers niveaux de fumure azotée pourra être détectée.

Il semble que ces différences d'action soient perçues de la même façon à la même saison par l'émulsion fausse-couleur, puisqu'en 1971, les essais de fumure azotée apparaissent de la même façon qu'en 1970.

B - LE PRECEDENT CULTURAL

Six blocs de blé d'hiver ont fait l'objet en 1970 et en 1971 d'un test d'arrière action de la fumure azotée. Tous les deux ans, ces blocs sont occupés par du maïs et de la betterave, sur lesquels on met des doses variables d'azote. L'année suivante, tous les blocs sont occupés par du blé d'hiver recevant une fumure azotée uniforme.

On peut donc tester l'influence des doses variables d'azote épandues l'année précédente, ainsi que l'influence du précédent cultural : maïs ou betterave.

Sur les photographies fausse-couleur, les blocs, occupés par le blé d'hiver d'homogénéisation, se groupent en deux types d'aspects différents.

Certains blocs sont très foncés, ils correspondent aux parcelles ayant reçu les plus fortes fumures azotées l'année précédente et qui ont eu la betterave comme précédent cultural. Là, le blé présente tous les signes d'une forte alimentation azotée : feuillage très développé, maturité retardée.

En effet, dans ces blocs, les réserves azotées sont importantes pour deux raisons : fumure importante (120 unités) et un précédent cultural (la betterave) épuisant moins le sol que l'autre précédent (le maïs).

La plus grande vigueur de l'appareil végétatif ainsi que la différence de maturation qui sont peu visibles sur le terrain, apparaissent très nettement sur l'émulsion fausse-couleur que ce soit en 1970 ou en 1971. C'est en établissant une relation entre les caractères perçus sur les photographies et l'état de la végétation dans le champ que l'on peut conclure à une différence de fumure azotée.

C - LE DESHERBAGE CHIMIQUE

Sur la photographie de 1970 (illustration 1), une parcelle semée en blé dur est de couleur vert-jaunâtre. Dans cette parcelle apparaît une zone rougeâtre.

La couleur rouge indique la présence de végétaux à fonction chlorophyllienne active, donc d'adventices dans la parcelle de blé dur en cours de maturation.

Une enquête sur le terrain a montré qu'il s'agissait de Véroniques (Veronica chamaedrys) et de Mercuriales (Mercurialis annua) qui se sont développées à la faveur d'un désherbage chimique arrêté trop tôt dans la saison.

Sur la photographie, nous avons vu les conséquences du mauvais désherbage : la présence d'adventices. L'origine de ces adventices n'a été retrouvée qu'après réflexion et enquête sur place.

L'insuffisance d'un désherbage chimique se voit sur la même photographie dans des parcelles d'orge mûre. La couleur de l'orge sur la photographie est jaune verdâtre. Dans certaines parcelles, on constate des bandes rouges. Il s'agit de Chiendent (Agropyrum repens) qui n'a pas été éliminé par les désherbants employés dans l'orge.

Dans d'autres parcelles d'orge où il a été procédé à la fois à un désherbage chimique et à un désherbage mécanique, le chiendent a disparu. Les parcelles ne contiennent plus d'adventices.

Une autre conséquence du mauvais désherbage a pu aussi être constatée sur la photographie fausse-couleur de 1970. Dans certaines parcelles de betterave la couleur n'est pas d'un rouge uniforme, mais présente des ponctuations jaune très clair. Il s'agit du sol qui apparaît entre les pieds de betteraves.

Ces trous dans la végétation sont dûs à certaines graines de betteraves qui n'ont pas levé par suite d'un mauvais enrobage des glomérules. L'insuffisance de traitement chimique a favorisé les fontes de semis et provoqué ces vides dans le tapis végétal.

Sur la photographie, seule la différence de densité de la végétation est visible. Une information est nécessaire pour en déterminer la cause.

Par contre, on ne peut apprécier sur le terrain l'étendue exacte de la fonte des semis, et seul la photographie permet de se rendre compte de son importance.

III.- AGE DE LA CULTURE

Sur la photographie de 1970, se trouvent des parcelles occupées par l'association Luzerne-Dactyle très fréquente dans les prairies artificielles. Selon les parcelles, il s'agit de Luzerne-Dactyle de première, deuxième ou troisième année. Sur le cliché, la Luzerne-Dactyle de deuxième année a une couleur plus intense que les Luzerne-Dactyle de première et troisième années.

Cela corrobore les observations au sol qui montrent que cette association a son développement maximal en deuxième année.

IV.- VERSE DES CEREALES

Sur les photographies de 1971 (illustration 2), on observe dans de nombreuses parcelles de céréales, en dehors de la zone expérimentale, des surfaces couleur très claire. Il ne peut s'agir d'une différence d'espèce ou de variété de puisque ces colorations plus claires ont un contour irrégulier au sein du champ.

Il s'agit d'un accident de végétation, la verse.

Cette verse se produit en fin de période végétative, dans les céréales ayant reçu une trop forte fumure azotée. En effet, cet excès d'azote a favorisé la formation du cytoplasme par rapport à celle des membranes pour toutes les parties aériennes. Les cellules ont des parois plus fines qu'à l'ordinaire et la tige est moins rigide. D'autre part, l'épi est déjà bien formé et rend l'équilibre de la tige plus fragile. Il suffit souvent à ce moment là d'un orage ou de violents coups de vent pour que le chaume se couche à terre. Une fois versé, celui-ci ne se relève plus.

On peut donc en estimant les surfaces versées avoir une idée de la baisse de rendement de la récolte.

V.- DISCUSSION

Nous venons de donner un certain nombre de phénomènes détectables sur photographie aérienne en fausse-couleur à grande échelle. Dans certains cas, nous avons montré que le phénomène lui-même n'était pas directement détectable (fumure azotée, enrobage de glomérules...) mais qu'il pouvait être interprété à partir de ses conséquences visibles sur la photographie.

Les photographies aériennes représentent donc des documents à excellente résolution où le paysage apparaît clairement. L'identification d'objet directement visible est presque toujours aisée, et l'on peut avec une certaine habitude, quand il s'agit d'une spécialité que l'on connaît, interpréter des phénomènes non directement visibles.

Cela explique que l'on puisse tirer autant d'informations d'une photographie aérienne. Rappelons par exemple que nous avons pu distinguer des variétés différentes, ainsi que des niveaux de fumure différents.

D'autre part, l'information obtenue avec un document pris à une période donnée se retrouve sur un document pris une autre année à une période semblable. Nous avons pu vérifier ceci avec la photographie du 1er Août 1970 et celle du 7 Juillet 1971. Sur l'une et l'autre, on retrouve les mêmes différences entre la bande de betterave n'ayant pas reçu de fumure azotée et les deux bandes adjacentes ayant reçu une fumure complète.

De la même façon, l'influence du précédent cultural : maïs ou betterave et des divers niveaux de fumure azotée se lisent dans le blé d'hiver d'homogénéisation l'année suivante.

La photographie en fausse-couleur donne donc une information fiable à condition qu'on ne veuille pas y noter des valeurs absolues de couleur, mais plutôt des écarts entre des couleurs.

La photographie en fausse-couleur représente un document de télédétection très utile en Agronomie. Elle permet de tracer des cartes d'inventaire des espèces et des variétés pour des surfaces étendues, de détecter les trous de végétation, et d'estimer les surfaces versées, donc de faire une estimation succincte des rendements, de suivre l'état de maturation des céréales plus facilement que sur le terrain et donc de fixer approximativement la date de récolte. Elle permet aussi d'apprécier la vigueur et le développement foliaire d'un végétal, donc de suivre l'influence de diverses expérimentations, que ce soit de fumure azotée ou de la rémanence de certains désherbants.

La photographie fausse-couleur, si elle rend de très grands services en Agronomie, ne peut cependant aider à résoudre tous les problèmes. Elle est inopérante pour tout ce qui concerne une automatisation du traitement de l'information, car la numérisation d'une photographie est une opération très lourde et très coûteuse. D'autre part, comme toutes les autres photographies dans d'autres émulsions, elle ne peut être obtenue la nuit ou dans des conditions météorologiques médiocres.

Pour résoudre ces deux types de problèmes, il faut utiliser d'autres systèmes de télédétection. Nous en avons expérimenté quelques uns que nous présentons dans les chapitres suivants.

D'autres exemples d'utilisation de l'émulsion fausse-couleur sont donnés en bibliographie.

Chapitre VI

LES ENREGISTREMENTS DANS L'INFRA-ROUGE

I.- L'INFRA-ROUGE MOYEN (3-5 µm).

En 1971, le C.N.E.S. a réalisé deux missions au-dessus de la forêt de Rambouillet pendant la même nuit d'hiver. Le but de ces missions était de déterminer l'utilisation qui pouvait être faite de tels enregistrements. Le premier vol a eu lieu le 2 Février à 21h 40, le second le 3 Février à 5h 22. L'avion a volé dans les deux cas à 1 700 m d'altitude, sur une bande de 10 km de long sur 2 km de large. (illustration 3 et 4).

L'appareil de télédétection utilisé était un Cyclope dont nous avons donné une description sommaire dans la première partie. Des modifications de date de vol, n'ont pas permis d'envisager de mesures au sol synchronisées avec la mission aéroportée. Cette difficulté que nous évoquerons plus loin a été très fréquente lors des vols que nous avons étudiés. Ce sont des vols expérimentaux, pour lesquels il se produit souvent des modifications imprévues qui ne se produiraient pas pour des vols opérationnels faits à la demande d'un client payant une prestation de service.

A - INTERPRETATION DES DONNEES

Les données enregistrées sur bande magnétique ont été visualisées sur papier photographique. L'énergie captée est due à l'émission des objets. Les objets à faible émission ont été traduits par du blanc sur la visualisation. Les objets à forte émission ont été traduits par du noir. Les lignes dues au balayage sont assez visibles sur la visualisation, mais pas trop gênantes pour l'interprétation du document. La résolution géométrique au sol est d'environ 10 m.

Sur les deux images de nuit, l'émission thermique des objets ne s'inverse pas, mais elle diminue fortement d'intensité pour certains objets tels que les forêts ou les sols nus.

Les objets les plus émissifs sont :

- toutes les surfaces d'eau libre (lacs ou rivières).
- les routes, les chemins que l'on repère facilement par leur géométrie d'abord, et par leur émission plus faible.
- les peuplements de résineux (leur émission diminue entre le début et la fin de nuit).

Parmi les objets émettant peu, citons les maisons dont l'isolation thermique est efficace. Les peuplements herbacés (prairies permanentes) et les formations basses en forêt (landes) apparaissent comme émettant faiblement. Il semble que dans ce cas, la végétation joue le rôle d'écran et empêche les échanges d'énergie entre le sol et l'air.

L'ensemble de la forêt constituée de feuillus : Chênes, Charmes, Châtaigniers, émet faiblement. Les clairières émettent peu. Par contre, plus le taillis sous futaie est dense, plus la forêt émet. (illustrations 3 et 4).

B - DISCUSSION

L'intérêt qu'ont pu présenter ces images n'est pas dans la reconnaissance d'ensembles tels que : les clairières, les taillis sous futaie, les prairies permanentes, les sols nus... Nous aurions pu faire une meilleure analyse, et plus rapidement sur des photographies aériennes. Ces images prises à des périodes différentes de la nuit montrent le développement dans certaines petites vallées de surfaces de faible émission, correspondant à des masses d'air froid.

Aucune photographie ne pouvait donner ce type de renseignement, particulièrement de nuit.

Il semble qu'actuellement, ce type de d'enregistrement dans l'infrarouge moyen ne présente que peu d'intérêt en Agronomie. En effet, les phénomènes enregistrés sont complexes et mal connus sur le terrain. Par exemple, j'ai pu trouver dans la littérature (GEIGER) des mesures de variations des températures entre le jour et la nuit au-dessus d'une forêt ; des mesures des températures à différentes hauteurs dans différentes forêts en été, mais aucune mesure au-dessus ou dans une forêt en hiver.

D'autre part, compte-tenu de la mauvaise résolution géométrique au sol des enregistrements, on ne peut que constater l'émission par des surfaces assez grandes composées d'objets aux émittances vraisemblablement différentes. Par exemple, nous reconnaissons sur les images une zone où l'émittance est assez forte. Cette zone a la même forme et la même localisation qu'un peuplement de Pins sylvestres. Nous avons pu conclure que l'ensemble du peuplement était assez émissif.





Mais ce peuplement est hétérogène. Il comporte les Pins sylvestres assez âgés (100 ans environ) dont les cimes sont assez bien développées et le tapis végétal situé en-dessous qui est visible lorsque les cimes ne sont pas jointives. Ce tapis végétal est constitué principalement par Calluna vulgaris, et en certains endroits, par Molinia coerulea, qui, en cette période de l'année, doivent présenter une faible émission la nuit.

La densité optique en un point de la restitution Cyclope (image photographique) correspond à une moyenne des flux émis par les différents objets qui se trouvent en ce point. Ce qui est donc vu sur l'image n'est pas une entité bien définie sur le terrain. L'interprétation de ce qui est vu sur l'image est souvent très délicate.

En dépit des difficultés d'interprétation, ces enregistrements dans l'infra-rouge moyen présentent un intérêt en Agronomie. En effet, nous avons vu se former au cours de la nuit des masses d'air froid dans certaines vallées. Cette possibilité peut être très intéressante dans les régions où l'on veut planter des cultures fragiles, telles que certaines cultures fruitières. Des passages aériens pendant les nuits permettraient de détecter les zones à micro-climat froid où les risques de gel sont importants.

Une des raisons du peu d'information trouvées par cette méthode d'étude réside dans le fait que les appareils ne sont pas assez performants. Une résolution géométrique au sol de 10 m est insuffisante pour des études en Agronomie où les phénomènes étudiés : différences d'humidité, discontinuités dans l'aération des sols... ont souvent une extension du même ordre de grandeur, ce qui rend leur étude difficile.

D'autre part, les phénomènes que l'on peut étudier dans cette bande spectrale sont liés aux caractéristiques d'émission des objets. Ces caractéristiques sont très mal connues sur le terrain, car elles sont liées aux propriétés physiques de leurs surfaces d'une part, et d'autre part, des propriétés du volume sous-jacent : une parcelle de sol nu par exemple dont la nature est très complexe (minéraux, eau, air, matière organique...).

Un moyen de pallier ce manque de connaissance serait d'avoir des répétitions nombreuses de missions aéroportées au-dessus d'une même zone. Pour des raisons financières, par manque de temps, et en raison des conditions météorologiques variables, sans compter les défaillances propres de l'appareil, cela n'a pas encore pu être réalisé.

Nous ne pouvons que souhaiter de la part d'organismes tels que le CNES, la prise en charge de programmes d'études dans l'infra-rouge moyen, car en dehors de certaines informations d'ordre microclimatique, nous ne savons pas encore bien

ce que cette bande spectrale peut apporter, en Agronomie, comme dans d'autres disciplines.

II.- L'INFRA-ROUGE THERMIQUE (8-14 μm).

L'appareil utilisé pour réaliser ces enregistrements a été décrit au Chapitre II. Il a été mis au point pour étudier des données météorologiques. Le CNES désirant savoir si l'appareil pouvait être de quelque utilité en Agronomie et Bioclimatologie, une mission aéroportée s'est déroulée le 24 février 1972 au-dessus du site de la Minière où se trouvent des parcelles expérimentale de l'INRA.

Le vol du 24 février était un vol préparatoire devant servir à tester l'appareil et à faire une première reconnaissance thermique du terrain. Un vol opérationnel devait avoir lieu en juillet 1972 et servir à l'interprétation. Ce deuxième vol étant inutilisable, nous présentons les travaux réalisés sur le vol de février, qui ont l'intérêt de montrer comment on peut traiter les informations numérisées, et ce que l'on peut en attendre pour des vols réalisés dans de meilleures conditions.

A - LE TRAITEMENT DE L'INFORMATION

L'avion de l'I.G.N. ayant effectué la mission le 24 février vers midi, a volé à 1800 m au-dessus du terrain. Le LMD a survolé une surface de terrain ayant environ 3 km de large sur 4,5 km de long. La résolution au sol, compte-tenu du balayage est de 18 m à la verticale de l'avion et de 40 m environ en bout de ligne. L'énergie émise par les objets a été enregistrée sur bande magnétique, sous forme numérique, à bord de l'avion.

1) Le listage brut .- (illustration 5)

Les bandes magnétiques, ramenées au sol ont été traitées au C.N.E.S. sur ordinateur CDC 6600. La première visualisation des données a été réalisée en imprimant à l'aide de symboles alphanumériques les différents niveaux enregistrés. L'appareil, lors du survol du terrain a enregistré des valeurs énergétiques plus ou moins fortes, provenant des objets. Les objets ont une émission dans la bande spectrale considérée : une brillance énergétique qui correspond à l'intégrale de ϵT^4 pour chaque longueur d'onde.

On se permet une correspondance entre les niveaux énergétiques perçus par l'appareil et la température apparente (ou température de brillance des objets). C'est ainsi que l'on a pu faire correspondre aux 20 niveaux, des températures allant de 5° à 15°, espacées de 0,5° chacune.

Aux niveaux de température les plus bas ont été affectés des symboles

ES DE TEMPERATURE 12.00(+/-) 12.50

COLLONES DE 1 119

TTES DE TEMPERATURE 12.00(+/-) 12.50

COLLONES DE 111 160

PIÈCES DE TEMPERATURE 12-90 12-50

TESTS RE TEMPERATURE 12-00 12-39

COLONNES DE 1 119

COLONNES DE 111 160

alphanumériques peu couvrants, tels que le -, le +, et la (. Plus le niveau de température s'élève, plus le signe devient couvrant. Il résulte d'ailleurs pour les niveaux les plus élevés de la superposition de plusieurs symboles. Ainsi, pour 14°5 à 15°, nous avons :

$$X + \cdot B + V + A = \blacksquare$$

Compte-tenu de ce mode de présentation, le premier listage ressemble à un dessin noir et blanc où les teintes claires correspondent à des objets plus froids, les teintes foncées à des objets plus chauds. Mais la résolution géométrique au sol est telle qu'il est à peu près impossible de savoir à quelle surface, sur le terrain, correspond un signal donné.

Pourtant, il existe dans la surface balayée des objets dont la température est très différente. Il y a par exemple trois étangs en eau dont la température doit être basse, et des bougies* qui ont été placées sur le terrain, sur une ligne droite et qui devaient servir de repères dans les parcelles expérimentales.

Si l'on devine le contour de deux des lacs, le troisième est peu visible quant aux bougies elles n'apparaissent pas sur ce listage brut.

En raison de toutes ces difficultés de repérage et d'interprétation, nous avons jugé nécessaire de faire d'autres formes de visualisation des données.

2) Les listages des différents niveaux

Puisque lorsque toute l'information était présente sur un seul listage, celui-ci était peu lisible, nous avons demandé un listage pour chaque niveau de température, soient 20 listages (illustration 6).

Sur certains d'entre eux apparaissaient des formes pouvant être comparées à des objets connus sur le terrain : zone de forêt, contour d'étang. Sur les autres, nous ne pouvions rien reconnaître. Dans le premier cas, l'intervalle de température choisi était satisfaisant, tandis qu'il ne l'était pas dans le second. Nous avons alors procédé à un regroupement de niveaux de température pour faire apparaître des éléments connus (routes, villages...).

Suivant les niveaux de température retenus, nous avons fait imprimer avec un ou plusieurs symboles, les surfaces dont la température apparente se situait dans l'intervalle considéré. Dans d'autres cas, nous avons imprimé avec un symbole très couvrant, le dollar, \$, toutes les surfaces n'ayant pas une température apparente comprise dans l'intervalle choisi. Ce type d'impression de listage a l'intérêt de permettre de mieux suivre un contour (illustration 7).

Par exemple pour l'intervalle 12°-12°5, on suit mieux le contour de la route reliant Guyancourt à La Minière sur ce type de listage que sur les autres.

Après dépouillement manuel des 20 listages et regroupement de certains intervalles, nous avons retenu des niveaux dont les suivants correspondent à des objets identifiés sur le terrain :

* Ces bougies de paraffine, cylindriques de 20 cm de diamètre et 25 cm de haut sont utilisées ordinairement pour la lutte contre le gel.

- 5° - 7° correspond à l'eau libre
- 7° - 9° correspond à la végétation de bord des eaux
- 12° - 12°5 correspond aux routes asphaltées et aux vergers
- 14° - 15° correspond aux maisons et à un coteau exposé au Sud.

3) Le listage trichrome (illustration 8)

Nous avions la possibilité d'imprimer un listage en couleur grâce à une table traçante CALCOMP adaptée à la sortie de l'ordinateur. Les plumes traçantes pouvaient recevoir de l'encre de trois couleurs différentes. Nous avons choisi le violet, le noir et le rouge. D'autre part, ces plumes pouvaient tracer des symboles alphanumériques de tailles différentes.

Nous avons affecté les signes les plus gros et les plus couvrants aux phénomènes particulièrement marqués ou aux objets bien définis. Pour les autres intervalles thermiques, nous avons choisi des signes plus petits.

Nous avons aussi volontairement décidé de ne pas représenter le niveau 10°5-12°. En effet, à cet intervalle thermique correspondaient les sois nus, labourés plus ou moins récemment, ainsi que les parcelles où le blé d'hiver, à cette date, ne recouvre que très peu les sols. En laissant en blanc ce niveau de température, nous assurions une plus grande lisibilité au schéma.

La correspondance intervalle de température, symboles alphanumériques et couleurs est la suivante :

5° - 7°5 ; 8	violet	12°5 - 13° ; 1	rouge
7°5 - 9° ; 1	violet	13° - 13°5 ; 2	rouge
9°5 - 10° ; X	violet	13°5 - 14° ; 3	rouge
10° - 10°5 ; .	violet	14° - 15° ; 8	rouge
12° - 12°5 ; ■	noir		

B - INTERPRETATION DES RESULTATS

Le codage coloré et le regroupement d'intervalle de température nous ont permis d'identifier certains objets sur l'enregistrement thermique. Cette identification une fois réalisée, nous disposons d'un certain nombre de repères géographiques permettant d'identifier ou d'interpréter d'autres surfaces sur le listage.

Par exemple, au milieu de l'enregistrement, à côté de Guyancourt, une zone a une température apparente comprise entre 9° et 10°5. Puisque nous disposions de repères géographiques, nous avons pu localiser cette surface sur le terrain qui correspond à une zone où les sols présentent des taches d'hydromorphie à 30 cm de profondeur.

Au Sud-Est de l'enregistrement, vers le terrain d'aviation de Toussus, les températures apparentes sont encore faibles, elles vont de 9° à 10°5. Cette zone plus froide correspond à une dépression occupée par des masses d'air plus froid, qui vers midi, ne sont pas encore résorbées.

Par contre, à proximité des étangs de Buc, une parcelle a une température élevée (comprise entre 14° et 15°). Il s'agit d'une parcelle en friche, qui émet beaucoup d'énergie à ce moment de la journée.

Nous avions fait réaliser différents traitements du sol sur des parcelles de l'I.N.R.A. : labour à 25 cm, hersage, roulage du sol, quelques semaines avant la prise de vues. Malheureusement, les dimensions des parcelles étaient trop petites (45 m environ) pour que l'on puisse suivre des différences de réponse thermique sur l'enregistrement. En effet, la réponse de chaque parcelle correspondait au mieux à deux symboles sur l'enregistrement, ce qui est trop faible pour être convenablement interprété. Pourtant, le comportement de chaque parcelle était différent. Nous avons eu l'occasion d'interpréter des photographies couleur dans le visible, au-dessus de parcelles ayant reçu des labours plus ou moins profonds et plus ou moins récents. Ces parcelles avaient reçu une couverture neigeuse de quelques cm., et nous avions constaté que la neige avait fondu là où le labour était le plus récent ou le plus profond.

Il aurait donc été intéressant d'étudier les températures apparentes de sols dont les façons culturales ainsi que les dates auxquelles elles avaient été effectuées, étaient connues.

Parmi les éléments dont la température apparente est bien individualisée se trouvent les vergers. Le verger de La Minière a une température de 12°-12°5, 13° en certains points. Un jeune verger au nord de Guyancourt a une température de 12°-12°5.

Il semble que sur cet enregistrement dans la bande 10-12 μ m, il y ait une bonne corrélation entre la nature des objets et leurs températures apparentes. L'intérêt de ce type d'enregistrement sous forme numérique sur bande magnétique est de pouvoir être traité automatiquement par ordinateur.

Pour obtenir le listage brut, la décomposition de ce listage en listages allant de 0°5 en 0°5, il ne faut que peu de temps. Un tri semblable réalisé

par un être humain demanderait plusieurs jours. De même, le passage du listage brut en un listage trichrome se fait en quelques dizaines de mn. Un coloriage à la main des différents niveaux demanderait de nombreuses heures.

Comme des objets de nature différente ont des températures apparentes différentes, on peut dresser avec ce type d'enregistrement, dans la mesure où l'interprète indique à l'ordinateur les niveaux qui l'intéresse, des inventaires très rapides.

A partir de l'enregistrement de Février 1972, on obtient ainsi avec le listage trichrome une sorte de cartographie automatique des sols nus, des vergers des zones hydromorphes, des zones d'accumulation d'air froid...

Cet essai semble donc encourageant en ce qui concerne l'utilisation de l'infra-rouge lointain en Agronomie, car il montre qu'en étudiant le comportement thermique des sols et des végétaux, on pourrait aboutir à une automatisation de la cartographie de certains objets ou de certains phénomènes.

Chapitre VII

LA SPECTRORADIOMETRIE SUR LE TERRAIN

De Février à Juillet 1973, des mesures de réflectance ont été réalisées sur le terrain au-dessus de sols nus et de diverses cultures de la ferme expérimentale de Grignon. Le but de cette campagne de mesures était d'obtenir des mesures de réflectance faites en plein champ et de pouvoir suivre l'évolution de la réflectance de plusieurs cultures en fonction de leur état végétatif.

I.- LA REALISATION DES MESURES

Les mesures de l'énergie lumineuse réfléchies par les objets ont été faites avec le spectroradiomètre ISCO. L'appareil se compose d'un écran diffuseur, d'un filtre monochromateur interférentiel, d'une cellule photosensible, d'un amplificateur, et d'un cadran de lecture (voir figure 12).

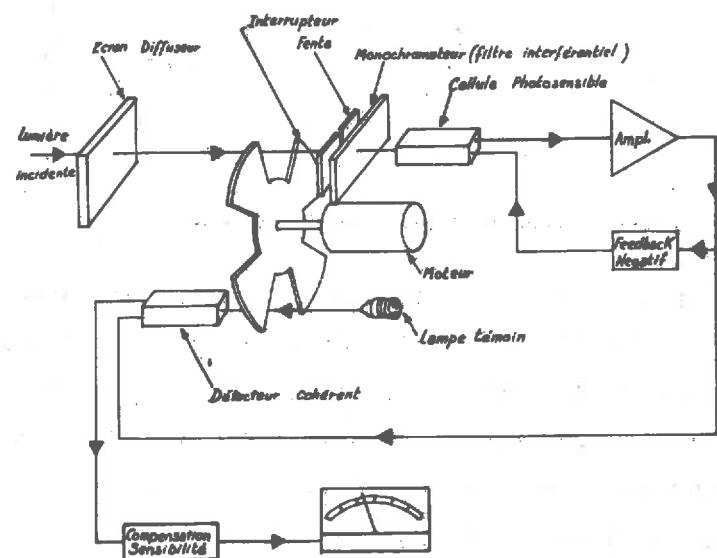


Fig. 12 Schéma de fonctionnement du spectroradiomètre ISCO

L'écran diffuseur renvoie, à partir d'une lumière d'incidence quelconque une lumière uniforme dans toutes les directions. Cette lumière passe ensuite entre les pôles d'un obturateur rotatif (la mesure est donc la moyenne d'un très grand nombre de mesures), traverse le filtre qui sélectionne une bande étroite de longueurs d'onde, puis frappe une cellule photosensible qui mesure son énergie. Le signal électrique, après amplification, détermine la réponse du cadran de lecture.

La cellule photosensible est composée de deux capteurs : l'un dans le visible (380-750 nm), l'autre dans l'infra-rouge proche (750-1 550 nm). Il y a 15 bandes spectrales dans le visible larges de 30 nm, et 17 bandes dans le proche infra-rouge, larges de 60 nm.

L'angle de mesure du spectroradiomètre, théoriquement de 180°, est en fait de 90°. Le spectroradiomètre a été utilisé sur un support métallique le maintenant verticalement à 1,40 au-dessus du sol. L'appareil peut alors capter l'énergie réfléchie par une surface circulaire de 6 m². (voir figure 13).

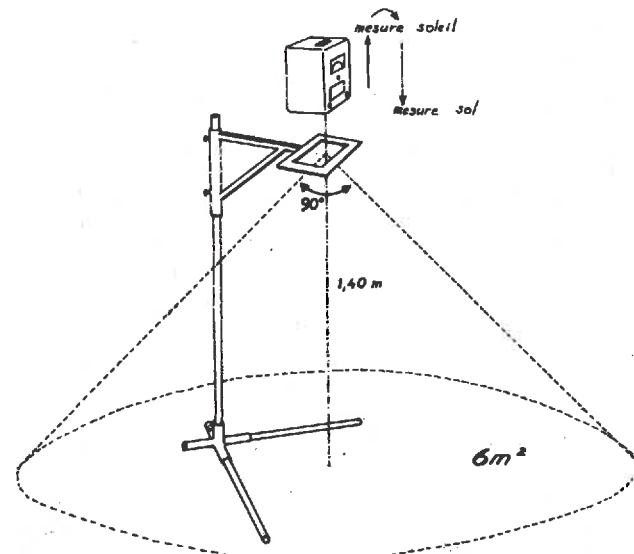


Fig. 13 Schéma de l'appareil et de son support.

L'appareil a mesuré l'énergie réfléchie par la surface visée (champ de Maïs, de Féverole ...). Cette énergie réfléchie est de deux sortes : réflexion spéculaire et réflexion diffuse. Dans le cas de l'expérimentation, l'appareil mesurait surtout l'énergie provenant de la réflexion diffuse et plus ou moins d'énergie provenant de la réflexion spéculaire. La source de référence était le soleil pour lequel on a noté l'énergie incidente selon diverses longueurs d'onde.

Les mesures ayant lieu dehors en plein champ, certains facteurs ont influé sur les mesures, et ont entraîné des contraintes. Celles-ci sont liées à la manipulation, au soleil, et à l'appareil.

A - CONTRAINTE S LIEES A LA MANIPULATION

1) Le support .-

Le seul facteur que l'on puisse faire varier avec le support est la hauteur par rapport au sol, jusqu'à 1,70 m. Mais, du fait du grand développement de plantes comme les céréales ou le Maïs, il n'est pas possible de maintenir constante la distance entre le toit de la végétation et l'appareil, lors de mesures périodiques au même point.

Une mesure systématique a été faite au même point, en faisant varier la hauteur (ce qui correspond à faire varier la surface de la tache mesurée au sol). Il en ressort que pour de faibles variations de distance par rapport au substrat, les réflectances mesurées ne sont pas significativement différentes.

Un autre point à signaler : la présence au sol des deux pieds du support, qui entrent dans le cône de mesure. Ils couvrent cependant moins de 5 % de la surface de mesure et leur influence peut être négligée. De plus, elle est constante.

Le support est donc un excellent outil pour des cultures ayant un développement faible en hauteur (prairie, betterave, pomme de terre) ou pour des sols nus. Il remplit très bien son rôle pour toutes les autres cultures jusqu'en mai-juin.

2) L'horizontalité .-

Pour que la surface mesurée au sol soit constante, et pour que l'influence de l'angle solaire puisse être contrôlée, l'appareil doit être toujours en position horizontale. Ceci a été réalisé le plus souvent possible, mais a posé quelques problèmes dans les parcelles en pente. Il s'avère nécessaire de contrôler l'horizontalité avec un niveau.

3) L'influence de l'expérimentateur .-

Lorsque l'appareil est tourné vers le sol, l'expérimentateur pénètre légèrement dans le cône de mesure. Ce facteur peut être considéré constant, et de toute manière influence peu les résultats.

La présence d'un expérimentateur placé à 60 cm de l'appareil diminue les valeurs d'énergie lues de 1 % environ. Au-delà de 1 m, l'influence n'est pas décelable.

Toutes ces contraintes liées à la manipulation pourraient être éliminées en utilisant une plateforme auto-mobile, pouvant être orientée dans 3 dimensions ("cherry picker"). Des mesures pourraient alors être faites en fonction de la hauteur (de 0 à 20 ou 30 m), et de l'inclinaison du soleil. Ceci permettrait en outre d'effectuer les mesures sans pénétrer dans les parcelles. Cette technique a été

utilisée aux U.S.A. (Université Purdue) avec de bons résultats, mais n'a pu être réalisée en France pour des raisons financières. Par contre, des mesures à partir de tours pourraient être envisagées.

B - CONSTRAINTES LIEES AU SOLEIL

Ce sont de loin les plus importantes.

1) La couverture nuageuse .-

Le fait de devoir tourner l'appareil vers le soleil, puis vers le sol, la donnée exploitable étant le rapport des deux énergies, impose de travailler avec une nébulosité constante. Ceci limite considérablement les périodes favorables aux mesures.

Même par ciel très dégagé (mars 1973), un léger voile, imperceptible à l'oeil, suffit pour modifier la mesure, surtout dans la partie infra-rouge du spectre. Les meilleures conditions sont réalisées lors de longues éclaircies entrecoupées de nuages (minimum de brume). Les plus grandes variations que nous ayons pu observer sont dues à des modifications de l'état du ciel entre deux mesures successives.

Une amélioration considérable serait de disposer de deux appareils, l'un dirigé vers le soleil, l'autre vers le sol, pour obtenir des mesures simultanées.

Il est possible aussi de concevoir un appareil possédant deux ouvertures, l'une dirigée vers le ciel, l'autre vers la terre. La cellule mesurerait tour à tour les énergies des deux flux incidents et l'on pourrait obtenir directement la réflectance.

Ceci permettrait de mesurer la réflectance quel que soit l'état du ciel, étant bien entendu qu'une correction devrait être apportée en fonction de la nébulosité.

2) Variations de l'angle solaire .-

Quel que soit l'angle solaire, l'appareil est toujours orienté verticalement. Or, il est souhaitable de comparer des mesures faites avec la même inclinaison solaire.

Nous avons tenté de mesurer l'importance du facteur angle solaire, par une série de mesures répétées sur la même parcelle pendant la journée. Il faut souligner que pendant ces mesures, la nébulosité n'a pas été constante. Les résultats sont donc très partiels et indiquent plutôt des ordres de grandeur.

- la réflectance diminue quand l'angle solaire augmente,
- cette diminution est variable suivant les longueurs d'onde ; elle est plus grande dans l'infra-rouge,
- les variations deviennent très importantes pour les inclinaisons faibles.

Il ne faut donc pas négliger ce facteur, mais il s'avère difficile de le quantifier. C'est pour cette raison que les mesures ont eu lieu en milieu de journée (entre 10 et 15 heures).

C - CONTRAINTE LIEES A L'APPAREIL

Le spectroradiomètre possède deux capteurs. Or, ces deux capteurs n'ont pas la même bande passante. Le capteur visible (380-750 nm) a une bande passante de 30 nm et le capteur infra-rouge de 60 nm.

L'appareil ne peut donc mesurer que des variations spectrales s'étendant sur 30 ou 60 nm, ce qui revient à dire que les variations fines sont amorties.

De plus, les mesures sont faites dans le visible tous les 25 nm et dans l'infra-rouge tous les 50 nm, si bien qu'il y a un chevauchement des bandes passantes, donc un nouvel amortissement.

Pour la longueur d'onde 750 nm, les valeurs données par la cellule visible et la cellule infra-rouge sont différentes, car les bandes passantes sont de largeurs différentes.

Pour rendre les courbes de réflectance continues, on a réalisé un ajustement linéaire portant, pour une même culture, sur plusieurs mesures correspondant à cette longueur d'onde.

L'erreur liée à cet ajustement est faible vis-à-vis des erreurs dues aux variations de l'état du ciel durant une série de mesures.

II.- ETABLISSEMENT DES COURBES DE REFLECTANCE

En effectuant pour chaque longueur d'onde le rapport : $\frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie incidente}}$, on obtient des valeurs de réflectance.

Mais les causes de variation d'une mesure à l'autre sont nombreuses. Plus le nombre d'enregistrements est important, plus les valeurs obtenues peuvent se rapprocher de la réflectance réelle.

Le but de l'étude étant de différencier des objets entre eux par leurs réflectances, il faut connaître la plus petite différence significative entre deux valeurs de réflectance. Pour déterminer cette plus petite différence signifi-

ve, deux séries d'enregistrements ont été réalisées (voir figure 14).

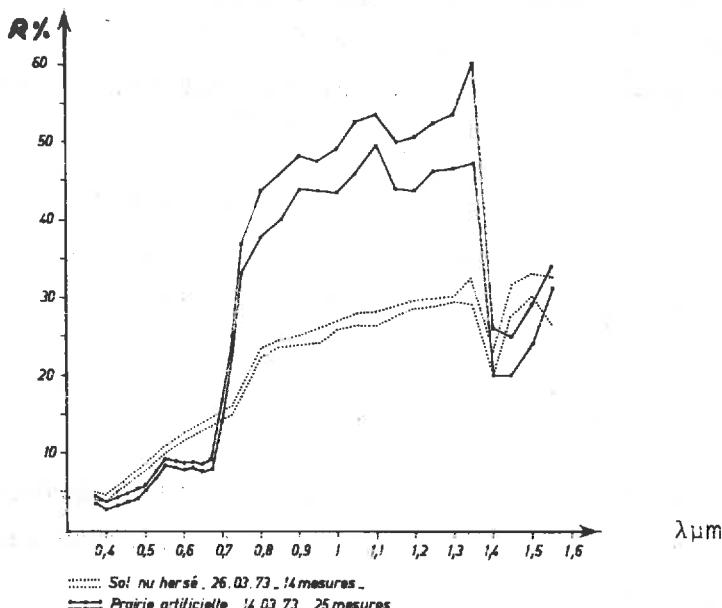


Figure 14 - Intervalle de confiance de la médiane pour deux séries de mesures de réflectance.

- Le 14 Mars, 25 enregistrements ont été effectués sur une parcelle de prairie artificielle, entre 11 h. et 15h 15, par un ciel sans nuages, mais quelque peu voilé.

Cette parcelle était constituée d'un mélange de Fétuque, Dactyle, et Ray-grass. Le recouvrement de la surface totale par la végétation était de 60 %. Pour chaque longueur d'onde, on a calculé la médiane des 25 mesures ainsi que son intervalle de confiance (pour 25 mesures classées par ordre croissant, l'intervalle de confiance de la médiane vraie est donné par le 8ème rang et 18ème rang, avec un risque inférieur à 4 %. Ce qui veut dire que l'on a 96 % de chances que la médiane vraie se trouve située entre les valeurs du 8ème et 18ème rang).

Cet intervalle de confiance n'est pas proportionnel à la médiane. Par contre, il est presque constant dans chacune des deux gammes visible et infra-rouge.

L'intervalle de confiance est de

1,2 % dans le visible

7,0 % dans l'infra-rouge.

La précision dans l'infra-rouge est donc moins bonne que dans le visible.

- Le 26 Mars, cette expérience a été renouvelée sur un sol nu ; les intervalles obtenus sont plus faibles que pour la végétation :

0,6 % dans le visible,

3,4 % dans l'infra-rouge.

Il y a moins de variations d'une mesure à l'autre pour un sol nu que pour une prairie. Les plus grandes variations sont peut-être dues au mouvement des feuilles des végétaux lorsqu'il y a du vent et peut-être aux différentes inclinaisons des surfaces des feuilles vis-à-vis du rayonnement solaire incident.

A la suite de ces mesures, les intervalles de confiance 0,6 % et 3,4 % ont été choisis comme plus petite différence significative pour toutes les mesures effectuées.

Comme chaque mesure ne pouvait être répétée 25 fois (surtout à cause de variations météorologiques), il a été décidé de procéder à 3 mesures consécutives et de choisir pour chaque longueur d'onde, la médiane des 3 mesures.

III.- COMMENTAIRE DES COURBES

Plusieurs types de courbes de réflectance ont été obtenues. A propos des sols dans le Chapitre I, nous avons présenté les variations de la réflectance suivant la composition chimique des sols : sols plus ou moins riches en glauconie ou en calcaire, et les variations en fonction de l'humidité des sols.

Les courbes obtenues ont été commentées précédemment. Rappelons que c'est la première fois en France que l'on fait des mesures un peu systématiques sur le terrain concernant la réflectance des sols. C'est un sujet complexe à étudier, car de nombreux facteurs interdépendants entrent en jeu. Signalons entre autre : la texture, la composition chimique, l'humidité, la teneur en matière organique, la plus ou moins grande rugosité de surface...
Cela explique peut-être que les recherches avancent si lentement dans ce domaine.

Les végétaux cultivés ont aussi été étudiés de façon systématique au cours de la période végétative. Nous avons pu aller plus loin que pour les sols dans l'influence de différents facteurs. Voici les principaux points abordés.

A - INFLUENCE DU RECOUVREMENT DU SOL

La courbe de réflectance de la culture de Maïs le 16 juin 1973 est très particulière car elle ressemble à la courbe de réflectance d'un sol : il n'y a pas de pic marqué à 550 nm et la réflectance augmente assez peu à partir de 700 nm (voir figure 15).

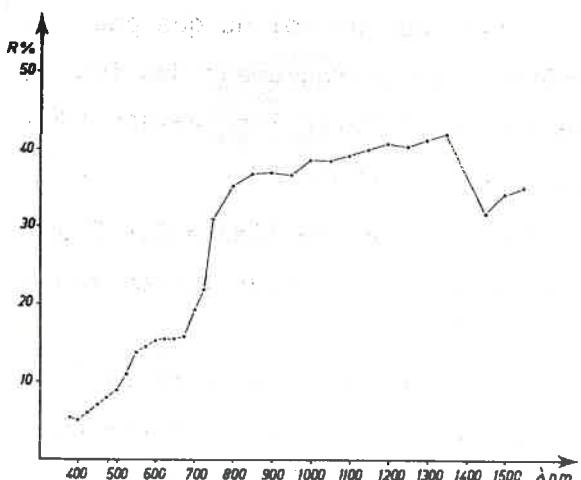


Figure 15 - Courbe de réflectance du Maïs.

MAÏS - Juin 1973

Ceci est dû au stade de développement du Maïs. A la mi-Juin, celui-ci est très peu développé. Pour apprécier le recouvrement du sol par le feuillage, nous avons pris des photographies verticales à partir du support où ont été faites les mesures au spectroradiomètre. Ensuite, nous avons mesuré la surface couverte par le végétal vis-à-vis de la surface totale.

Suivant ce procédé, le 16 juin 1973, le Maïs ne couvrait que 10 à 15 % de la surface totale.

Ce sont donc surtout les rayonnements réfléchis par le sol, plus que ceux réfléchis par les feuilles du Maïs, qui sont enregistrés.

Des mesures faites à la même date au-dessus de Blé d'hiver, de Luzerne, de Féverole, de Pommes de terre et de Betteraves fourragères permettent de tracer des courbes de réflectance typiques de celles de végétaux chlorophylliens (voir figures 16 et 17).

La réflectance diminue à 400 nm et à 675 nm, la valeur de la réflectance étant plus faible à 400 qu'à 675 nm. D'autre part, la réflectance augmente à 550 nm et de façon très importante à partir de 700 nm.

Le pourcentage de recouvrement du sol par le feuillage est respectivement le suivant :

Blé d'hiver : 65 %. Luzerne : 60 %. Féverole : 40 %. Pommes de terre : 40 %. Betteraves fourragères : 40 %.

Dans le cas de la Féverole, des Pommes de terre et des Betteraves fourragères, le recouvrement du sol n'est pas très important puisqu'inférieur à 50 %, pourtant, l'énergie réfléchie par le feuillage est suffisante pour donner une courbe de réflectance typique d'un végétal.

Des mesures faites le 22 mars 1973 sur une friche, pour laquelle le

recouvrement du sol par une végétation chlorophyllienne active est de 20 %, permettent de tracer une courbe de réflectance semblable à celles des végétaux.

Il semble donc qu'une discontinuité se situe vers 15 % de recouvrement du sol par une végétation active.

En-dessous de 15 % de recouvrement, la parcelle est perçue à travers les courbes de réflectance comme un sol nu. Au-dessus de 15 % de recouvrement, l'influence des radiations réfléchies par le feuillage est telle que l'ensemble de la parcelle a des courbes de réflectance du type : végétal-chlorophyllien.

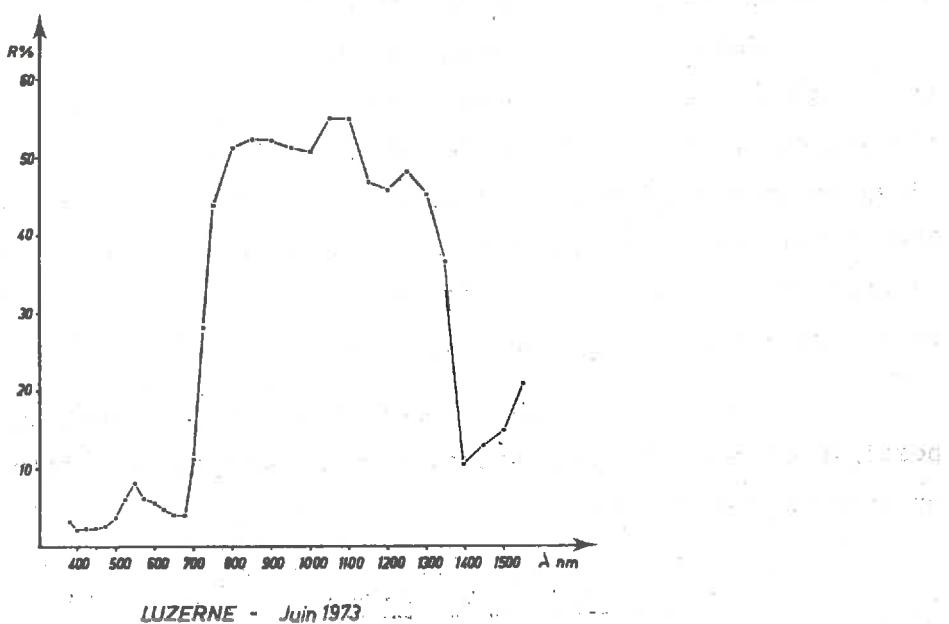


Figure 16 - Courbe de réflectance de la Luzerne.

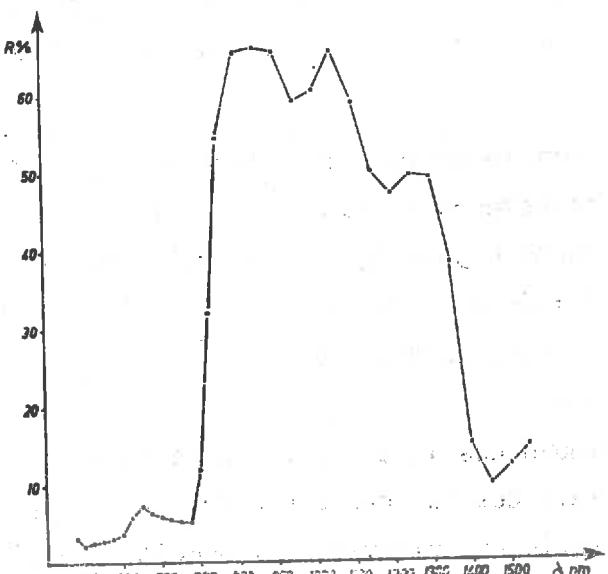


Figure 17 - Courbe de réflectance de la Féverole.

B - INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU DES TISSUS

Les courbes de réflectance des cultures présentent dans le proche infra-rouge, deux minima, plus ou moins accentués. Un premier minimum se situe vers 950 nm, l'autre vers 1 200 nm, le minimum de 1 200 étant plus marqué que celui de 950, quelles que soient les cultures.

Par contre, selon les cultures, ces minima sont plus ou moins accentués vis-à-vis du reste de la courbe.

Par exemple, la courbe de réflectance de la Luzerne le 16 Juin 1973, a des minima moins prononcés que ceux de la courbe de la Féverole le 16 Juin 1973.

Compte-tenu de l'état actuel des recherches, il semble que ces minima soient dûs à l'eau contenue dans les tissus végétaux, mais aucune expérimentation n'a encore été menée à terme permettant d'établir des relations exactes entre l'eau de constitution des tissus et ces minima de réflectance dans le très proche infra-rouge. Une recherche dans ce sens pourrait être entreprise, d'abord au laboratoire sur des échantillons frais de feuilles, mais ceci relève plus de la physiologie végétale que de l'agronomie.

Une fois le problème étudié sur échantillons au laboratoire, il serait possible de réaliser des mesures en plein champ, mais cela ne peut être fait dans un très proche avenir.

C - IDENTIFICATION D'ESPECES

Pour une longueur d'onde donnée, à un moment donné, les valeurs de réflectance sont différentes selon les végétaux. Il semble à priori possible d'utiliser les valeurs de réflectance pour identifier des végétaux, mais selon la période de l'année, les longueurs d'onde favorables à cette identification risquent de changer.

Quelle que soit la période de l'année, on distingue les végétaux des sols en comparant la réflectance à 550 et à 675 nm.

Si la différence $R_{550} - R_{675}$ est positive, il s'agit d'un végétal chlorophyllien. Si la différence est négative, il s'agit d'un sol nu, de résidus d'origine végétale mais secs, ou d'un végétal chlorophyllien couvrant moins de 15 % de la surface du sol.

Ceci est valable quelle que soit la saison.

Nous avons fait des mesures sur différentes espèces végétales, mais non sur différentes variétés cultivées. Il semble, que l'on puisse distinguer

entre elles des espèces différentes à condition de comparer les valeurs de réflectance dans des bandes spectrales bien choisies. Selon les saisons, les bandes spectrales peuvent varier. C'est ainsi que dans les parcelles expérimentales nous avons utilisé :

.en Mars : I₁ : R₇₅₀ + R₈₀₀ + R₈₅₀

si la somme était inférieure à 125, il s'agissait d'Escourgeon ou d'une prairie artificielle.

si la somme était supérieure à 150 il s'agissait d'une prairie permanente.

Les distinctions entre espèces semblent assez délicate à cette période, car les végétaux sont dans des états voisins et recouvrent assez peu le sol.

.en mi Mai : I₂ : R₅₅₀ + R₅₇₅

si la somme était supérieure à 38, il s'agissait de Colza

si la somme était inférieure à 15, il s'agissait de diverses cultures qui se différenciaient à d'autres longueurs d'onde, c'est ce que montre le tableau 7.

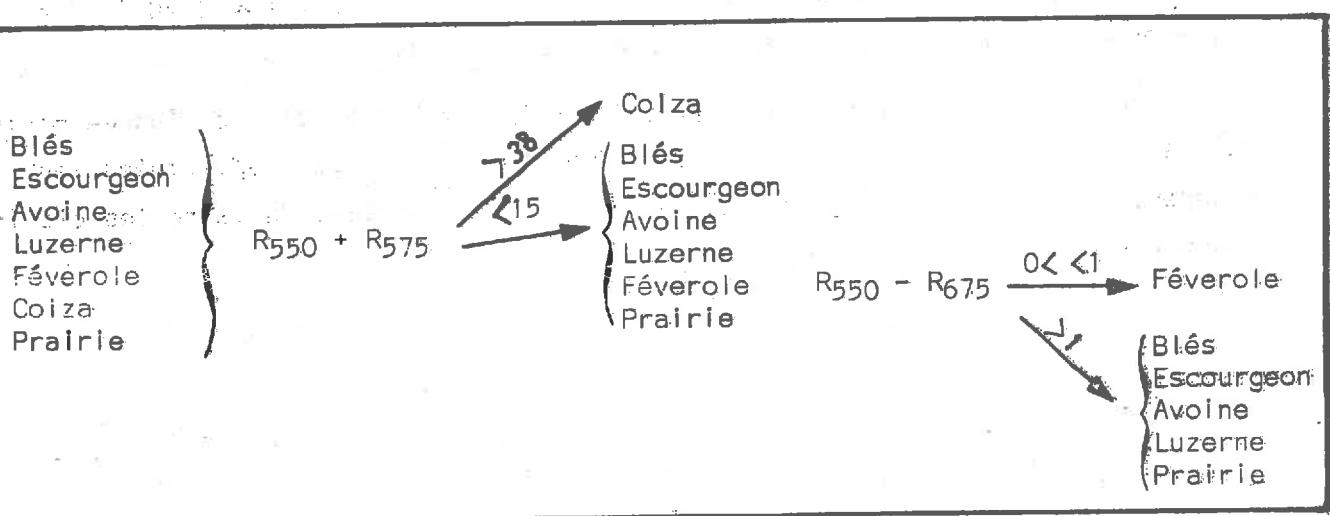


Tableau 7 : Différenciation des cultures selon leur valeur de réflectance en mai.

.à la mi Juin : I₄ : R₅₅₀ + R₆₇₅

suivant les valeurs atteintes par cette somme, une différenciation des cultures était encore possible. C'est ce qu'exprime le tableau 8.

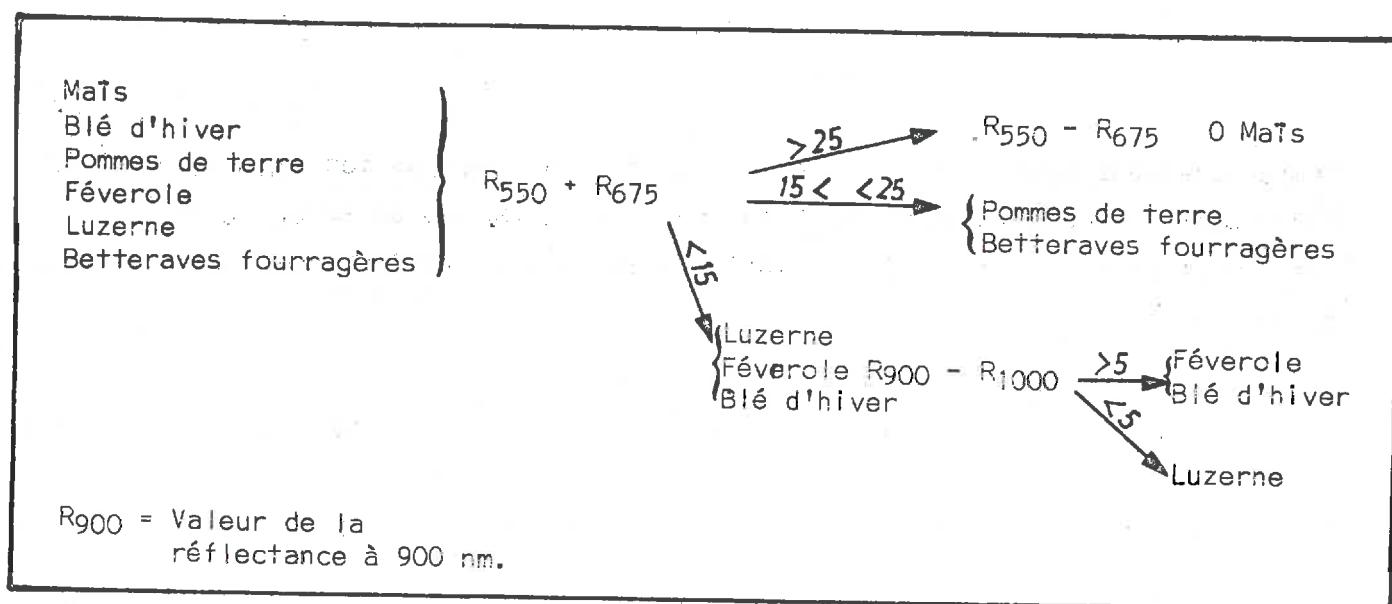


Tableau 8 : Différenciation des cultures selon des valeurs de leur réflectance en juin.

Une différenciation d'espèces est donc possible à partir des valeurs de réflectance prise dans certaines longueurs d'onde. D'après les différenciations réalisées à partir de photographies fausse-couleur, il semble que l'identification à l'aide des valeurs de réflectance puisse être menée jusqu'à des différences de variétés cultivées. (voir chapitre IV).

Les mesures que nous avons faites à différents mois de l'année montrent qu'une identification est possible. Suivant la région où sont effectuées les mesures, selon les saisons, les longueurs d'onde permettant de faire les distinctions varient.

Chapitre VIII

LES ENREGISTREMENTS MULTISPECTRAUX EN ALTITUDE

Le 20 Juin 1973, le C.N.E.S. a réalisé une mission aéroportée au-dessus des parcelles expérimentales de GRIGNON. L'avion volant à 1200 m d'altitude transportait dans une trappe ventrale le scanner multispectral DAEDALUS que nous avons présenté au Chapitre II.

Le but de cette mission était, comme pour les missions photographiques ou thermiques, de mieux connaître l'utilisation qui pouvait être faite en Agronomie d'un nouvel appareil de télédétection. Comme nous avions pu préparer cette mission aéroportée par des séries de mesures spectroradiométriques au sol, nous avons pu analyser plus précisément certains phénomènes enregistrés en altitude.

I.- VISUALISATION et ANALYSE DE L'INFORMATION

Les visualisations des données ont été faites sur film photographique. Pour chaque canal, le film a subi un codage coloré des densités optiques. Nous avons décrit la méthode au chapitre III.

L'analyse de l'information contenue sur chaque visualisation nous a donné les résultats suivants :

A - IDENTIFICATION D'ESPECES

Compte tenu, pour chaque image, de la couleur correspondant à un grisé donné, on a pu établir un tableau où, pour chaque canal, les cultures sont classées en fonction de leur grisé plus ou moins clair ou foncé, c'est-à-dire en fonction de la plus ou moins grande quantité d'énergie qu'elles réfléchissent (voir tableau 9).

Dans un canal donné, certaines cultures se distinguent, d'autres sont confondues. La comparaison de plusieurs canaux permet de différencier toutes les cultures.

Dans le cas étudié, les canaux permettant l'identification de toutes les espèces sont : le canal 7 (650-700 nm), le canal 9 (800-890 nm) et le canal 10 (920-1 100 nm).

Pour un vol fait à une autre date, ou dans un autre lieu, les canaux à utiliser ne seraient vraisemblablement pas les mêmes.

B - INFLUENCE DU RECOUVREMENT DU SOL

Le Maïs a, pour tous les canaux, sauf le 9 et le 10, la réponse la plus forte. Ceci est dû à son faible recouvrement sur le terrain à cette époque de l'année. L'énergie reçue par le scanner provient pour la plupart de celle réfléchie par le sol. L'énergie réfléchie est donc plus importante que pour les autres cultures dans le visible et peu importante dans le proche infra-rouge. Un recouvrement végétal inférieur à 15 % est perçu comme un sol à 1 200 m d'altitude.

Par contre, les recouvrements égaux ou supérieurs à 40 % de la surface totale sont perçus comme une végétation chlorophyllienne.

Le recouvrement d'un sol par une végétation se traduit sur les images multispectrales lorsque sa valeur est au moins égale à 40 %.

Une végétation ne couvrant que 15 % du sol n'est pas directement visible.

C - INFLUENCE DE LA STRUCTURE INTERNE DU FEUILLAGE

Dans le tableau 9, les cultures occupent diverses positions les unes par rapport aux autres suivant les canaux. C'est dû au fait qu'elles réfléchissent plus ou moins d'énergie.

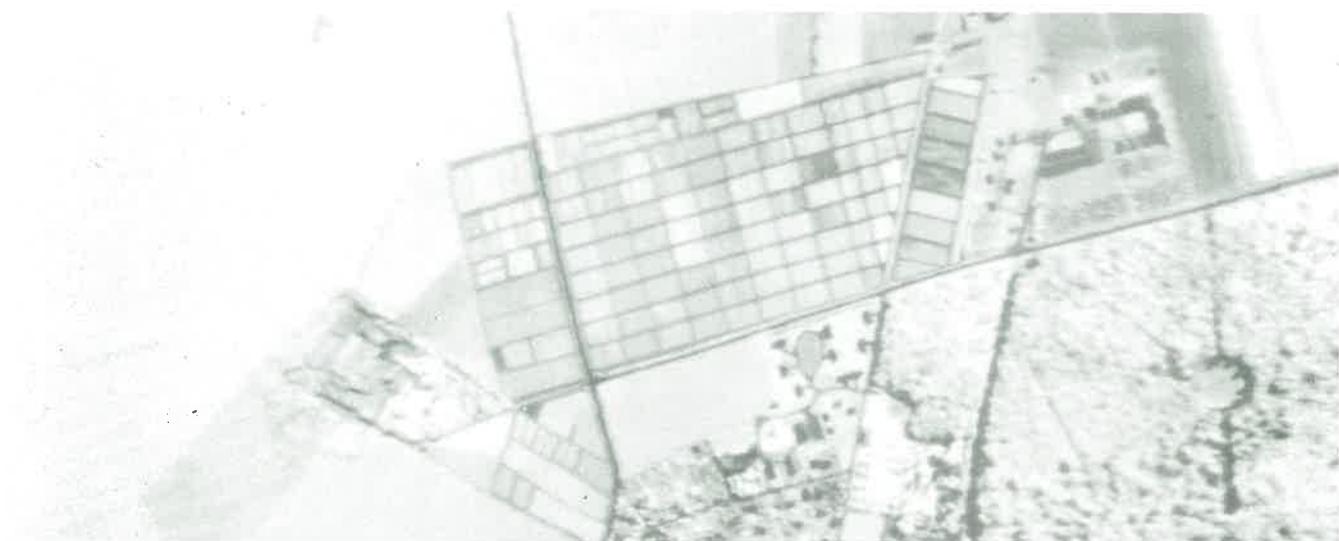
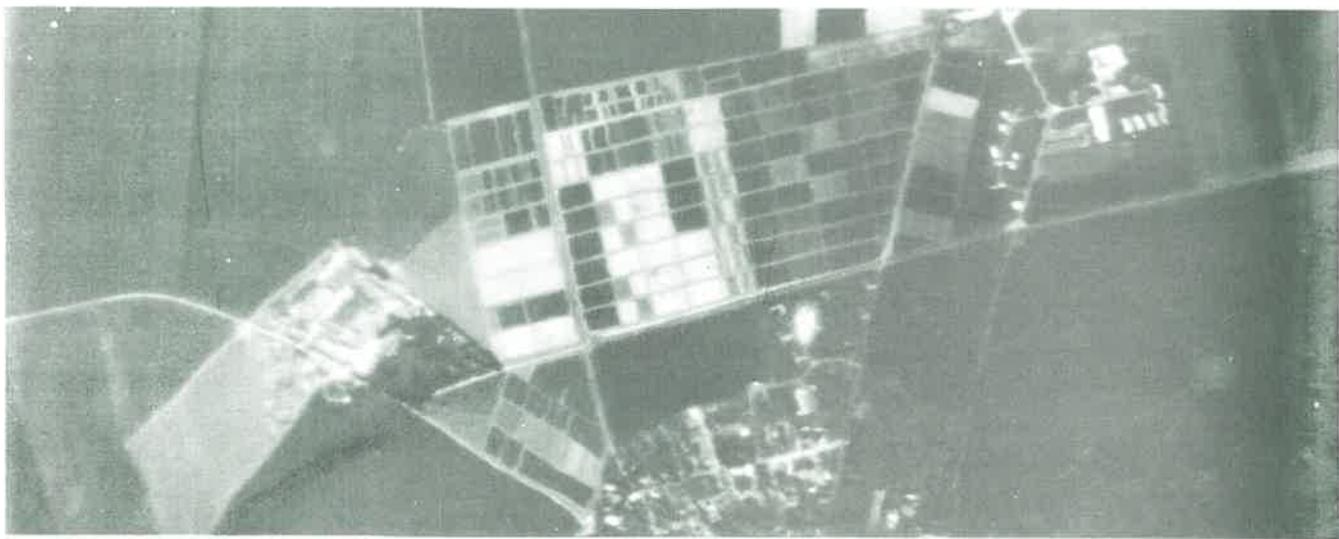
Dans presque tous les canaux, sauf le canal 9, la Féverole et la Luzerne ont un comportement voisin.

Dans le visible, la réponse spectrale est à peu près la même pour les deux espèces. Les pigments contenus dans les feuilles sont identiques. Les proportions des divers pigments doivent être comparables.

Au contraire dans le proche infra-rouge, la réflectance de la Féverole est beaucoup plus forte que celle de la Luzerne. Il semble que cela soit dû à des différences de structure interne du feuillage. La feuille de Féverole est plus épaisse que celle de Luzerne. Le parenchyme palissadique est plus développé que le parenchyme lacunaire chez la Luzerne que chez la Féverole.

GAUSMAN avait montré à partir de mesures en laboratoire sur échantillons de feuilles* que la réflectance était d'autant plus forte dans le très proche infra-rouge que le parenchyme était plus développé. Il semble que nous ayions vérification sur le terrain des résultats de mesures faites aux Etats Unis au laboratoire.

* (Maïs, Jacinthe, Laurier)



Canal 7

Canal 9

Canal 10

Illustration 9 - Visualisations d'enregistrements multispectraux. Le 20 juin 1973.

II.- COMPARAISON ENTRE LES MESURES AU SOL ET LES MESURES EN ALTITUDE

Il était tentant de comparer les mesures de spectroradiométrie au sol avec les enregistrements multispectraux en altitude, puisque certaines mesures avaient eu lieu presque en même temps. (le 16 Juin et le 20 Juin dans des conditions météorologiques analogues).

Cette comparaison, si elle peut être faite à un niveau qualitatif, ne peut être réalisée quantitativement. En effet, à 1,70 m au-dessus du sol et à 1 200 m de hauteur, un spectroradiomètre ne reçoit pas les mêmes proportions de réflexion spéculaire et de réflexion diffuse.

A - COMPARAISON DES BANDES SPECTRALES

Les bandes spectrales du spectroradiomètre sont plus étroites que celles du scanner multispectral. Une comparaison des enregistrements faits avec les deux appareils n'est possible qu'en transformant les courbes de réflectance obtenues avec le spectroradiomètre en histogrammes de fréquences cumulées pour des bandes spectrales identiques à celles du scanner (voir figures 18, 19, 20).

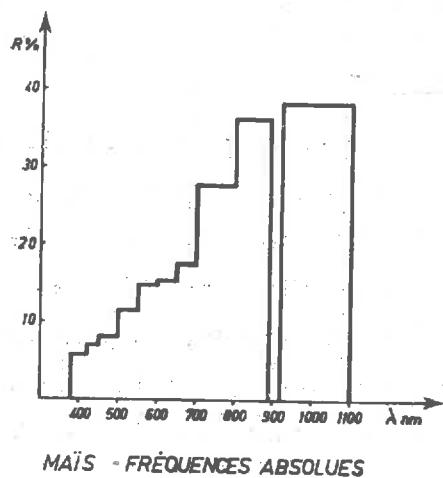
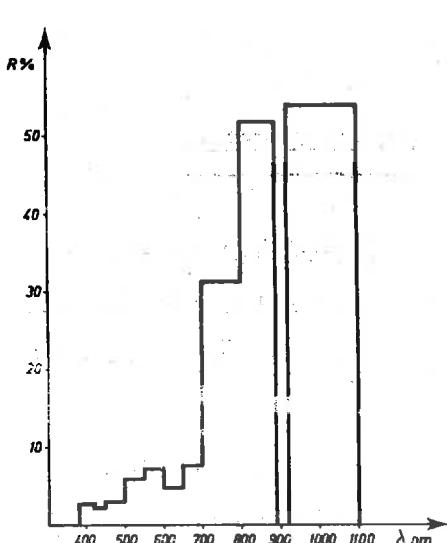
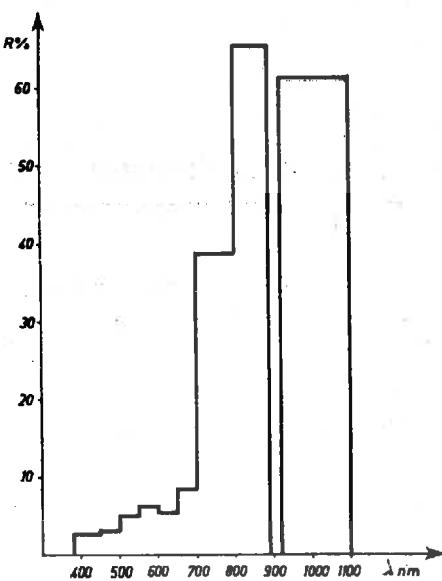


Figure 18 - Histogramme de réflectance.

Il existe une interruption dans l'histogramme entre 890 et 920 nm, car le scanner multispectral Daedalus n'enregistre pas cette bande spectrale, comme nous l'avons indiqué au chapitre II.



LUZERNE - FRÉQUENCES ABSOLUES



FÉVEROLE - FRÉQUENCES ABSOLUES

Figure 19 - Histogramme de réflectance.

Figure 20 - Histogramme de réflectance.

B - COMPARAISON DES RESULTATS

A partir des histogrammes de réflectance dont certains viennent d'être présentés, nous avons dressé le tableau 10 où les cultures sont classées selon leur plus ou moins grande réflectance. La comparaison du tableau 9 avec le tableau 10 nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

1) Influence du recouvrement du sol .-

Le Maïs a la plus forte réflectance dans le visible, que ce soit pour les mesures au sol ou pour l'enregistrement multispectral.

A la mi Juin, la partie aérienne recouvrait très faiblement le sol (moins de 15 %). La réflexion captée provient principalement du sol

Sur les deux types d'enregistrements, on peut donc distinguer les sol nus, de la végétation, sauf si le recouvrement de la surface totale par les végétaux est inférieur à 15 %. Dans ce cas, seule la réponse du sol est visible.

Pour un recouvrement de la surface totale par le feuillage supérieur ou égal à 40 %, toute végétation chlorophyllienne est perçue comme telle. La réflectance mesurée dans chaque bande spectrale correspond à l'énergie réfléchie par le feuillage.

2) Identification d'espèces .-

Bien que les valeurs de réflectance enregistrées au sol et en altitude dans un canal donné, ne soient pas égales pour un même végétal, les réponses des

Bandes spectrales	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teinte	380 nm/ 420 nm	420 nm/ 450 nm	450 nm/ 500 nm	500 nm/ 550 nm	550 nm/ 600 nm	600 nm/ 650 nm	650 nm/ 700 nm	700 nm/ 800 nm	800 nm/ 890 nm	920 nm/ 1100 nm.
CLAIRE	Mais Betteraves sucrières { Blé hiver Blé print. Orge Avoine P.de terre Féverole Luzerne Betteraves fourragère.	Mais Betteraves sucrières { Blé hiver Blé print. P.de terre Orge Avoine Betteraves fourragère. { Féverole Luzerne	Mais Betteraves sucrières { Blé hiver Blé print. P.de terre Orge Avoine Betteraves fourragère. { Féverole Luzerne	Mais Betteraves sucrières { Blé hiver Blé print. P.de terre Orge Avoine Betteraves fourragère. { Féverole Luzerne	Mais Betteraves sucrières { Blé hiver Blé print. P.de terre Orge Avoine Betteraves fourragère. { Féverole Luzerne	Mais Betteraves sucrières { Blé hiver Blé print. P.de terre Orge Avoine Betteraves fourragère. { Féverole Luzerne	Mais Betteraves sucrières { Blé hiver Blé print. P.de terre Orge Avoine Betteraves fourragère. { Féverole Luzerne	Mais Betteraves sucrières { Blé hiver Blé print. P.de terre Orge Avoine Betteraves fourragère. { Féverole Luzerne	Mais Betteraves sucrières { Blé hiver Blé print. P.de terre Orge Avoine Betteraves fourragère. { Féverole Luzerne	Mais Betteraves sucrières { Blé hiver Blé print. P.de terre Orge Avoine Betteraves fourragère. { Féverole Luzerne
FONCÉE										

Tableau 9 : Identification de différentes cultures sur des enregistrements multispectraux à partir d'un avion.

Bandes spectrales	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rélectance	380 nm- 420 nm	420 nm- 450 nm	450 nm- 500 nm	500 nm- 550 nm	550 nm- 600 nm	600 nm- 650 nm	650 nm- 700 nm	700 nm- 800 nm	800 nm- 890 nm	920 nm- 1100 nm
FORTE	Mais P.de terre Betteraves fourragère. { Blé hiver Féverole Luzerne	Mais P.de terre Betteraves fourragère. { Féverole Luzerne								
FAIBLE										

Tableau 10 : Classement des cultures dans les différentes bandes spectrales, selon leur réflectance.

végétaux sont très différentes.

On a pu identifier toutes les espèces sur chacun des enregistrements, en comparant les réponses spectrales pour un même canal et d'un canal à l'autre.

3) Influence du port des végétaux .-

Dans le visible, les Pommes de terre ont relativement de fortes réflectances au sol et des réflectances faibles en altitude. De même, les Betteraves fourragères ont une réponse plus forte au sol qu'en altitude.

Par contre, dans la même portion du spectre, le Blé d'hiver a des valeurs de réflectance plus faibles au sol qu'en altitude.

Il nous a semblé que le port des végétaux intervenait dans les différences de comportement spectral.

Un pied de Betterave vu de dessus à 1,70 m de haut présente un certain nombre de surfaces lisses à dominance horizontale, correspondant aux feuilles. La possibilité d'une réflexion spéculaire est importante.

Un pied de Pomme de terre, s'il n'a pas un feuillage aussi lisse qu'un pied de Betterave a néanmoins un feuillage orienté plutôt horizontalement et assez homogène. Cela expliquerait les valeurs de réflectance assez fortes pour les mesures au sol. Les céréales comme le Blé ont des feuilles dont l'orientation est plutôt verticale. D'autre part, ces feuilles sont longues et étroites. Elles ne jouent pas le rôle de surfaces planes très réfléchissantes que jouent les feuilles de Betteraves. Pour un spectroradiomètre placé à 1,70 m au-dessus d'un champ de Blé, la réflexion spéculaire sera faible.

Par contre, à 1 200 m d'altitude, le comportement spectral de ces cultures s'inverse. Il semble que cela soit dû au fait que c'est l'ensemble du champ et non plus des individus végétaux qui soient perçus. Dans ce cas, un nouvel élément prend beaucoup d'importance.

4) Influence de la structure du champ

A 1 200 m d'altitude, à la mi Juin, un champ de Betteraves ou de Pommes de terre présente une surface irrégulière composée du feuillage des végétaux et des surfaces de sol nu situées entre deux rangées et de part et d'autre d'un plant sur une rangée.

Dans ces conditions, la réflexion spéculaire est moins importante qu'à faible altitude.

Par contre, à cette même époque, un champ de Blé, s'il est en bon état sanitaire, présente une surface homogène et assez lisse puisque le sol n'est pas

visible. L'énergie réfléchie sera moins dispersée que pour les champs de Betteraves ou de Pommes de terre. L'appareil multispectral captera des valeurs de réflectance plus importantes pour un champ de Blé que pour les plantes sarclées.

C) CONCLUSION

Dans la mesure où des enregistrements multispectraux sont faits en altitude, ce ne sont pas seulement les caractères physiologiques des végétaux qui interviendront dans leur réponse spectrale, mais aussi les caractéristiques morphologiques du feuillage ainsi que la disposition et l'écartement entre eux des différents individus.

Il est évidemment difficile de décrire et quantifier la structure d'une parcelle cultivée, mais il faudra orienter des recherches dans ce sens si l'on veut étudier de façon systématique le comportement spectral des cultures et automatiser leur identification à partir d'enregistrement en altitude.

Il ressort particulièrement de cette comparaison de mesures au sol et en altitude qu'une connaissance au sol est indispensable pour pouvoir interpréter correctement toutes les données. D'autre part, certains phénomènes ne peuvent se comprendre qu'en connaissant la morphologie des végétaux, leur mode de culture ainsi que des caractéristiques d'ordre Agronomique.

Pour ces raisons, nous pensons qu'une véritable interprétation n'est possible que par un spécialiste qui étudie les techniques de télédétection, plutôt que par un physicien qui ne connaît pas véritablement les problèmes propres à une spécialité. La solution idéale consiste en la collaboration entre les diverses spécialités.

Chapitre IX

LES PHOTOGRAPHIES PRISES A HAUTE ALTITUDE

Depuis 1970, le Centre National d'Etudes Spatiales a réalisé plusieurs vols avec des ballons stratosphériques. Suivant les cas, les caractéristiques des ballons et des nacelles pouvaient être différentes. Nous avons particulièrement étudié le vol du 3 novembre 1971, dont les caractéristiques d'appareils et de vol ont été données au chapitre IV.

Ce vol ballon n'avait pas été réalisé sur notre demande, mais nous nous y sommes intéressés, car il comprenait des photographies à petite échelle (échelle de prise de vues 1/400 000) et nous désirions nous informer de l'utilisation qui pouvait en être faite en Agronomie.

I.- PROBLEMES D'INTERPRETATION DES PHOTOGRAPHIES BALLON

Les photographies prises à partir de ballons stratosphériques ont toutes les qualités définies pour les photographies : bonne résolution, grain fin, possibilité de se repérer géographiquement, déformations réduites. Mais comme elles sont prises à haute altitude, l'échelle est petite et l'identification de détails est souvent délicate. Dans ce cas, un objet, par exemple une route, sera révélée par ses relations avec les éléments avoisinants : c'est une ligne qui relie deux agglomérations et qui est recoupée par d'autres lignes du même type. La distinction entre une route, une voie de chemin de fer, une ligne à haute tension n'est pas immédiate. C'est par une réflexion sur les relations entre les éléments que l'on évite toute confusion : les voies de chemin de fer se coupent rarement à angle droit, mais se raccordent par des courbes ; les lignes à haute tension ne sont détectables que lorsqu'elles traversent les forêts, dans ce cas, c'est la saignée faite à travers les arbres qui est visible...

II.- INTERPRETATION DES PHOTOGRAPHIES

Nous avons travaillé sur des agrandissements au 1/200 000 des photographies, dont l'échelle originale est 1/400 000, uniquement pour mieux voir certains détails, car la quantité d'information contenue dans l'original et dans l'agrandissement est identique. L'agrandissement permet simplement de mieux distinguer les objets.

Sur ces photographies, on peut délimiter assez facilement des zones qui présentent un certain nombre de caractères, et dans lesquelles on trouve une relative homogénéité. Cette première impression de grandes zones à caractères définis nous l'avons analysée et elle nous est apparue comme correspondant à une réalité que l'on perçoit bien au sol : le paysage. Nous avons appelé ces zones des unités de paysage.

A - DESCRIPTION DES UNITES

Etant donné que nous disposions de photographies recouvrant une bande de 200 km de long sur 27 km de large, il nous fallait trouver un mode de description homogène des différentes unités de paysage se trouvant sur les photographies. Pour cela nous avons établi un glossaire dans lequel ont été rassemblés tous les termes nécessaires à la description des unités. Le glossaire se limite aux unités existantes dans la bande étudiée. Pour étudier une autre mission ballon stratosphérique, il faudra prévoir l'adjonction de nouveaux termes.

Les termes du glossaire sont des données de diverses variables. La variable correspond au caractère, par exemple "Abondance des sols cultivés", et les données, aux variations de ce caractère. Par exemple :

- sols cultivés très peu abondants (compris entre 1 et 10 %).
- sols cultivés peu abondants (compris entre 10 et 30 %) ...

Les unités sont décrites par une succession de données, séparées par des points (pour l'identification par l'ordinateur).

Les variables utilisées pour la description des unités de paysage relèvent de diverses approches du milieu naturel : géomorphologie (4 variables avec 21 données). Réseaux hydrographiques (1 variable avec 16 données). Occupation du sol (14 variables avec 106 données). Sols (2 variables avec 8 données). Géologie-Lithologie (4 variables avec 59 données). Un exemple de fiche de description des unités de paysage est donné à la figure 21.

La bande étudiée porte sur plus de 500 000 ha. Quarante unités de paysage ont été obtenues (figure 22).

FICHE DE DESCRIPTION DES UNITES DE PAYSAGE

Photographies Ballon

MORPHOLOGIE

Complément du type

- Paysage ondulé.
- Paysage vallonné.
- Paysage de croupes.
- Paysage de crêtes.
- Paysage parsemé de dépressions.
- Paysage parsemé de collines.

Position relative

- Haute.
- Hautes.
- Grande.
- Petite.
- Petites.
- Moyennes.
- Moyenne.

Forme

- Glacis.
- Plaine alluviale.
- Terrasses.
- Vallée.
- Vallées.
- Reliefs résiduels.
- Formes karstiques.

Complément de la forme

- A fond plat.
- En V.
- En gorges.

RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Réseau hydrographique

- Réseau hydrographique arborescent.
- Réseau hydrographique arborescent sub-parallèle.
- Réseau hydrographique arborescent penné.
- Réseau hydrographique arborescent pectiné.
- Réseau hydrographique parallèle.
- Réseau hydrographique rectangulaire.
- Réseau hydrographique radial.
- Réseau hydrographique annulaire.
- Réseau hydrographique en éventail.
- Réseau hydrographique anastomosé.
- Réseau hydrographique anarchique.
- Réseau hydrographique complexe.
- Cours d'eau rectiligne.
- Cours d'eau avec quelques méandres.
- Cours d'eau avec méandres.
- Sans réseau hydrographique.

OCCUPATION DU SOL

Abondance des sols cultivés

- Sols cultivés très peu abondants. (0-10)
- Sols cultivés peu abondants. (10-30)
- Sols cultivés assez abondants. (30-60)
- Sols cultivés abondants (60-90)
- Sols cultivés très abondants (90-100)

Position de ces sols

- Sur les hauteurs.
- Sur les hauteurs et disséminés.
- Sur les pentes.
- Sur les adrets.
- Sur les ubacs.
- En fond de vallée.
- En fond de vallée et disséminés.
- Sur les bords.
- Sans position préférentielle.

Abondance des prairies

- Prairies très peu abondantes.
- Prairies peu abondantes.
- Prairies assez abondantes.
- Prairies abondantes.
- Prairies très abondantes.

Position des prairies

- Sur les hauteurs.
- Sur les hauteurs et disséminées.
- Sur les pentes.
- Sur les adrets.
- Sur les ubacs.
- En fond de vallée.
- En fond de vallée et disséminées.
- Sur les bords.
- Sans position préférentielle.

Position des pelouses ou landes

- Sur les hauteurs.
- Sur les hauteurs et disséminées.
- Sur les pentes.
- Sur les adrets.
- Sur les ubacs.
- En fond de vallée.
- En fond de vallée et disséminées.
- Sur les bords.
- Sans position préférentielle.

SOLS

Clarté des sols

- Sols non visibles.
- Sols peu visibles.
- Sols clairs.
- Sols de clarté moyenne.
- Sols sombres.

Autre clarté

- Et clairs.
- Et de clarté moyenne.
- Et sombres.

GEOLOGIE

Grand type de roche

- Roches cristallines.
- Roches métamorphiques.
- Roches sédimentaires.
- Roches meubles.
- Roches diverses.

Roche

- Avec du loess.
- Avec des alluvions récentes.
- Avec des alluvions anciennes.
- Avec de la granulite.
- Avec du granite.
- Avec des congolérats.
- Avec du calcaire.
- Avec de la dolomie.
- Avec de la craie.
- Avec de la marne.
- Avec des grès.
- Avec de la molasse.
- Avec des argiles.
- Avec de la tourbe.
- Avec du gneiss.
- Avec des micaschistes.
- Avec des filons de quartz.
- Avec du sable.

Autre roche

- Du loess.
- Des alluvions récentes.
- Des alluvions anciennes.
- De la granulite.
- Du granite.
- Des congolérats.
- Du calcaire.
- De la dolomie.
- De la craie.
- Des grès.
- De la molasse.
- Des argiles.
- De la tourbe.
- Du gneiss.
- Des micaschistes.
- Des filons de quartz.
- Du sable.

Dernière roche

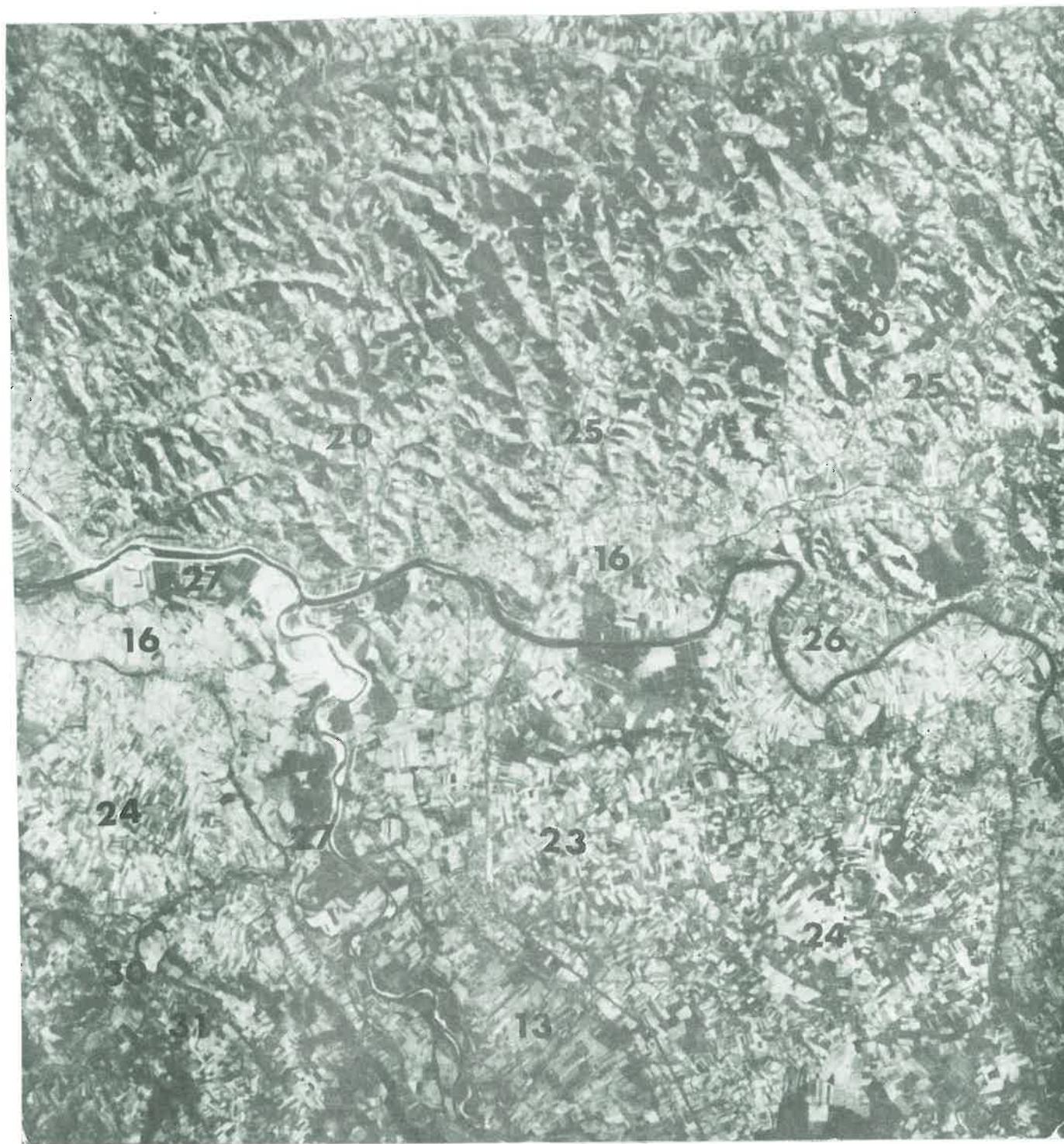
- Et du loess.
- Et des alluvions récentes.
- Et des alluvions anciennes.
- Et de la granulite.
- Et du granite.
- Et des congolérats.
- Et du calcaire.
- Et de la dolomie.
- Et de la craie.
- Et des marnes.
- Et des grès.
- Et de la molasse.
- Et des argiles.
- Et de la tourbe.
- Et du gneiss.
- Et des micaschistes.
- Et des filons de quartz.
- Et du sable.

Mission :

Photographie n° :

Unité n° :

Figure 21 - Exemple de fiche de description.



B - EXEMPLE D'INTERPRETATION d'UNE PHOTOGRAPHIE PRISE DE BALLON

Sur la photographie panchromatique n° 146 (illustration 10), nous avons distingué quatre ensembles :

- A - au Nord une zone comportant beaucoup de petites vallées et de crêtes.
- B - les zones des vallées de la Garonne et du Tarn.
- C - au Sud, des zones plus claires.
- D - au Sud-Ouest, une zone entaillée.

Dans la zone A, nous avons isolé des vallées moyennes à fond plat, occupées par des prairies et des sols cultivés de clarté moyenne (unité de paysage n° 25). L'ensemble de la zone forme un paysage de crêtes parsemé de nombreuses petites vallées en V, occupé par quelques prairies, des sols cultivés sur les adrets et des forêts sur les ubacs. Les sols sont clairs (unité de paysage n° 20).

Dans la zone B, nous avons décelé quatre unités. La vallée du Tarn, large et plate, comprend deux unité : l'une dont les sols sont de clarté moyenne (unité de paysage n° 26), l'autre dont les sols sont clairs (unité de paysage n° 16).

La vallée de la Garonne se distingue de celle du Tarn car elle est dans l'ensemble de teinte plus sombre. Dans une zone nous avons suivi facilement les anciens méandres, bordés par des feuillus, c'est une zone basse, humide avec des prairies (unité de paysage n° 27). Nous avons isolé une seconde zone, sombre, avec des parcelles cultivées, en lanières, mais sans arbres (unité de paysage n° 13).

La zone C est constituée par les terrasses, suivant le relief, nous avons décrit les basses terrasses (unité de paysage n° 23) et les moyennes terrasses (unité de paysage n° 24).

La zone D est peu différenciée sur cette photographie. Nous y avons vu deux unités de paysage. L'unité n° 31 est constituée de croupes et entoure l'unité n° 30 qui regroupe les vallées moyennes à fond plat débouchant sur la Garonne.

C - EXEMPLE DE DESCRIPTION D'UNE UNITÉ

Voici, comment, avec l'aide du glossaire, nous avons décrit une unité de paysage située sur la photographie n° 146, il s'agit de l'unité n° 20.

- Paysage de crêtes. Petites Vallées en V ;
- Réseau hydrographique arborescent pectiné ;
- Sols cultivés assez abondants. Sur les adrets. Prairies très peu abondantes.

Sans position préférentielle. Parcellaire composé de petits damiers. Parcelles ouvertes. Structure alignée. Sur les ubacs. Forêts assez abondantes. Composées de feuillus ;

- Sols de clarté moyenne. Et clairs ;
- Roches sédimentaires. Avec de la molasse. Et du calcaire.

D - DISCUSSION

L'interprétation des photographies prises à partir de ballons stratosphériques fait apparaître la réalité physique d'ensembles bien visibles : les unités de paysage. Ces photographies sont donc des documents intéressants pour des études faites à petite échelle telles que les études régionales.

D'autre part en établissant un glossaire de description des unités, nous avons limité l'aspect subjectif de toute description par un individu, en imposant un vocabulaire normalisé, utilisable pour l'ensemble de cette mission ballon. Nous avons déjà mentionné que pour une autre mission dans la même région, mais à une autre date, ou pour une mission faite dans une autre région, il faudrait procéder à des réajustements dans les données, mais vraisemblablement peu de modifications dans les variables.

Nous disposons donc avec ces photographies prises à partir de ballons, de documents de synthèse et avec le glossaire d'un vocabulaire normalisé pour les décrire.

III.- LES CARTES SYNTHÉTIQUES

Les unités de paysage sont décrites en langage naturel, et cette description est perforée sur carte, ce qui évite les erreurs de transcription fréquentes avec les langages codés. Les données sont ensuite lues par l'ordinateur, puis codées. Ce codage se fait avec un répertoire qui comporte tous les termes du glossaire avec leur équivalence codée. Une vérification est ensuite faite pour ne faire entrer en mémoire que les données conformes.

Les données entrées en mémoire sont listées. On retrouve ainsi la description de chaque unité en langage naturel. Les descriptions serviront à la rédaction des notices de carte où figurent les unités de paysage.

A - CALCUL DES DISTANCES

Nous avions décrit précédemment 40 unités de paysage. Nous avons recherché les relations existant entre les différentes unités. Pour cela, nous avons

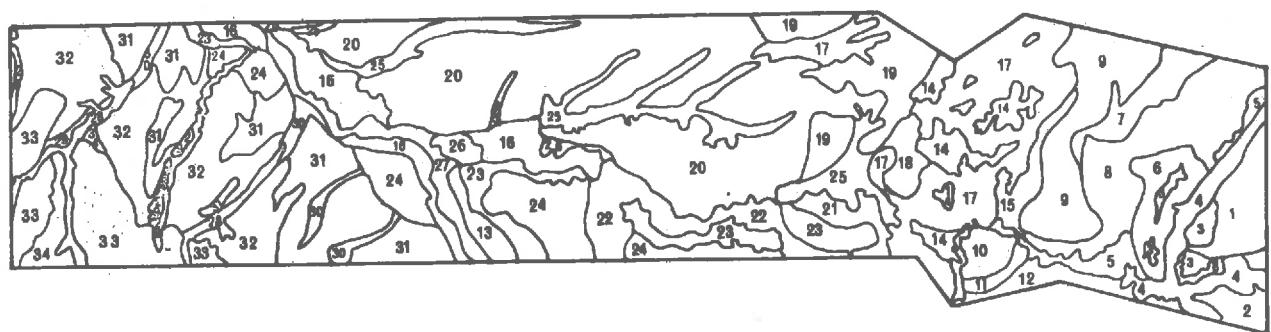


Figure 22 - Carte des unités de paysage.

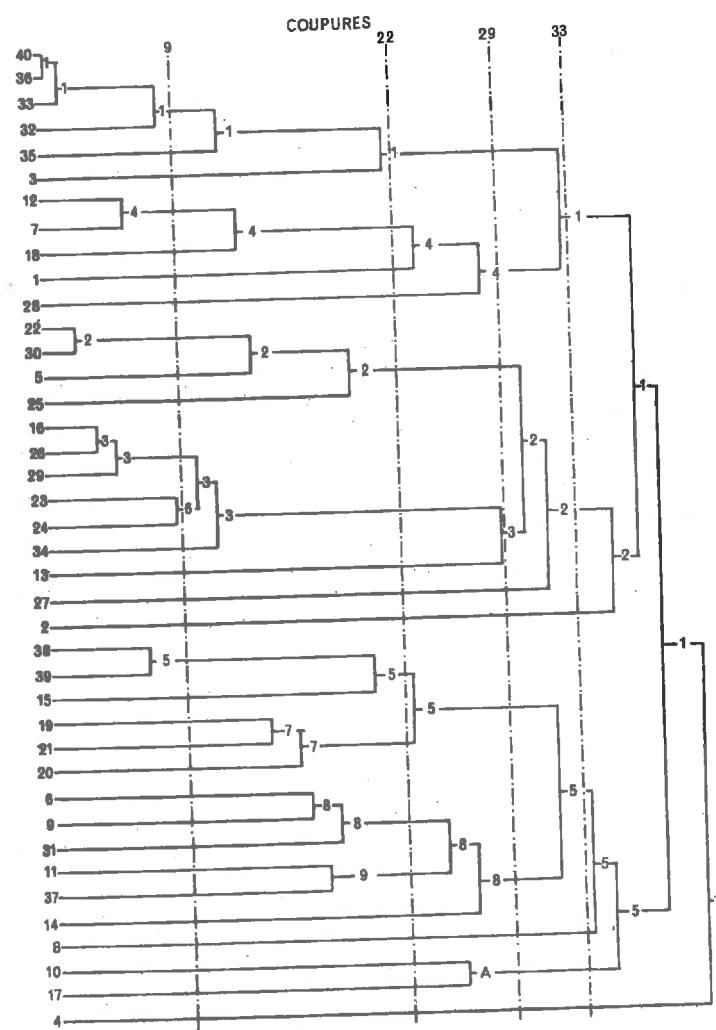
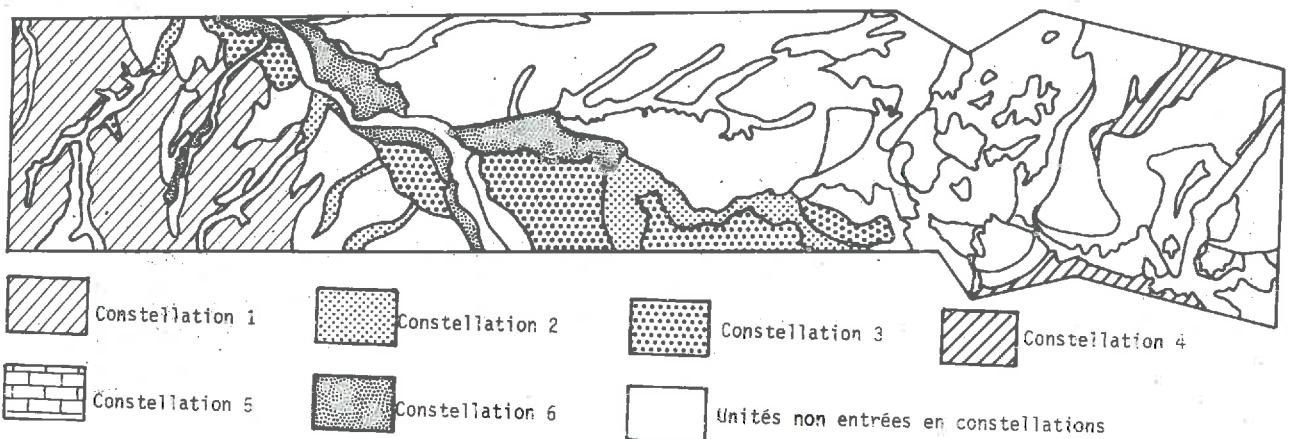


Figure 23 - Dendrogramme de regroupement des unités de paysage.

Echelle: 1/600 000

12 km

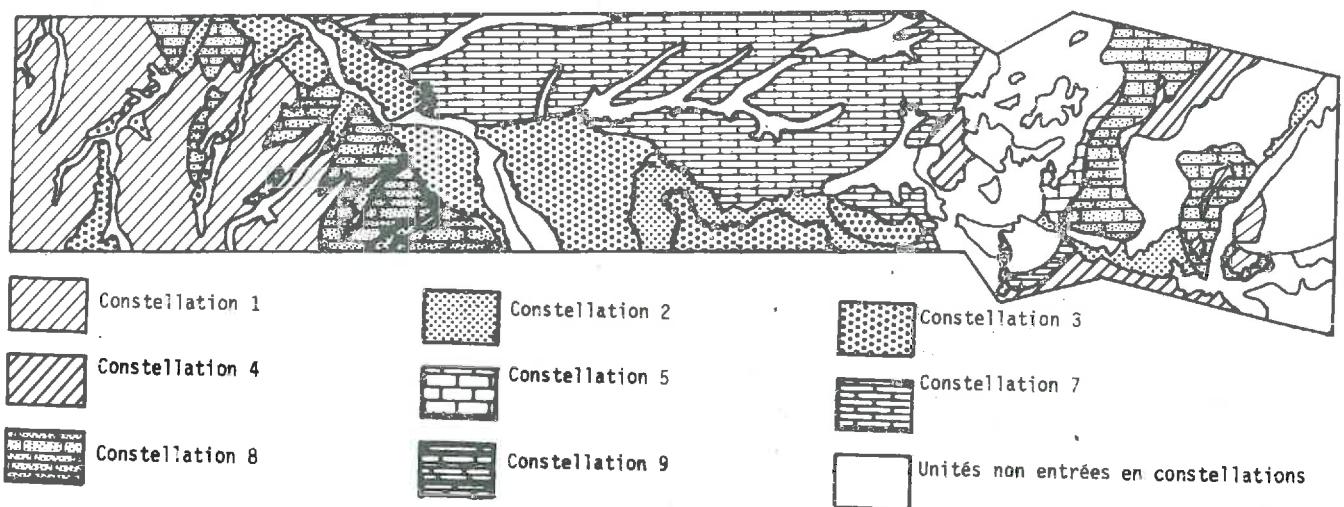
Figure 24 - Regroupement à la 9^e phase.



Echelle: 1/600 000

12 km

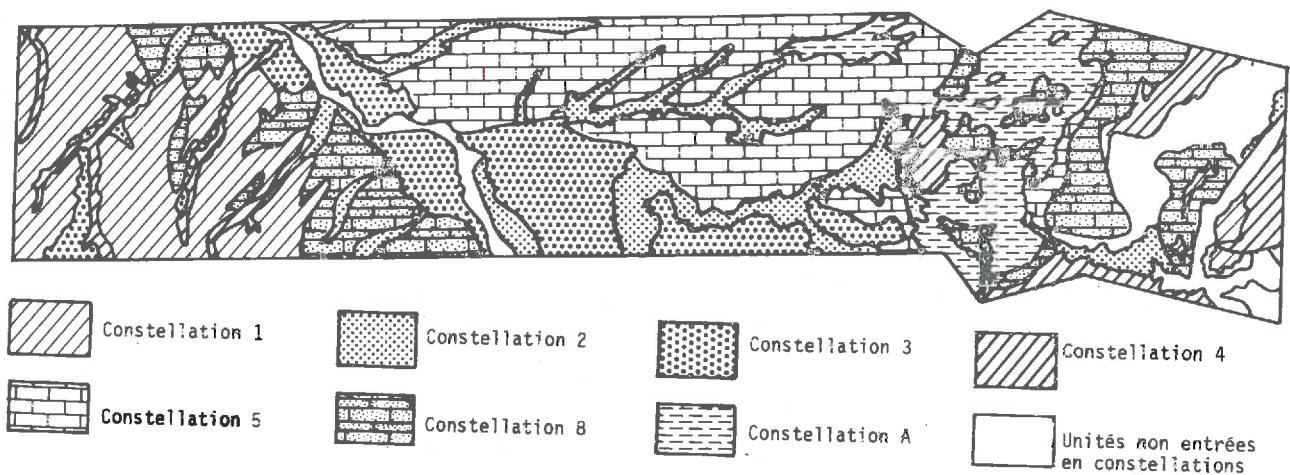
Figure 25 - Regroupement à la 22^e phase.



Echelle: 1/600 000

12km

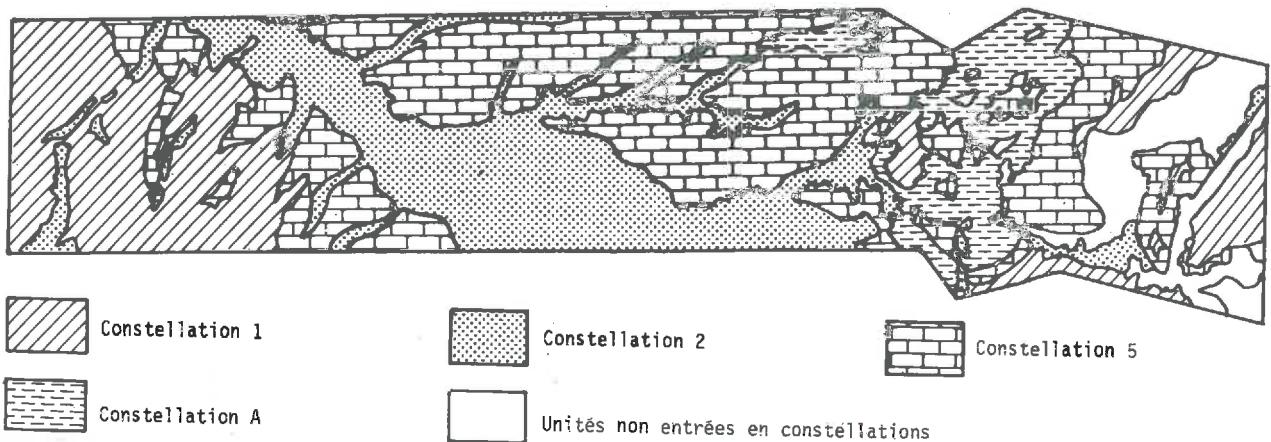
Figure 26 - Regroupement à la 29^e phase.



Echelle: 1/600 000

12 km

Figure 27 - Regroupement à la 33^e phase.



effectué un calcul de distances entre les unités. La méthode utilisée est proche de celle de Kendall et Stuart (1966). C'est une mesure de dissemblance entre groupes, indépendante de la fonction de répartition des variables.

B - TRAITEMENT DES DONNEES

Nous avions au départ 1 500 données. Les calculs de distance de rang ont été faites pour les 39 variables pour chaque couple d'unité de paysage. Nous avons eu $\frac{n(n-1)}{2}$ distances soit $(40 \times 39)/2 = 780$ distances. Cet ensemble de distances a été structuré en effectuant des regroupements d'unités, nommés constellations. Les unités de paysage séparées par les plus petites distances sont regroupées puis de proche en proche les unités avec les constellations précédentes.

Les constellations s'englobent les unes dans les autres, ou regroupent un nombre d'unités de plus en plus grand. Dans le cas étudié, toutes les unités de paysage se regroupent en une seule constellation lors de la 39ème phase (la n - 11ème).

C'est ce qu'illustre le dendrogramme de la figure 23.

C - L'INTERPRETATION DES RESULTATS. CARTOGRAPHIE

Dans le regroupement des unités en constellations, nous avons retenu quatre phases qui sont illustrées par les figures 24, 25, 26 et 27. Il s'agit des 9è, 22è, 29è, 33è phases.

En fonction des phases de regroupement, les constellations ont des surfaces plus ou moins importantes.

Suivant la précision recherchée, on peut utiliser les représentations cartographiques correspondant à telle ou telle phase. Plus la phase est d'un rang élevé, plus la carte obtenue est synthétique. C'est ainsi qu'à la 22è phase, toutes les unités de terrasses sont regroupées en une seule constellation.

IV.- LES CARTES THEMATIQUES

Nous avons dit que les unités de paysage étaient définies par des données et des variables (qualitatives, ordonnées ou non ordonnées).

Si l'on prend en compte certaines de ces variables que l'on hiérarchise, nous obtiendrons une nouvelle structuration des unités autour d'un thème donné. Le résultat cartographique correspondant sera une carte thématique. Nous avons choisi un certain nombre de thèmes pour lesquels nous avons obtenu les cartes suivantes.

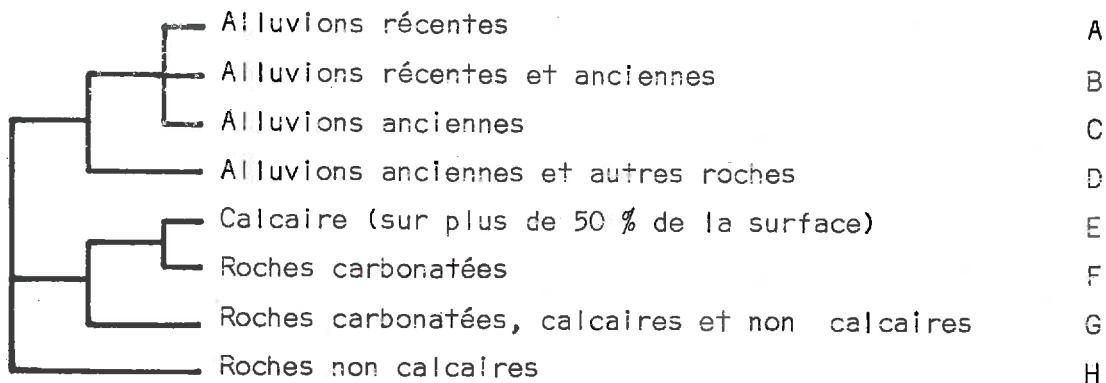
A - LA GEOLOGIE

Au cours de la description des unités (avec l'aide de la carte géologique), nous avons rencontré 14 types de roche. Nous les avons regroupés en 5 classes :

les alluvions récentes, les alluvions anciennes, les roches non calcaires, les roches carbonatées (elles contiennent des carbonates mais pas exclusivement), les calcaires.

Lors de la description des unités, nous avions la possibilité d'indiquer trois types de roches différents pour une unité. Le premier type mentionné était censé être le plus abondant. Puisque nous avons 5 classes de types de roche et 3 répétitions, il existe théoriquement 125 cas possibles. En fait, nous n'en avons rencontré que 15, dont 8 correspondant à une seule unité chacun. De ce fait, nous n'avons retenu que 8 cas regroupant chacun plusieurs unités.

Il s'agit des cas suivants :



La hiérarchie existante entre les unités correspond à un ordre pour les données de la nouvelle variable. C'est ce qu'illustre le dendrogramme situé à gauche de la légende. La carte correspondant à ce thème est donnée par la figure 28.

B - LA GEOMORPHOLOGIE

Sur la fiche de description des unités sont prévues quatre variables comportant 17 données. Les 40 unités de paysage correspondent à 21 unités différentes en ce qui concerne la géomorphologie. Là encore nous avons procédé à un regroupement des types géomorphologiques pour ne garder que 8 cas.

Figure 28 - La Géologie.

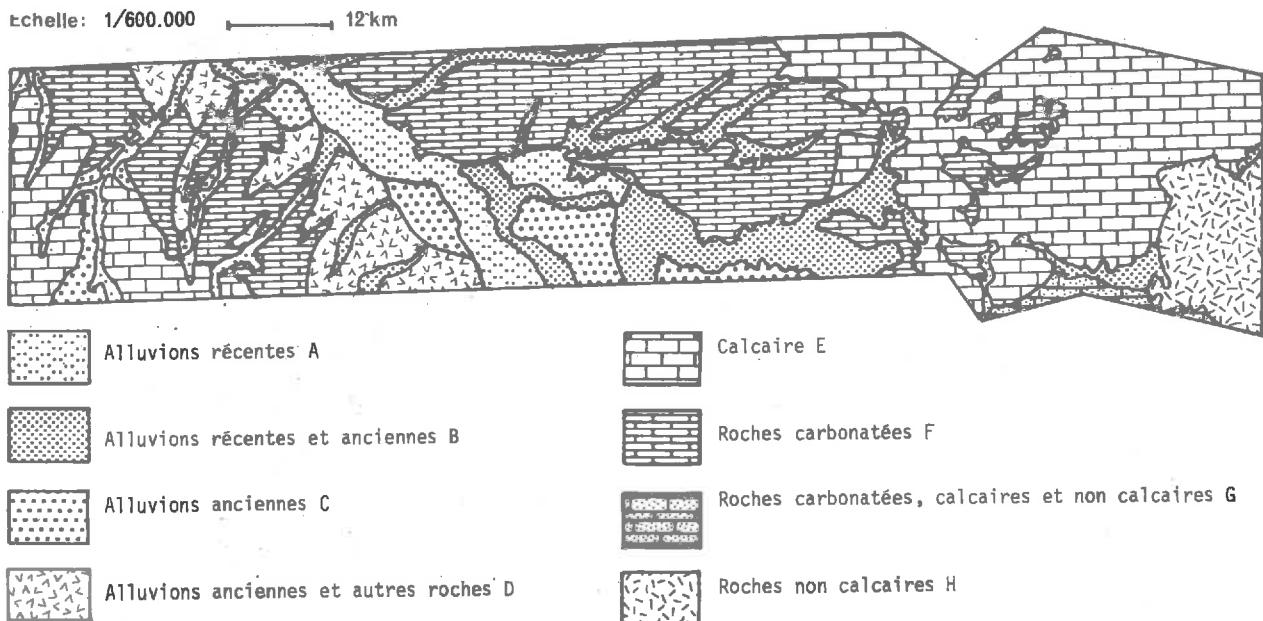


Figure 29 - La Géomorphologie.

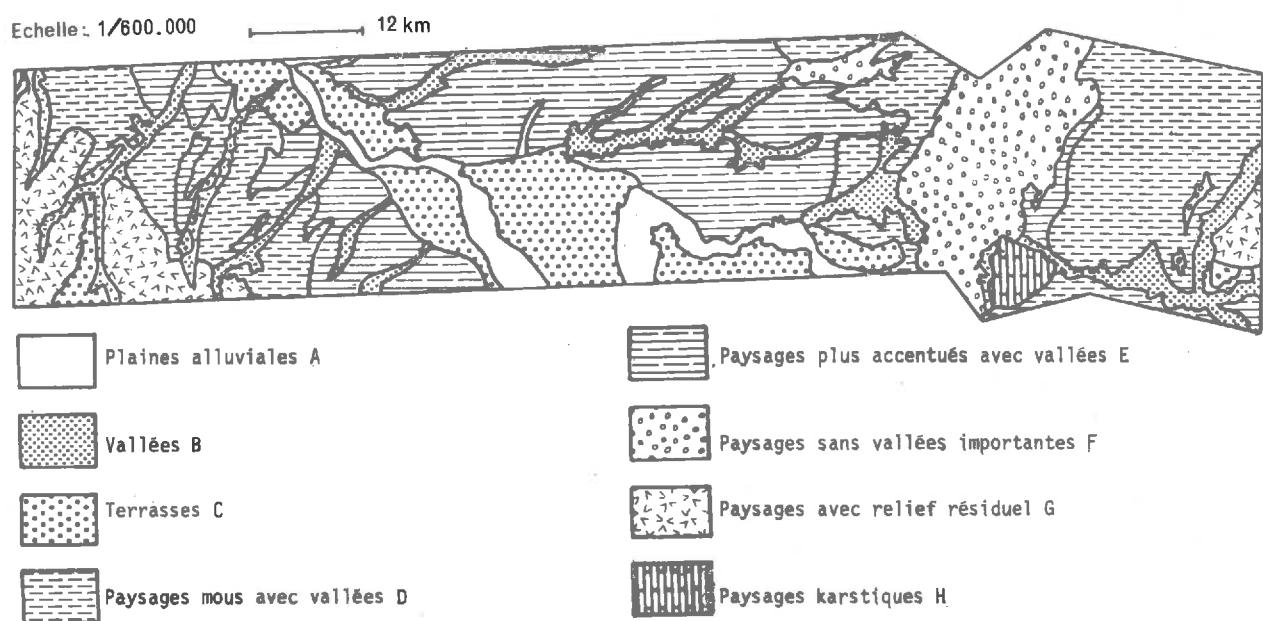
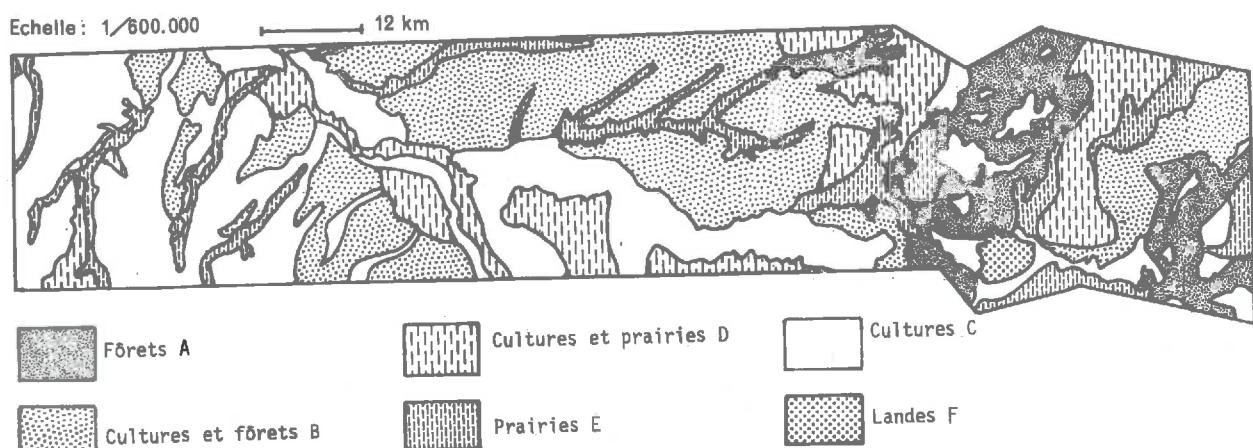
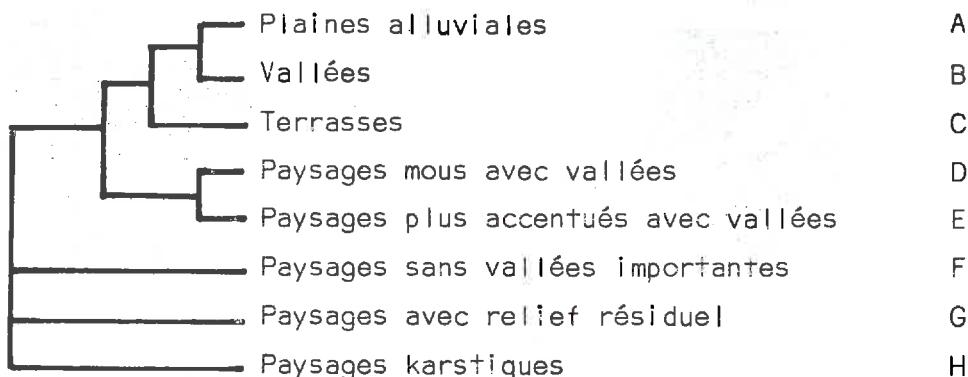


Figure 30 - L'occupation du sol.





Le dendrogramme indique la hiérarchisation de ces huit types. La figure 29 illustre leur représentation cartographique.

C - L'OCCUPATION DU SOL

Nous disposions dans la fiche de description de 9 variables, mais nous n'avons considéré que les quatre variables correspondant aux abondances des sols cultivés, prairies, forêts et landes. A chaque variable correspondaient 5 données qui étaient des pourcentages d'occupation du sol. Nous avons retenu 6 cas parmi les plus fréquents, en fonction des critères suivants :

Landes + de 60 % du territoire recouvert par la lande

Forêts + de 60 % du territoire recouvert par la forêt.

Cultures et Forêts. Les forêts occupent entre 30 et 60 % de la surface, les cultures étant plus abondantes que les prairies.

Pour les autres cas, la forêt recouvre moins de 30 % de la surface.

Nous avons appelé Cultures quand la surface est occupée au moins par 30 % de cultures s'il n'y a pas de prairies, et au moins par 60 % de cultures pour un maximum de 30 % de prairies.

Pour la prairie, les proportions sont inversées.

Pour le cas : cultures et prairies, il n'y a pas plus de 30 % de différence entre les surfaces couvertes par les cultures et les prairies.



Le dendrogramme montre la hiérarchie existante entre ces 6 types d'occupation du sol. La figure 30 donne la carte correspondante.

D - DISCUSSION

Les trois exemples précédents montrent qu'une fois réalisée la fiche de description pour chaque unité, l'information qui se trouve dans chaque fiche peut être reprise et arrangée de diverses façons par l'interprète. Celui-ci sélectionnera pour un thème donné certaines variables et données qui lui semblent particulièrement intéressantes. L'ordinateur réalisera ensuite un classement automatique suivant les critères donnés par l'interprète. Certains regroupements seront ainsi effectués. La traduction cartographique se fera aisément en prenant les unités nouvellement définies par l'ordinateur et en traçant leur contour.

Les cartes obtenues seront véritablement des cartes thématiques et non des cartes monofactorielles, car elles résultent d'un travail d'interprétation, réalisé par l'Homme au moment du choix des variables et des données qui seront représentées.

Nous disposons ici d'une méthode intéressante pour obtenir sur une zone donnée, divers types de cartes thématiques. En effet, le choix est laissé à l'interprète considéré comme le meilleur juge possible des critères à retenir. L'ordinateur intervient en apportant sa rapidité de traitement de l'information.

V.- COMPARAISON DES UNITES DE PAYSAGE ET DES PETITES REGIONS AGRICOLES

Nous avons vu comment les unités de paysage apparaissaient très nettement sur les photographies prises à partir de ballons. Nous avons pu vérifier sur le terrain que ces unités avaient une réalité physique. Mais nous pouvons nous interroger sur la validité du mode de description choisi, et donc des limites obtenues avec ce mode de description.

Pour cela, nous avons fait une comparaison entre les limites des unités de paysage et celles des petites régions agricoles définies par l'INSEE.

A - LES PETITES REGIONS AGRICOLES

Sur la zone étudiée, nous trouvons 15 fragments de petites régions agricoles. Leur superficie moyenne est de 30 000 ha. 9 ont des superficies comprises entre 23 000 et 90 000 ha, les 6 autres ont des surfaces restreintes (de 3000 à 12 000 ha).

Les petites régions agricoles ont des limites qui sont fonction de limites administratives : celles des communes, car elles ont été définies pour des raisons historiques et administratives plus que géographiques. Il apparaît donc que les limites des petites régions agricoles ne pourront pas épouser exactement des limites géographiques. Dans certains cas, elles vont même les recouper. Par exemple, quand les cours des petites rivières traversent plusieurs communes, ces rivières et leur vallée vont appartenir à plusieurs petites régions agricoles.

B - LES UNITES DE PAYSAGE

Comme les petites régions agricoles, leurs surfaces sont de dimensions très variables. Nous avons regroupé les unités de paysage de la façon suivante :

- 20 unités de paysage dont la superficie varie de 500 à 7 000 ha. La médiane est de 3 500 ha.
- 14 unités de paysage dont la superficie varie de 9 000 à 18 000 ha. La médiane est de 13 000 ha.
- 6 unités de paysage dont la superficie varie de 23 000 à 65 000 ha. La médiane est de 30 000 ha.

Ces différences de surface des unités tiennent à leur nature. Par exemple certaines unités comme l'unité n° 20 sont constituées d'éléments très différents : petites vallées, têtes de talweg, pentes, colluvions et affleurements, prairies, cultures, forêts. Les zones différentes sont si petites qu'il est vain de vouloir les cartographier. Nous les avons alors regroupées en une unité assez vaste.

Dans d'autres cas, les zones homogènes sont assez grandes pour être cartographiées. L'unité de paysage en résultant sera souvent de surface plus petite que dans le cas précédent.

Mais quelle que soit leur superficie, les unités de paysage sont définies à partir de critères physiographiques.

C - COMPARAISON DES PETITES RÉGIONS AGRICOLES ET DES UNITES DE PAYSAGE

Nous avons voulu d'abord savoir de quelles unités de paysage étaient formées les petites régions agricoles. Nous avons établi le nombre (Y) de petites régions agricoles sur lesquelles s'étendaient x unités de paysage (tableau)

x	1	2	3	4	5	6	8
y	5	14	12	5	2	1	1

Tableau 11 - Nombre d'unités de paysage, contenues dans les petites régions agricoles.

Dans la plupart des cas, les unités de paysage s'étendent sur deux ou trois petites régions agricoles. Si nous ne tenons compte que des unités de paysage recouvrant plus de 3 000 ha d'une petite région agricole, le tableau devient :

x	1	2	3
y	21	7	4

Tableau 12 - Correspondance : unités de paysage, petites régions agricoles.

Si nous établissons la même correspondance entre les petites régions agricoles et les unités de paysage, nous voyons que les petites régions agricoles sont composées de 6 à 9 morceaux d'unités de paysage. On peut simplifier en ne

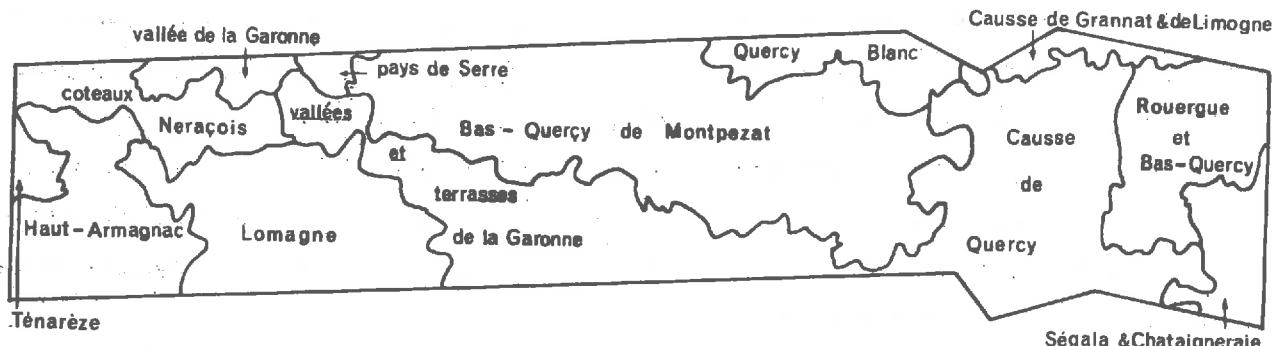


Figure 31 - Carte des petites régions agricoles.

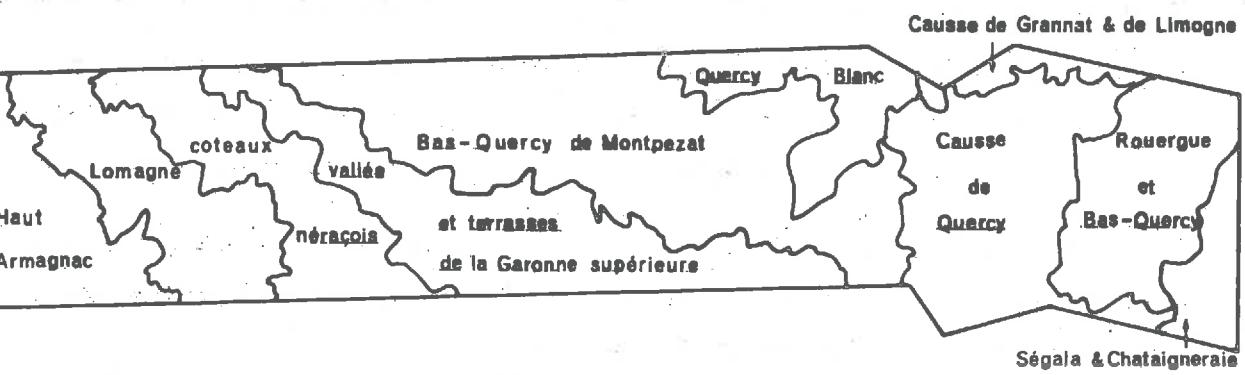


Figure 32 - Nouvelle délimitation des petites régions agricoles.

tenant compte que des intersections correspondant à des surfaces supérieures à 10 % de la surface de la petite région agricole considérée. Alors, sur 15 petites régions agricoles, 10 sont composées de 2 ou 3 unités de paysage.

La figure 31 représente les petites régions agricoles situées dans la zone photographiée à partir du ballon. Les limites de ces petites régions ont l'air de correspondre dans certains cas à des limites d'unités de paysage et dans d'autres non. Prenons quelques exemples :

- la petite région agricole Ségala et Châtaigneraie est composée de quatre unités de paysage (n°s 1. 2. 3. 4.). Ces quatre unités de paysage sont très différentes puisqu'elles ne se regroupent qu'à la 39ème phase. La petite région agricole est contrastée, mais les unités de paysage qui la composent n'appartiennent qu'à elle ou presque.
- la petite région agricole Bas-Quercy de Montpezat n'est composée que de deux unités de paysage (n°s 20. 25) qui n'appartiennent qu'à elle. C'est donc une petite région agricole assez homogène. Comme les unités de paysage 20 et 25 ne se regroupent qu'à la 38ème phase, cette région est très contrastée.
- l'unité de paysage n° 28 correspond à des vallées peu larges, elle appartient à 9 petites régions agricoles qui recoupent ces vallées. Nous ne pouvons pas affecter l'unité 28 à l'une des 9 petites régions agricoles, cette affectation serait arbitraire. Nous ne pouvons pas non plus constituer une petite région agricole sur la base de cette unité, car elle serait géographiquement disséminée.
- l'unité de paysage n° 9 fait partie de 3 petites régions agricoles. Mais nous ne pouvons faire coïncider ses limites avec celles d'une des petites régions agricoles, car celles-ci sont délimitées par les frontières communales.

Il n'y a pas de relations entre la réalité géographique et la réalité administrative, mais nous avons vu qu'il y avait des similitudes entre les petites régions agricoles et les unités de paysage.

C'est pour cela que nous présentons à la figure 32 une nouvelle délimitation des petites régions agricoles, sur des bases géographiques qui tiennent mieux compte de l'utilisation du milieu.

VI.- CONCLUSION

Cette comparaison des petites régions agricoles et des unités de paysage montre que nous avons pu obtenir à partir des photographies prises de ballon stratosphérique une différenciation plus poussée des éléments de paysage qu'il ne peut l'être avec les petites régions agricoles.

D'autre part avec le glossaire et la fiche de description, nous avons mis au point un mode de description des photographies, assez objectif et qui peut être facilement étendu à d'autres régions et à d'autres missions photographiques.

Enfin, avec le mode de traitement automatique et le groupement en constellations, nous avons un moyen rapide d'établir des cartes de synthèse plus ou moins poussée ou d'établir des cartes thématiques. La part de travail dévolue à l'interprète est le choix des variables ainsi que leur hiérarchisation.

Les photographies prises à partir de ballon correspondent bien à un besoin en Agronomie : la restauration ou le développement d'une région facilité par l'établissement rapide et à des coûts peu élevés de cartes de base sur un grand territoire.

CONCLUSIONS GENERALES

Nous avons présenté au cours de cette étude différents appareils de télédétection dont nous avons montré quelques utilisations en Agronomie. Nous avons présenté des remarques concernant divers points.

Certaines sont d'ordre technique et concernent directement les caractéristiques des appareils. Nous en parlerons peu ici, car si elles présentent de l'intérêt, elles ne peuvent vraiment être discutées qu'avec les constructeurs ou les personnes responsables de la maintenance de ces appareils.

D'autres remarques concernent directement l'utilisation de la télédétection en Agronomie, nous les présenterons et étudierons les orientations à prendre dans l'avenir.

Enfin, d'autres remarques sont d'ordre méthodologique et intéressent tous les domaines d'application de la Télédétection.

Nous présenterons ces observations selon les domaines d'utilisation, c'est-à-dire surtout selon les échelles et la résolution géométrique au sol des documents.

Pour de grandes échelles, c'est-à-dire à un niveau de perception de l'ordre de l'individu ou du groupe d'individus, dans le cadre d'utilisations en Physiologie, Biologie Végétale, Botanique, Science du Sol..., nous avons obtenu des résultats satisfaisants avec la spectroradiométrie sur le terrain, et l'enregistrement multispectral à faible altitude.

En recueillant l'information pour de fines bandes spectrales, nous avons pu mettre en évidence des valeurs de recouvrement du sol par la végétation. En dessous de 15 % de recouvrement du sol par un végétal, une surface est perçue comme un sol. Au-dessus de 40 % de recouvrement, la surface a un comportement spectral semblable à celui du végétal.

D'autre part, nous avons eu l'occasion de vérifier en altitude l'influence de la structure interne du feuillage sur son comportement spectral dans le proche infra-rouge, ainsi que l'influence des pigments et de la chlorophylle dans le visible. Jusqu'à présent, ces influences n'avaient été étudiées qu'en laboratoire.

La comparaison des enregistrements multispectraux au sol et en altitude nous ont montré la nécessité de tenir compte du port des végétaux ainsi que de la structure du champ pour comprendre le comportement spectral d'un champ cultivé.

- Toujours à de grandes échelles, mais avec des photographies en fausse couleur, nous avons obtenu des renseignements concernant des parcelles, ou des groupes de parcelles cultivées, conduisant donc à des applications en Agronomie, et parfois en Phytopathologie.

Nous avons pu identifier des objets et interpréter des phénomènes sur ces photographies, puisqu'elles ont un pouvoir de résolution élevé et ne présentent pas de grosses déformations du paysage.

Ainsi, sur des photographies fausse-couleur, nous avons pu identifier des espèces et des variétés cultivées, étudier l'influence de diverses fumures azotées, ainsi que de certains traitements chimiques. Nous avons pu aussi apprécier des phénomènes liés au plus ou moins grand développement foliaire des végétaux, tels que des différences d'âge dans des prairies temporaires.

Par contre, nous avons vu qu'un traitement automatique de l'information contenue dans ces photographies n'était pas envisageable car il était trop long et trop coûteux.

L'interprétation d'une photographie se fait par un être humain, l'interprète, qui étudie les valeurs (densités optiques et couleurs) des différents points de la photographie (la texture), ainsi que les relations existantes entre ces différents points (la structure).

- A moyenne échelle, avec des appareils de télédétection non photographiques, nous avons pu appréhender des phénomènes intervenant sur plusieurs groupes de parcelles cultivées. Les applications concernaient la Microclimatologie, ainsi que l'Agronomie dans le cadre d'une cartographie automatique.

Dans l'infra-rouge moyen avec le Cyclope, nous avons pu détecter des zones gélives. Dans l'infra-rouge thermique, grâce à l'enregistrement des données sous une forme numérique et surtout, dans l'expérimentation en cause, grâce à une bonne correspondance entre la température apparente des objets et leur nature, nous avons pu réaliser des cartes automatiques.

- Enfin, à petite échelle, sur des photographies correspondant à un niveau de perception de l'ordre du paysage, nous avons étudié des applications concernant l'Agronomie (cartographie régionale) et la Géographie humaine et physique.

La mise au point d'un mode de description nous a permis de dégager une méthode d'étude de ce type de document. D'autre part, le traitement automatique a montré que l'on pouvait trier l'information selon divers thèmes et extraire ainsi le maximum de renseignements à partir de ces photographies, pour une région donnée.

Ces applications montrent combien la télédétection peut être utile à un Agronome en lui permettant une approche des cultures au niveau de l'individu végétal, de la parcelle cultivée, d'un groupe de parcelles, ou même d'un paysage. Elles montrent aussi que la Télédétection apporte beaucoup d'informations concernant des spécialités très diverses. Une équipe pluridisciplinaire, intégrée, pourra mieux utiliser ces techniques qu'un individu isolé n'ayant qu'une spécialisation.

Cela explique que les recherches futures devront associer de plus en plus : Physiciens, Physiologistes, Botanistes, Pédologues, Agronomes, Géographes, Ecologistes végétaux, pour permettre une meilleure compréhension des phénomènes aux différents niveaux de perception et pour assurer le passage de l'information d'un niveau de perception à un autre.

Nous espérons que ces travaux préliminaires auront montré toute l'aide que la Télédétection pouvait apporter en Agronomie, et qu'ils susciteront d'autres travaux dans ce sens.

BIBLIOGRAPHIE

- ALOUGES A. (1973) - Rappel des bases de Physique. *Ecole d'Eté C.N.E.S. TARBES.*
- ANDRONIKOV V.L. (1958) - The spectral reflectance of some soil types of the forest steppe. *Izvestija Akad. Nauk S.S.R., Ser. Geogr.*, 3 : 93-97.
- ANSON A. (1970) - Emploi de la photographie aérienne en couleur pour l'identification des sols et des roches. *Photogrammetric Engng. Vol. XXXVI, n° 4. The Am. Soc. of Photogrammetry, Falls Church.*
- BASTUSCHECK C.P. (1970) - Température du sol et infra-rouge thermique. *Photog. Engng., Vol. XXXVI, n° 10. The Am. Soc. of Photogrammetry.*
- BAUMGARDNER M.F. ; KRISTOF S. ; JOHANNSEN C.J. ; ZACHARY A. (1969) - Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. *LARS Information note 030570 Purdue University.*
- BIALOUSZ S. ; PRZEWOSKA ; KOZIEJ (1968) - Wpływ zawartości prochnicy i bawy gleby na wydzielenie konturów gleb na zdjęciach lotniczych. *Ecole Polytechnique, Varsovie.*
- BIALOUSZ S. ; MIROSZ ; SIMLA (1968) - Ocena stosunków wodnych gleb na podstawie zdjęć lotniczych. *Ecole Polytechnique, Varsovie.*
- BOISSARD P. (1973) - Recherche d'une aide automatique à l'interprétation des images aériennes. Application à l'étude de la végétation. *Thèse 3ème cycle, Orléans.*
- BOULAIN J. (1971) - Cours de Pédologie générale. *Doc. ronéoté. 281 p. Grignon.*
- CHEREL R. (1973) - Possibilité de différenciation spectrale de quelques cultures. *DEA d'Ecologie. Service de Télédétection. Grignon.*
- CHEVALLIER R. (1965) - Photographie aérienne. *Panorama intertechnique. Gauthier-Villars. Paris.*
- CHEVALLIER R. (1966) - Problématique de la photo-interprétation. A la recherche d'une logique. *Actes IIe Symposium. Paris.*
- CHEVALLIER R. (1971) - La photographie aérienne. *227 p. Collection V 2. N° 137. Colin. Paris.*
- CHOPLIN G. (1973) - Possibilité de différenciation spectrale des cultures à l'aide d'un spectroradiomètre. *Service de Télédétection, Grignon.*
- CHTCHERBAKOV A. (1974) - Investigations dans la biosphère. *in l'Union Soviétique, n°5.*
- COMMITTEE ON REMOTE SENSING FOR AGRICULTURAL PURPOSES (1970) - Remote sensing with a special reference to agriculture and forestry. *National Academy of Sciences. Washington. DC.*
- CONDIT H.R. (1970) - The spectral reflectance of American soils. *Phot. Engng.*
- CRANE R.B. and RICHARDSON W. (1972) - Performance Evaluation of Multispectral scanner Classification Methods. *(8th Intern. Symposium on remote sensing of environment. University of Michigan).*
- EGBERT D.D. ; ULABY F.T. (1972) - Effect of angles on reflectivity. *Phot. engineering June 1972. XXXVIII n° 6. pp. 556-564.*

- FITZGERALD E. (1972) - MSS. Spectral properties of materials. *Plessey. ESTEC.* 1973/72 EL. Dec.
- FLOYD F.S. Jr. * (1973) - Flight planning for thermal IR. *Photog. engng. XXXIX.* Jan. n° 1. pp. 49-58.
- GAUSMAN H.W. ; CARDENAS R. ; GERBERMANN A.H. (1973) - Plant size, leaf structure, spectral, and chlorophyll content of normal and chlorotic sorghum plants and correlations with density reading from aerial, infrared color, positive film transparancies. *Proc. Am. Soc. of Photogrammetry. Mar. 11-16. Washington DC.*
- GEIGER R. (1965) - The climate near the ground. *Revised Edition. Harvard University Press. Cambridge. Massachusetts.*
- GERBERMANN A.H. ; GAUSMAN H.W. ; WIEGAND C.L. (1971) - Color and color IR films for soil identification. *Photog. Engng. Vol. XXXVII. n° 4, Avril, pp. 359-364.*
- GIRARD C-M. (1971) - Contribution de la photographie aérienne à la compréhension de l'écologie agricole. *C.R. Acad. Agric. Séance du 12 mai. Paris.*
- GIRARD C-M. (1971) - Ecologie agricole et photographie aérienne. *C.R. du C.N.E. Octobre. pp. 149-159. 1 photographie. Paris.*
- GIRARD C-M. (1972) - Intérêt comparé de trois émulsions en agronomie. *Revue photo-interprétation. n° 3. pp. 15-23. Technip. Paris.*
- GIRARD C-M. (1972) - Inventaire agricole à partir de photographies ektachrome infra-rouge. N° 3. pp. 24-32. *Technip. Paris.*
- GIRARD C-M. (1972) - Photographies aériennes et Ecologie Agricole. *Congrès Int. de Photogrammétrie. Ottawa. Publié dans le Bull. de la Sté Franç. de Photogrammétrie. n° 48. Paris.*
- GIRARD C-M. (1974) - Utilisation de la thermographie en Agronomie. *Communication orale au 1er Congrès Européen de Thermographie. 17-20 juin. Amsterdam.*
- GIRARD C-M. et GIRARD M-C. (1973) - Interprétation des photographies-ballon. Comparaison avec les petites régions agricoles. *Soc. Franç. Photogramm. n° 52. Oct. pp. 23-36. St Mandé.*
- GIRARD-GANNEAU C-M. et GIRARD M-C. (1974) - Photographs from balloons : their use in agronomy and management of environment. *9e International Symposium of Remote sensing of environment. April. Ann. Arbor. Michigan.*
- GIRARD C-M. et GIRARD M-C. (1975) - Application de la télédétection à l'étude de la biosphère. *Masson. Paris.*
- GIRARD M-C. et GIRARD C-M. (1973) - Interprétation des façons culturales en agronomie. *Revue Photo-interprétation.*
- GIRARD M-C. (1970) - Interprétation de quelques facteurs pédologiques à partir des photographies aériennes, en relation avec différentes saisons et différentes émulsions. *S.I.P. C.R. Symp. de Dresde. pp. 925-946 photographies.*
- GIRARD M-C. (1971) - Etude des sols et des façons culturales sur les parcelles expérimentales de Grignon. *C.N.E.S. Oct. pp. 175-189. 4 photographies. Paris.*
- GIRARD M-C. (1973) - Pédologie et Télédétection. *Cours de l'Ecole d'Eté du CNES à Tarbes. C.N.E.S. Paris.*
- GIRARD M-C. (1974) - Traitement informatique des unités de paysage détectées par photographies-ballon. *Edition spéciale du service de statistique de la Pologne. Varsovie.*

- GIRARD M-C. et GIRARD-GANNEAU C-M. (1974) - Les photographies prises à haute altitude. Leur interprétation. Un exemple : les photographies-ballons. *Revue photo-interprétation. n° 1. Technip. Paris.*
- GOILLOT Ch. (1971) - Programme I.N.R.A. de télédétection dans le cadre des opérations "Ressources Terrestres" du C.N.E.S. pp. 42-44. *Coordination de la publication des journées d'études des 26-27 oct. C.N.R.S. Paris.*
in La Télédétection des Ressources Naturelles. pp. 45-94. *C.N.E.S. Paris. 422 p.*
- GOILLOT Ch. (1973) - Recherches traditionnelles et Télédétection à l'Institut National de la Recherches Agronomique. *La Recherche Spatiale. CNES Dunod. 12, n° 5, 21-24 + IV.*
- GOILLOT Ch. (1974) - Airborne Thermography or Infrared Remote Sensing. *Bibliotheca Radiologica, 6, 1st European Congress on Thermography, Amsterdam june 17-20. Karger Bâle. Sous presse.*
- GOILLOT Ch. (1974) - En coll.: La Thermographie et ses applications. *La Recherche, Paris. en cours.*
- GOILLOT Ch. (1975) - Préparation par thermographie aéroportée d'une étude ultérieure par satellite du bilan thermique régional en fonction des structures agronomiques au sol - Applications à l'évolution des conséquences du remembrement sur l'économie rurale. *Communication proposée au W.G. VI (On Applications of space research to meteorology and earth surveys) de la deuxième Assemblée plénière du COSPAR. Varna (Bulgarie). 29.05-7.06.*
- GUY (1969) - La détection à distance : progrès récents de la photogéologie. *Ann. des Mines. Paris.*
- GUY (1973) - Méthodologie de l'exploitation. *Ecole d'Eté. CNES. Tarbes.*
- HIGHAM A.D. ; WILKINSON B. ; KAHN D. (1972) - MSS. Basic Physics and technology. *Plessey. ESTEC 1673/72 EL. Dec.*
- HIGHAM A.D. ; WILKINSON B. ; KAHN D. (1973) - Multispectral scanning systems and their potential application to earth resources surveys. *Basic Physics and technology. ESRO. CR. 231. Déc.*
- HOFFER R.M. and JOHANNSEN C.J. (1969) - Ecological potentials in spectral signature Analysis. (Remote sensing in Ecology). *Univ. of Georgia Press. Athènes.*
- HOFFER R.M. ; ANUTA P.E. ; PHILLIPS T.L. (1972) - ADP. Multiband and multiemulsion digitized photos. *Photog. eng. XXXVIII n° 10. pp. 989-1001. Oct.*
- ISAMBERT M. et HOREMANS P. (1971) - Cartographie pédologique de la France et expériences Ressources Terrestres. *C.N.E.S. Oct. pp. 45-71. Paris.*
- JUNG E. ; REIFF B. (1971) - Experiment for explaining the chlorophyll effect in an color photography. *Arch. Acker u. Pflanzenbau w. Bodenkd. Vol. 15, n° 12, pp. 1063-1066.*
- KRISTOF S.J. (1971) - Preliminary multispectral studies of soils. *Journal of soil and Water Conservation. Jan. Feb. Vol. 26, n° 1.*
- LABORATORY FOR AGRICULTURAL REMOTE SENSING (LARS) :
- Research Bulletin 844 (1968).
- Research Bulletin 873 (1970).
- Effects of organic matter on the multispectral properties of soils (1969).
- LAVER Donald T. (1971) - Multiband Photography for forestry purposes. (Application of Remote Sensors in forestry). *International Union of Forest Research Organizations. Section 25.*

- LEMEE G. (1967) - Précis de Biogéographie. Masson. Paris.
- NALEPKA R.F. and MORGENSTERN J.P. (1972) - Signature Extension Technique applied to Multispectral scanner data. (Remote Sensing of Environment).
- OLSON C.E. (1967) - Accuracy of land-use interpretation from infra-red imagery in the 4.5. to 5.5 micron Band. *Ann. of the Assoc. of American Geographers*. Vol. 57. n° 2. June. pp. 382-388.
- OLSON C.E. (1970) - Multispectral remote sensing. *Sept. Dresde*.
- OLSON C.E. (1971) - Collection and processing of multispectral imagery. Applications of remote sensors in forestry. *IUFRO Section 25. Janvier*. pp. 7-20.
- OLSON C.E. ; GOOD J.R. ; GOOD R.E. (1962) - Seasonal changes in light reflectance from forest vegetation. *Photog. Engng.* Vol. 28. n° 1.
- PERRIER A. ; CHARTIER P. (1971) - Surveillance des zones de grande culture par télé-détection. *C.N.E.S. Journées d'Etudes*. 26-27 Oct. pp. 71-85. Paris.
- RANZ E. SCHEIDERS (1971) - Possibilités offertes à la photo-interprétation par le fil à équidensité Agfa-contour. *Bull. Soc. Franç. de Photogramm.* n° 44 pp. 27-40. St Mandé.
- REY P. (1971) - Télédétection des paysages végétaux. *C.R. du C.N.E.S. Oct.* pp. 140-145.
- RHODE W.G. ; OLSON C.E. (1971) - Estimating leaf moisture content from infrared reflectance data. IIIrd biennal workshop. Color aerial photography in the plant sciences and related fields. *Am. Soc. Of photog.*
- RHODE W.G. ; OLSON C.E. (1972) - Multispectral sensing of forest tree species. *Photog Engng.* pp. 1209-1215. XXXVIII. n° 12.
- ROBERTS E.H. (1973) - Field measurement of the spectral reflectance of natural features. *Am. Soc. of Photog. March 11-16. Washington DC.*
- ROSSETTI Ch. ; KOWALISKI P. ; HAVE N. (1966) - Relations entre les caractéristiques de réflexion spectrale de quelques espèces végétales et leurs images sur des photographies en couleur, terrestres et aériennes. *Actes d IIe Symposium. Paris.*
- STEINER D. (1966) - Investigations of seasonality as a factor affecting the photo interpretation of rural land use. *Actes du IIe Symposium. Paris.*
- TESSIER R. et ALOUGES A. (1969) - Principes généraux de détection à distance. *Séminaire sur le principe de la détection à distance et l'application à l'étude des ressources terrestres. Paris.*
- VAN WIJK W.R. (1966) - Physics of plant environment. North Holland Publishing Co 2e ed.
- X... (1969) - Principes de la télédétection à distance et application à l'étude des ressources terrestres. 4-6 Nov. C.N.E.S. Paris.
- X... (1969) - Remote sensing in Ecology. Ed. P.L. JOHNSON. University of Georgia Press. Athens. U.S.A.
- YOST E. ; WENDEROTH S. ; ANDERSON R. (1971) - Multispectral remote sensing of agriculture and forestry test sites. IIIrd biennal workshop. Color Aerial Photography in the Plant science and related fields. *Am. Soc. Photog. March.* pp. 79-96.

- * GATES D.M. (1965) - Energy, plants and ecology. *Ecology*. vol. 46. nos 1-2.
Winter.
- GATES D.M. ; JANKE R. (1966) - The energy environment of the alpine tundra.
Oecol. Plant. n° 1. + 1. pp. 39-62.
- GAUSMAN H.W. (1974) - Leaf reflectance of near-infrared. *Photog. engng.* XI.
February n° 2. pp. 183-191.