MICROFICHE N° 00230

République Tunisienne

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

CENTRE NATIONAL DE

DOCUMENTATION AGRICOLE

TUNIS

الجمهورية التونسية

وزارة الفلاحة

المركز القومي

للتوثيق الفلاحي

تونس

F 1

SEMINAIRE DE SENSIBILISATION

LA TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

Globale N° 00230

République tunisienne
Ministère de l'Agriculture
Direction de l'Enseignement, de la Recherche et de la Formation des Cadres (D.E.R.F.C.)
Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie (I.N.R.A.T.)

République française
Ministère des Affaires Etrangères
Direction Générale des Relations Culturelles, Scientifiques et Techniques
Secrétariat d'Etat aux Universités
Centre National de la Recherche Scientifique (C.N.R.S.)

SEMINAIRE DE SENSIBILISATION

"LA TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"

Tunis, 29-30 octobre 1975

organisé, à la demande de S.E. le Ministre de l'Agriculture de Tunisie, par le Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques Louis Emberger du C.N.R.S. et l'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie (I.N.R.A.T.),

avec la participation (communications) :

. des organismes tunisiens concernés :
  . I.N.R.A.T.,
  . Direction des Ressources en Eau et en Sol (D.R.E.S.),
  . Institut National de la Météorologie,
  . Office de la Topographie et de la Cartographie

. d'organismes français :
  . C.N.E.S. Centre National d'Etudes Spatiales,
  . C.N.R.S. Centre National de la Recherche Scientifique,
  . O.R.S.T.O.M. Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer,
  . G.R.T.M. Groupe de Recherche sur la Télédétection de Montpellier

. des chercheurs du C.N.R.S. et de l'O.R.S.T.O.M., en mission à Gabès

et avec l'aide financière des organismes précités et, en outre :

. du Ministère de l'Agriculture de Tunisie,
. du Ministère français des Affaires Etrangères (Direction Générale des Relations Culturelles, Scientifiques et Techniques)

Le séminaire tient ses séances dans un amphithéatre de l'Institut National Agronomique de Tunisie (I.N.A.T.)
Il s'adresse aux responsables invités des services techniques des ministères tunisiens et, tout particulièrement, à ceux du Ministère de l'Agriculture.

SEMINAIRE DE SENSIBILISATION
"LA TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"

PROGRAMME *

MERCREDI 29 OCTOBRE 1975

1. 8h30-9h00 Accueil des participants, inscription

2. 9h00-9h15 Introduction générale et présentation du programme
   M. ZAKARIA ben MUSTAPHA (D.E.R.F.C., Min. Agr., Tunis)

3. 9h15-10h00 Acquisition des données de la télédétection et moyens logistiques appropriés : porteurs, capteurs, chaîne d'acquisition des données, organisation des missions aéroportées et spatiales, missions LANDSAT et autres
   M. A. BAUDOIN (C.N.E.S.-G.D.T.A., Toulouse)

4. 10h00-10h45 Moyens de mise en forme et de pré-traitement des informations de télédétection. Mise en oeuvre d'outils généraux d'interprétation
   M. M. CAZENAVE (C.N.E.S., Division de Mathématiques, Toulouse)

5. *10h45-11h00* *Pause*

6. 11h00-11h30 Les programmes de coopération scientifique et technique du C.N.E.S. en ce qui concerne la télédétection des ressources terrestres
   Mme M. CHEVREL (C.N.E.S., Paris)

7. 11h30-12h00 Les applications cartographiques des informations par satellite
   M. T. MAJOUL (Office Topogr. et Cartogr.)

8. 12h00-12h30 L'utilisation des données ERTS/LANDSAT pour la cartographie de l'érosion dans les sous-bassins versants du Zeroud et du Merguellil
   M. A. SOUISSI (D.R.E.S., Tunis)

9. 12h30-13h00 La télédétection et ses applications météorologiques à la Tunisie
   M. M. AYADI (Météorologie, Tunis)

10. *13h00-14h15* *Déjeuner*

11. 14h30-15h00 Présentation générale du Projet ARZOTU (Zones arides de Tunisie) : définition, objectifs, territoire considéré, phases des études, moyens, résultats généraux attendus
    MM. M. STA-M'RAD (I.N.R.A.T., Tunis) et
    G. LONG (P.I. du Projet, CEPE/CNRS)

---

* Les temps affectés aux auteurs des communications comprennent éventuellement une courte discussion sur des points particuliers à chaque communication.

12. 15h00-15h45 L'analyse multispectrale des images LANDSAT du Sud de la Tunisie : premiers résultats et programmes engagés

Mme G. DEBUSSCHE (CEPE/CNRS, Montpellier)

MM. Ch. FLORET (CNRS/Unesco, Gabès), E. LE FLOC'H (CNRS, Gabès)

R. PONTANIER (ORSTOM, Gabès)

13. 15h45-16h30 L'analyse automatique des données LANDSAT du Sud de la Tunisie : premiers résultats et programmes engagés

M. B. LACAZE (CEPE/CNRS, Montpellier) et

MM. FLORET, E. LE FLOC'H et R. PONTANIER

14. *16h30-17h00* *Pause*

15. 17h00-17h45 Applications générales de la télédétection et, en particulier de la thermographie, aux études géologiques, hydrogéologiques, océanographiques, potamologiques et de génie civil

M. le Pr. J. AVIAS (GRTM-USTL) Directeur de l'UER IX Ressources naturelles et Aménagement Régional, Montpellier)

16. 17h45-18h30 Applications générales de la télédétection et, en particulier de la thermographie, à l'étude des phénomènes de pollution des eaux

M. Ch. ARMANGAU (GRTM-USTL, Montpellier)

(dîner libre)

JEUDI 30 OCTOBRE 1975

17. 9h00-9h45 Applications de la télédétection spatiale dans les pays tropicaux arides et semi-arides : le Projet SAPHIR (Delta intérieur du Niger)

MM. G. HIEZ et J. MAIGNIEN (ORSTOM, Paris)

18. 9h45-10h15 L'utilisation des techniques de traitements photographiques (équidensités, combinaisons chromatiques, maculographie) en télédétection des ressources terrestres : applications à la cartographie pédologique et aux programmes d'aménagement rural

M. B. NAERT (GRTM-INRA, Montpellier)

19. *10h15-10h45* *Pause*

20. 10h45-11h30 Essai de synthèse sur les possibilités de la télédétection notamment en rapport avec les besoins des pays méditerranéens en cours de développement

M. G. LONG (CEPE/CNRS, Montpellier)

21.	11h30-12h30	Discussions générales sur les exposés présentés et conclusions scientifiques et techniques
22.	*12h30-14h15*	*Déjeuner*
23.	14h30-17h30	Débat général sur les problèmes soulevés en tenant compte des objectifs et des besoins spécifiques de la Tunisie Essai de définition d'un programme d'actions Conclusions finales.

o o
o

Vu p[illegible] le Centre National
de Documentation Agricole
00231

Séminaire de sensibilisation
"Télédétection des Ressources Terrestres"

TUNIS
29 - 31 OCTOBRE 1975

ACQUISITION DES DONNEES DE LA TELEDETECTION ET MOYENS LOGISTIQUES APPROPRIES

(Porteurs, capteurs, chaine d'acquisition des données, organisation des missions aéroportées et spatiales).

Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale.
TOULOUSE (FRANCE)

Acquisition des données de la télédétection et moyens logistiques appropriés :
porteurs, capteurs, chaine d'acquisition des données, organisation des missions aéroportées et spatiales.

A. BAUDOIN GDTA.

INTRODUCTION

Il est commode de définir la télédétection comme l'extension naturelle de la photo-interprétation dans trois directions :

- Dans le domaine de la nature physique des phénomènes observés : le rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre et enregistré sur le film photographique n'est qu'un type d'information parmi tous ceux qui peuvent être analysés actuellement par les différents CAPTEURS (systèmes à balayage, radars etc).

- Dans la dimension et l'échelle des surfaces de la terre voulant être étudiées : les photographies aériennes prises à des altitudes ne pouvant guère dépasser 10 à 15 000 mètres couvrent des surfaces de quelques kilomètres ou quelques dizaines de kilomètres de côté alors que des images réalisées en ballons de 20 à 50km ou mieux en satellite de 100 à 36 000km offrent du paysage une vue synoptique à l'échelle régionale, territoriale ou planétaire.

- Dans les moyens de traitements et d'exploitation des données : l'examen visuel qualitatif est complété par l'analyse quantitative à l'aide des ordinateurs et par un arsenal de procédures photographiques, optiques ou électroniques d'aide à l'interprétation.

Au-delà de cette différence des moyens mis à la disposition de la télédétection par rapport à ceux de la photo-interprétation il y a lieu d'insister sur le caractère global et multidisciplinaire de la télédétection qui n'est pas une technique mais plutôt une méthode, un art d'utiliser au mieux des techniques de nature très diverses, dont la photo-interprétation est d'ailleurs l'une d'entre elles.

Notre propos est ici de ne traiter que des systèmes d'acquisition des données, les traitements et les applications étant évoqués par ailleurs. Nous nous référons cependant à ces derniers autant que possible car il doit y avoir une adaptation aussi grande que possible des capteurs, des porteurs aux systèmes de traitements ainsi qu'aux types de problèmes pratiques posés par l'utilisateur.

.../...

LES CAPTEURS

Le capteur est l'instrument de mesure et d'enregistrement d'un phénomène révélateur de la surface terrestre.

La télédétection se limite généralement aux phénomènes pouvant être transmis par une onde électromagnétique et les différents types de capteurs peuvent se caractériser par le tableau suivant :

Capteur	Rayonnement étudié	Paramètre mesuré	Formation de l'image	Conditions d'emploi
chambres photographiques	visible proche I.R. (0,4 à 0,9µm)	réflexion solaire	instantanée sur film	par beau temps de jour (9 à 17 h)
système à balayage thermique	infra rouge (3 à 15µm)	émission thermique du sol	-par balayage -enregistrée sur bande magnétique.	par beau temps jour et nuit
système à balayage multispectral	visible et infra rouge (0,4 à 1,1µm)	réflexion solaire	- par balayage	- beau temps - de jour
radar latéral	micro-ondes (1mm à 1m)	rétrodiffusion	- radar	- tous temps - jour nuit
radiomètres à micro-ondes	micro-ondes	émission du sol	- balayage	- tous temps - jour nuit

Les chambres et les émulsions photographiques

Les différents types de chambres :

- *Chambres métriques* (utilisées pour la photogrammétrie)

. leur grand format (24 x 24cm) et la qualité de leur optique en font des instruments très intéressants pour la photo-interprétation stéréoscopique.

- *Chambres multispectrales* :

. obtenues en associant soit plusieurs chambres (batterie de 4 hasselblads par exemple), soit plusieurs objectifs dans une même chambre (caméra I2S ou ITEK) elles permettent d'enregistrer simultanément de 4 à 9 images spectrales différentes de la même scène (voire émulsions et filtres)

. d'un format plus petit (6 x 6cm) les photographies obtenues sont intéressantes pour leur facilité d'emploi (à bord d'un ballon par exemple) et leur versatilité.

.../...

- *Autres chambres* :

Nous pouvons citer également des chambres spécialisées :
. de reconnaissance (pour des études à très grande échelle grâce à leur système de compensation de filé)
. panoramiques qui montrent une image du sol d'un horizon à l'autre.

Ces deux types de chambres sont surtout employées pour des objectifs militaires.

Les émulsions

Quatre types principaux d'émulsions sont employés.

- *Emulsion panchromatique* (kodak +X 2402)

. sensible de façon presque uniforme au rayonnement visible elle fournit une image en noir et blanc d'une grande résolution ce qui permet d'identifier les détails. Elle peut être employée avec différents filtres pour obtenir une sélection spectrale plus fine. Cette émulsion est adaptée aux études pédologiques, géologiques et planimétriques.

- *Emulsion infra rouge* (kodak 2424)

. sensible au proche infra rouge (jusqu'à 0,9 m) et moins sensible au bleu elle fournit une image en noir et blanc mettant en évidence toutes les traces d'eau (absorbant dans l'infra rouge) et l'activité chlorophylienne (forte réflexion dans l'infra rouge). Elle est donc utile pour l'hydrologie et l'étude des végétaux.

- *Emulsion en couleurs naturelles* (kodak MS 2448)

. à l'aide de trois couches chromatiques sensibles au bleu, vert, rouge la sensation visuelle des couleurs est restituée. Notons la nécessité pour les images aériennes d'être filtrées dans le bleu pour éviter la diffusion atmosphérique.
Cette émulsion est adaptée aux études pédologiques, géologiques, de l'environnement.

- *Emulsion en fausses couleurs* (kodak IRC 2443)

. les trois couches chromatiques sont sensibles au vert, rouge et infra rouge si bien que l'eau apparaît en noir, la végétation en rouge. Les différents types d'occupation du sol sont bien mis en évidence ainsi que l'état de santé des végétaux.

D'autres émulsions peuvent également être employées : c'est ainsi que kodak expérimente actuellement une émulsion à 2 couches particulièrement adaptée aux études hydrographiques.

Notons que l'emploi de *filtres optiques* peut être envisagé pour obtenir, comme dans le cas des chambres multispectrales,des

.../...

images spécifiques d'une bande étroite de longueur d'onde. Nous devons remarquer cependant que ces bandes ne peuvent pas être très étroites et qu'un maximum de 4 à 5 jeux de filtres suffisent pour fournir toute l'information contenue dans le "spectre photographique".

L'avantage des systèmes photographiques est leur coût peu élevé, la bonne connaissance qu'en ont les photo-interprètes qui les utilisent depuis plusieurs dizaines d'années ainsi que la rapidité avec laquelle il est possible de fournir les images.

Par contre celles-ci se prêtent mal à des mesures quantitatives et à une exploitation automatique.

Les systèmes photographiques sont les mieux adaptés aux missions ponctuelles à grande échelle.

Les systèmes à balayage (scanners)

Mis au point pour enregistrer des images thermiques (thermographies) le principe des radiomètres à balayage fut ensuite utilisé pour analyser le rayonnement visible et proche infra rouge dans de nombreuses bandes de longueur d'onde étroites.

Un radiomètre à balayage multispectral comprend :

- *Un dispositif d'analyse du terrain* possédant comme pièce importante un miroir dont le mouvement génère le balayage. Divers types de balayage sont possibles. Citons par exemple :

Le balayage linéaire rotatif obtenu par la rotation d'un miroir incliné à 45 degrés. Ce système est utilisé dans la plupart des radiomètres aéroportés, en particulier par le Daedalus employé par le GDTA. Il est à la fois simple et pratique, se prêtant relativement bien aux traitements numériques.

Le balayage linéaire oscillant utilisé par exemple par le MSS des satellites ERTS/LANDSAT est adapté aux systèmes spatiaux à faible angle de champ.

Le balayage conique utilisé dans le radiomètre multispectral de Skylab analyse le sol suivant un arc de cercle. Ce système qui est très simple d'un point de vue technologique complique cependant les traitements numériques.

- *Un système optique* destiné à focaliser l'énergie recueillie par le miroir à l'aide de lentilles ou de miroirs paraboliques complété par un système dispersif qui sépare les différentes bandes spectrales. Les résolutions angulaires et spectrales dépendent d'une façon importante de cette partie du radiomètre.

- *Le ou les détecteurs* sont formés par des cellules sensibles qui génèrent un courant électrique en recevant un flux lumineux ou électromagnétique. Ce courant étant ensuite amplifié il est enregistré sur une bande magnétique. Les détecteurs utilisés et la qualité des composants électroniques déterminent la précision du radiomètre.

Dans le cas des détecteurs thermiques, deux grands types de cellules peuvent être utilisées : l'antimoniure d'indium (In S b) sensible entre 3 et 5 µm et le tellurure de cadmium-mercure (Cd Hg Te) sensible entre 8 et 14 µm. Celles-ci doivent être utilisées à basse température (celle de l'azote liquide : 77° K) pour être efficaces.

Pour obtenir de bonnes mesures du rayonnement thermique il est nécessaire de comparer le signal enregistré à des références corespondant à des corps noirs de température connue.

Sans entrer en détail dans la théorie du rayonnement thermique remarquons cependant que celui-ci dépend étroitement de la température des corps étudiés mais également de la nature de ces corps (ou plutôt de leur èmissivité) ainsi que de la transmission atmosphérique.

Il est donc nécessaire, non seulement de calibrer le signal enregistré par le capteur, mais surtout de bien mesurer les températures réelles de certains points du paysage dont la nature physique est bien connue (par exemple l'eau) pour espérer calculer de façon précise des températures à l'aide du radiomètre.

Dans le cas des détecteurs visibles (à la silice Si) c'est surtout la disposition du système dispersif (prisme ou réseau) et des différentes cellules qui déterminent les qualités de celui-ci.

Le nombre de canaux est un paramètre important, facteur d'intérêt pour l'utilisateur, mais la précision radiométrique (rapport signal sur bruit) ainsi que la séparabilité des canaux le sont plus encore.

L'étalonnage est ici obtenu à l'aide d'une lampe de référence dont l'éclairement est connu, une deuxième référence étant le niveau zéro ou corps noir.

Le DAEDALUS du CnES possède les caractéristiques suivantes :

- 10 bandes spectrales (de 0,38 à 1,10µm) :

Canal	Bande spectrale (nanomètre)	Précision
1	380 - 420	3 %
2	420 - 450	1,5 %
3	450 - 500	0,4 %
4	500 - 550	0,3 %
5	550 - 600	0,2 %
6	600 - 650	0,2 %
7	650 - 700	0,2 %
8	700 - 800	0,2 %
9	800 - 900	0,2 %
10	900 - 1100	0,4 %

- résolution angulaire : 2,5mrd
- angle de champ : 87°20' (dont 77°20' utiles)
- rotation du miroir : 80 t/s.

Le radar latéral

Nous ne ferons que citer ici cet instrument, qui en utilisant des longueurs d'onde beaucoup plus grandes que celles des capteurs précédents peut s'affranchir de certains problèmes météorologiques. En effet une brume ou des nuages atténuent très peu les ondes radar alors qu'ils absorbent le rayonnement visible et infra rouge.

Utilisant le principe de la rétrodiffusion : émission d'une onde et analyse de l'énergie réfléchie dans la direction d'incidence, les images radar mettent en évidence les structures linéaires (géologiques ou planimétriques) du paysage.

Certaines propriétés physiques (humidité des sols, nature de la glace et la neige) peuvent être très bien étudiées par le radar. De plus la possibilité d'employer plusieurs fréquences et plusieurs polarisations des ondes permet d'utiliser ces informations multispectrales pour l'étude de la végétation et de l'occupation du sol.

Notons cependant que les résolutions au sol sont souvent plus mauvaises que celles des capteurs plus classiques : les images obtenues sont à petite échelle.

D'autres capteurs :

- Citons le radiamètre à micro-ondes qui est un capteur passif étudiant le rayonnement émis par le sol mais dont les résolutions spatiales actuelles sont encore très mauvaises.

- Le lidar est basé sur le principe du radar mais utilise un rayonnement visible émis par un laser (ce capteur n'en est encore qu'au stade de la recherche).

.../...

LES VECTEURS (ou porteurs)

Les avions

Différents types d'appareils peuvent être utilisés, comme ceux qui existent à l'escadrille de l'Institut Géographique National et dont les caractéristiques sont les suivantes :

	B 17	Hurel Dubois HD 34	Aéro Commander 680 FL	Mystère 20
Poids maximal autorisé	27 t	18,6 t	3,9 t	12,8 t
Autonomie	11/15 h	15/20 h	6/8 h	5/6 h
Distance maximale franchissable.	4 000 km	3 600 km	2 400 km	14 500 km
Vitesse ascensionnelle	2,5 m/s	5 m/s	6,25 m/s	15 m/s
Vitesse de croisière	250/380 km/h	200/280 km/h	250/380 km/h	800 km/h
Plafond théorique	10 000 m	7 000 m	8 700 m	13 700 m
Plafond de travail	8 500 m	6 000 m	7 000 m	12 600 m

Lors de l'exécution d'une mission l'avion doit suivre une trajectoire aussi rectiligne que possible, à une altitude constante. Le choix de cette altitude, du nombre d'axes à parcourir, de leur direction dépend à la fois de la région survolée, de la dimension des phénomènes à observer et de la nature du ou des capteurs utilisés.

Il est important de savoir que lors de l'utilisation de radiomètres à balayages certaines précautions doivent être prises : il est préférable de voler dans la direction du soleil pour éviter de trop grandes variations de la géométrie soleil-terrain-capteur qui influe sur les corrections radiométriques à apporter ensuite au signal (pour le rayonnement visible).

Les mouvements propres de l'avion (roulis, lacet, tangage) perturbent beaucoup la géométrie des images obtenues par balayage. Il convient donc d'essayer de minimiser ceux-ci.

.../...

De nombreuses missions nécessitent des passages répétés sur les mêmes axes de vol. Dans ce cas le repérage est extrêmement important.

Toutes ces contraintes demandées aux pilotes ne peuvent être réalisées qu'approximativement. Il est cependant bon qu'elles le soient pour simplifier les corrections à apporter par le traitement et l'exploitation des images.

Les ballons

- Les ballons libres stratosphériques peuvent emporter des chambres photographiques pour réaliser des prises de vues à petite échelle, depuis une altitude d'environ 40 km.

Les trajectoires possibles ne sont pas très précises mais le coût peu élevé des prises de vues rend intéressant ce porteur pour simuler des prises de vues spatiales.

- Les ballons captifs troposphériques sont particulièrement adaptés aux problèmes de surveillance permanente.

Situé entre 300 à 2 000 m ils peuvent étudier des surfaces de quelques kilomètres carrés pendant de très longues durées.

A ce titre ils peuvent être très utiles pour aborder des problèmes méthodologiques (détermination des heures et époques optimales de prise de vues par exemple).

Les satellites

L'expérience acquise récemment grâce aux satellites américains ERTS, rebatisés LANDSAT, et SKYLAB vient compléter celle plus ancienne des satellites météorologiques (NIMBUS, NOAA).

Nous distinguerons trois types de satellites :

Les satellites géostationnaires, situés à 36 000 km de la Terre, restent constamment au dessus du même point. Ils permettent une vision synoptique de la planète mais les résolutions permises ne sont pas encore adaptées à l'étude des ressources terrestres.

Les stations orbitales habitées (Skylab, prochainement Spacelab).

Les missions envisagées étant de courte durée les opérations de télédétection ne peuvent être que ponctuelles. Elles offrent cependant des avantages dus à la présence des cosmonautes à bord : possibilité d'adapter les expériences aux conditions météorologiques, de pointage, etc.

Elles constituent un magnifique banc d'essai des techniques et des méthodes par la versalité des conditions pouvant être rencontrées.

.../...

Les satellites automatiques à orbite héliosynchrone
(NIMBUS, ERTS)

Ces satellites sont bien adaptés aux missions d'observation de la Terre pour deux raisons :

- leur altitude élevée (de 500 à 1 000 km) leur permet d'avoir une vue synoptique à l'échelon régional tout en gardant une bonne résolution spatiale.

- leur répétitivité obtenue en calculant judicieusement les paramètres d'orbite (période, inclinaison, heure de passage au noeud ascendant) fait que tous les points du globe sont survolés périodiquement à la même heure locale.

- Dans le cas du satellite ERTS/LANDSAT les caractéristiques sont les suivantes :

- orbite circulaire à 910 km d'altitude
- période : 103 minutes
- inclinaison de l'orbite : 109°
- répétitivité : 18 jours
- capteurs à bord : - système caméra RBV (3 bandes spectrales)
  - radiomètre multispectral MSS :4 canaux

- MSS4 : 0,5 à 0,6 µm (jaune)
- MSS5 : 0,6 à 0,7 µm (rouge)
- MSS6 : 0,7 à 0,8 µm (rouge - infra rouge)
- MSS7 : 0,8 à 1,1 µm (infra rouge)

- dimension de la zone couverte par une image : 185 x 185 km
- résolution spatiale du MSS : 80 m.

LES PROBLEMES D'ENREGISTREMENT ET DE MISE EN FORME DES DONNEES

Deux types de support permettent une utilisation directe des informations acquises :

- le film photographique
- la mémoire d'un ordinateur

Alors que le premier est adapté à l'examen visuel, à l'étude des détails, à la vision stéréoscopique, le second permet des analyses quantitatives et une automatisation plus grande des traitements.

Dès l'acquisition des données il est nécessaire de prévoir les traitements futurs pour les faciliter.

Pour obtenir des images sur film photographique nous disposons :

- *de baies de restitution* transcrivant les bandes magnétiques analogiques (baie Honeywell-Daedalus par exemple).

- *de baie de visualisation* des bandes numériques (visumat) permettant de rejouer des images LANDSAT par exemple.

D'autres matériels sont adaptés pour le traitement visuel ou photographique de ces images comme le système de visualisation colorée formant une image en couleurs à partir de 3 images noir et blanc.

Les images numériques sont obtenues par digitalisation
- soit des films photographiques par des *microdensitomètres* (SCANDIG)
- soit des bandes magnétiques analogiques *(chaîne de numérisation SIS)*

Ce dernier cas est important car c'est celui qui justifie le plus des traitements numériques. Il est alors important d'assurer une bonne synchronisation de la numérisation entre les différents canaux pour pouvoir étudier les signatures spectrales de chaque point de l'image.

L'enregistrement de données complémentaires est souvent une nécessité pour pouvoir réaliser ensuite le prétraitement des images.

Les corrections géométriques sont facilitées par la connaissance à tout instant de la position et de l'attitude du porteur.

Les corrections radiométriques nécessitent la connaissance de l'éclairement et de la position du soleil ainsi que celle de l'absorption et de la diffusion atmosphérique. Ces paramètres sont difficiles à mesurer, soit à bord du vecteur, soit au sol.

.../...

ORGANISATION DES MISSIONS AEROPORTEES ET (OU) SPATIALES

Schématiquement une mission de télédétection comprend les phases suivantes :

Conception de la mission : choix des moyens (capteurs, vecteurs, traitements) , des conditions de prise de vue (heures, époques, altitude, axe de vols, etc...) en fonction de l'étude envisagée et des contraintes techniques et budgétaires.

Acquisition des données : la réalisation des vols doit être coordonnée étroitement avec les mesures effectuées au sol et s'ily a lieu avec le passage du satellite.

Il est en effet primordial que les mesures complémentaires concernant par exemple l'état de l'atmosphère, l'éclairement solaire, la température ou la réflectance de cibles-témoins soient effectuées au moment même de l'acquisition des données aérospatiales.

Le nombre relativement important des mesures qui doivent être faites en un temps réduit demande de nombreuses personnes au sol et une très bonne coordination entre elles ainsi qu'avec l'avion.

La visualisation des données : celle-ci doit être réalisée le plus rapidement possible après l'exécution de la mission de façon à ce que l'interprète commence à évaluer la qualité des images et surtout qu'il puisse contrôler sur le terrain un certain nombre de points ou de zones test qui lui serviront à définir des clés d'interprétation, soit visuelles, soit automatiques.

Les prétraitements, traitements et interprétations pourront être effectués ensuite. Selon le type de problème abordé le problème des délais sera plus ou moins crucial. La surveillance des pollutions demande des résultats très rapidement alors que la prévision des récoltes doit être réalisée en quelques mois et que la prospection minière ou pétrolière n'exigent pas de délais très courts.

Il est important cependant d'insister sur ce problème qui se pose actuellement : les délais d'obtention des images brutes puis traitées sont encore beaucoup trop longs pour permettre une utilisation optimale des moyens de télédétection existants.

Vu par le Centre National
de Documentation Agricole
00232

MOYENS ET METHODES DE TRAITEMENT

DES DONNEES IMAGES

EN TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

Par Monsieur Michel CAZENAVE

de la Division Mathématique
et Traitement

Direction de l'Exploitation et
des Exploitations
CENTRE SPATIAL de TOULOUSE
18, av. Edouard Belin

31055 - TOULOUSE CEDEX

Séminaire de Sensibilisation sur la Télédétection des "Ressources Terrestres"

TUNIS les 29 et 30 octobre 1975

Vu par le Centre National
de Documentation Agricole
00232

MOYENS ET METHODES DE TRAITEMENT

DES DONNEES IMAGES

EN TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

Par Monsieur Michel CAZENAVE

de la Division Mathématique
et Traitement

Direction de l'Exploitation et
des Exploitations
CENTRE SPATIAL de TOULOUSE
18, av. Edouard Belin

31055 - TOULOUSE CEDEX

Séminaire de Sensibilisation sur la Télédétection des "Ressources Terrestres"

TUNIS les 29 et 30 octobre 1975

I - INTRODUCTION

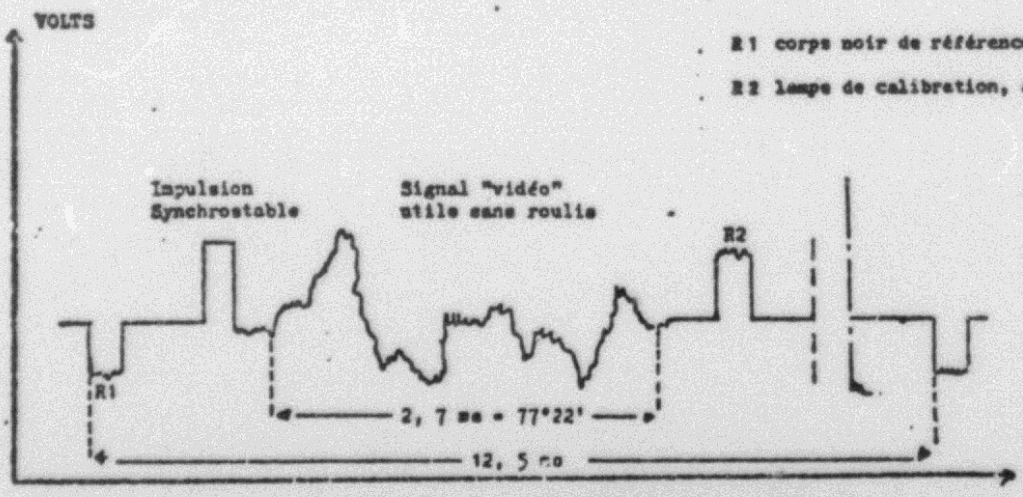
Un capteur est un appareil apte à recevoir le rayonnement venant des zones observées, dans une ou plusieurs gammes de longueurs d'ondes, et à le transformer en un signal permettant de mémoriser l'information.

Aux appareils photographiques, encore parfois utilisés, ont succédé des radiomètres multispectraux à balayage, composés d'un dispositif optique à miroir tournant permettant d'analyser la zone observée point par point, ligne par ligne, simultanément dans plusieurs gammes de longueurs d'ondes grâce à plusieurs détecteurs.

Les signaux électriques issus des détecteurs sont enregistrés sur bande magnétique, soit directement, soit à la suite d'une transmission par un émetteur de télémesure.

A ce jour, plusieurs types de capteurs ont été utilisés en FRANCE :

- le radiomètre infrarouge aéroporté du Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) travaillant dans la gamme 10,5 à 12,5 microns. Le balayage est du type télévision obtenu par rotation d'un miroir plan (1 tour/sec) et par le défilement de l'avion ;
- les radiomètres CYCLOPE et SUPER CYCLOPE de la Société Anonyme de Télécommunications (SAT) opérant dans les gammes 3 à 5 microns et 8 à 12 microns (vitesse de rotation du miroir 72 tours/sec) ;
- le radiomètre multispectral à balayage DAEDALUS comprenant un miroir tournant à 80 tours/sec et dix détecteurs permettant l'obtention de dix signaux vidéo simultanés dans dix bandes spectrales comprises entre 0,38 et 1,1 micron.



Signal vidéo du radiomètre DAEDALUS correspondant à un balayage ligne pour un canal donné

- le radiomètre infrarouge de la SAT opérant dans quatre bandes spectrales comprises entre 3,3 et 12 microns.

A ces données, il faut ajouter celles des satellites américains Landsat 1 et LANDSAT 2, qui sont reçues au sol par des stations spécialisées et distribuées sous forme de bandes magnétiques digitales.

Une nouvelle classe de capteurs, les récepteurs hyperfréquences, commence à être utilisée. Ces capteurs peuvent être passifs et restituer une image des zones étudiées dans les longueurs d'ondes millimétriques (radiomètre millimétrique), ou actifs en éclairant le paysage avec des ondes hyperfréquences et en recevant le rayonnement réfléchi (radar à antenne latérale).

II - LE PRETRAITEMENT DES DONNEES

Nous appelons prétraitement des données l'ensemble des opérations et traitements qui aboutissent à une image corrigée non interprétée. Il s'agit de mettre les informations sous une forme telle qu'elles présentent le minimum d'inconnues quant à leur signification physique et à leur position géographique et qu'elles soient aisément accessibles à tous les utilisateurs, même situés à distance, sous forme numérique et/ou sous forme d'images.

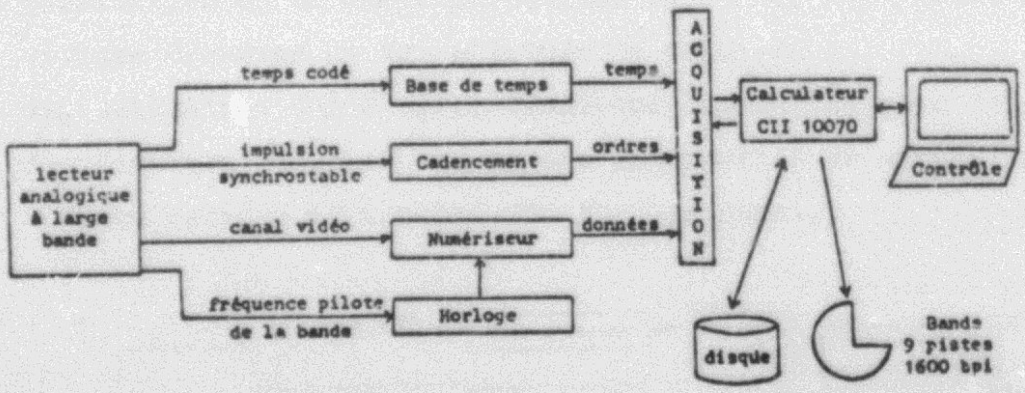
On peut prendre par exemple l'organisation du pré-traitement effectué au CNES et organisé autour d'équipements spécialisés qui regroupent les fonctions d'évaluation et de lecture des bandes magnétiques contenant les enregistrements analogiques des voies de mesures ou de télémesures, la numérisation et la datation des enregistrements, le multiplexage éventuel des voies de mesures et leur acquisition par 2 calculateurs CII 10 070. Ceux-ci effectuent le pré-traitement proprement dit et le stockage des données images pré-traitées sur disques ou sur bandes magnétiques.

2.1. Equipements d'acquisition des données

Les équipements actuellement disponibles sont :

Une chaîne de numérisation monospectrale, qui utilise un numériseur standard de télémesure, présente les caractéristiques suivantes :

- numérisation sur 11 bits
- précision $5.\ 10^{-4}$
- cadence maximum admissible 100 KHz



La synchronisation de l'ensemble du système est assurée sur le début de la ligne. Tout signal vidéo peut être numérisé sur cet équipement moyennant une adaptation du logiciel d'acquisition. A titre d'exemple, un logiciel actuel-

II - LE PRETRAITEMENT DES DONNEES

Nous appelons prétraitement des données l'ensemble des opérations et traitements qui aboutissent à une image corrigée non interprétée. Il s'agit de mettre les informations sous une forme telle qu'elles présentent le minimum d'inconnues quant à leur signification physique et à leur position géographique et qu'elles soient aisément accessibles à tous les utilisateurs, même situés à distance, sous forme numérique et/ou sous forme d'images.

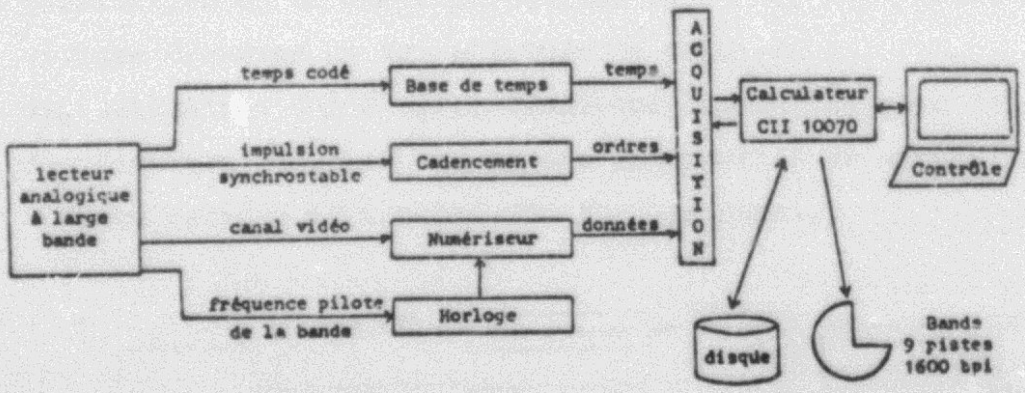
On peut prendre par exemple l'organisation du pré-traitement effectué au CNES et organisé autour d'équipements spécialisés qui regroupent les fonctions d'évaluation et de lecture des bandes magnétiques contenant les enregistrements analogiques des voies de mesures ou de télémesures, la numérisation et la datation des enregistrements, le multiplexage éventuel des voies de mesures et leur acquisition par 2 calculateurs CII 10 070. Ceux-ci effectuent le pré-traitement proprement dit et le stockage des données images pré-traitées sur disques ou sur bandes magnétiques.

2.1. Equipements d'acquisition des données

Les équipements actuellement disponibles sont :

Une chaîne de numérisation monospectrale, qui utilise un numériseur standard de télémesure, présente les caractéristiques suivantes :

- numérisation sur 11 bits
- précision $5.\ 10^{-4}$
- cadence maximum admissible 100 KHz



La synchronisation de l'ensemble du système est assurée sur le début de la ligne. Tout signal vidéo peut être numérisé sur cet équipement moyennant une adaptation du logiciel d'acquisition. A titre d'exemple, un logiciel actuel-

lement utilisé pour un signal vidéo du type de celui qui figure ci-dessus (radiomètre DAEDALUS) effectue les opérations suivantes :

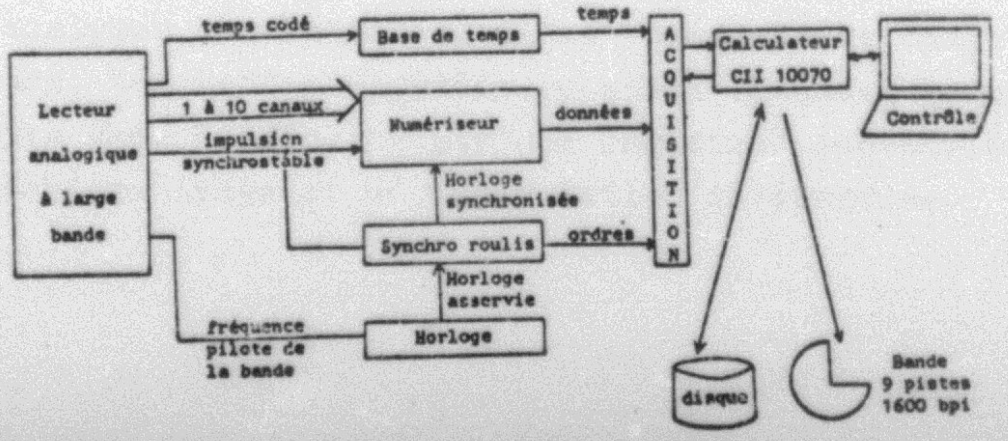
- reconnaissance du début de la ligne ;
- prélèvement de la datation : celle-ci est effectuée à partir d'un signal codé enregistré pendant la prise de vue sur une piste de l'enregistreur analogique ;
- prélèvement de 8 échantillons de la référence négative et calcul de leur moyenne ;
- saut après détection du plot de roulis ;
- prélèvement de 328 échantillons "vidéo" ;
- saut, prélèvement de 8 échantillons de la référence positive et calcul de leur moyenne.

Ces opérations sont répétées à chaque ligne balayée et le système prélève toutes les lignes afin de pouvoir par la suite corréler des informations issues de plusieur "canaux" numérisés séparément ; cette synchronisation s'effectue grâce à la datation.

Un système annexe dit de "servitudes" assure la sécurité du système en signalant toute anomalie (absence de plot de roulis, absence de ligne, etc.).

Une chaîne de numérisation multispectrale, qui utilise un équipement plus spécifique de ce type d'application et peut traiter 1 à 10 canaux simultanément, présente les caractéristiques suivantes :

- numérisation simultanée et synchrone de 1 à 10 canaux ;
- asservissement possible de l'horloge de numérisation sur un signal extérieur obéissant à une loi quelconque ;
- synchronisation de l'horloge de numérisation sur le plot de roulis à 200 ns près ;
- possibilité de ne numériser qu'une ligne sur n en fonction du rapport vitesse de prise de vue/altitude de celui-ci ;
- digitalisation sur 8 bits, dynamique compatible avec les caractéristiques des capteurs et celle des moyens intéractifs de visualisation ;
- cadence maximum admissible 200 KHz par canal.



comme pour l'équipement précédent, tout signal vidéo peut être numérisé sur cette chaîne moyennant une adaptation de logiciel d'acquisition.

Moyens annexes

Du fait de la complexité des organes la constituant, toute chaîne de numérisation doit être accompagnée de moyens de pilotage et de contrôle permettant de détecter une erreur éventuelle avant le traitement.

C'est ainsi que trois types de contrôle sont effectués :

- contrôles avant numérisation : ils permettent de s'assurer de la qualité de l'enregistrement, ainsi que de la mise en configuration correcte des équipements ;
- contrôles pendant la numérisation : il s'agit du système de servitudes qui est chargé de détecter les anomalies du "temps réel" ;
- contrôles après la numérisation : c'est la vérification du travail accompli ; il s'agit alors de constituer un état statistique des résultats et de le comparer à une "table de vérité", afin d'autoriser ou non la suite du traitement.

Numériseurs d'images

Pour réaliser certaines études (codage, compression, superrésolution, etc...) il peut être nécessaire de numériser un cliché photographique.

Il existe divers équipements utilisés pour numériser les documents le microdensitomètre à sortie digitale par exemple, avec enregistreur magnétique 9 pistes 800 bpi. Le film est placé sur un tambour en mouvement. La gamme de densité optique mesurable est de 0 à 3 D maximum codée sur 8 bits (256 niveaux) ; la taille des pas d'échantillonnage dans les deux dimensions ainsi que la surface élémentaire d'analyse peuvent être choisies (100µ, 50µ, 75µ, 25µ). La dimension maximum des films qu'il est possible d'analyser est d'environ 16 x 10 cm. Pour des analyses chromatiques, il est possible de disposer de filtres couleurs. Les bandes magnétiques ainsi obtenues peuvent être prises en compte sans difficulté par des logiciels appropriés de gestion des fichiers image et de manipulation intéractive.

Un second équipement est constitué par une caméra télévision dont le signal vidéo est numérisé sur 8 bits. Le nombre de points d'échantillonnage est de 512 x 512 pour des formats de clichés photographiques 24 x 36 mm, 6 x 6 cm et 35 mm, clichés placés sur une boîte à lumière. La sortie numérique de cet ensemble est connectée directement sur les calculateurs d'acquisition par le système de transmission Direct Data. Un logiciel interactif permet de manipuler les informations et de faire des copies sur film.

Enfin, le PDS qui est un système analyseur digital d'image de très hautes performances constitue une troisième voie possible pour effectuer une analyse photométrique digitale d'un film.

2.2. Correction des images et mise au format standard CNES

- Correction d'amplitude instrument

Cette correction consiste à appliquer aux données brutes d'acquisition une fonction de transfert, afin de les calibrer et de fournir une bande numérique standard où les données sont exprimées en valeurs physiques ($mW / cm^2 / \mu m.sr$) à une constante multiplicative près.

A titre d'exemple, dans le cas du radiomètre multispectral DAEDALUS, les deux références négatives (R 1) et positives (R 2) échantillonnées huit fois chacune lors de l'acquisition sont suffisamment bruitées pour que cela nécessite durant le prétraitement le calcul de la moyenne des échantillons (cas du système multispectral d'acquisition) sur chaque référence puis la moyenne sur au moins dix lignes consécutives.

Pour chaque ligne et chaque canal, on obtient ainsi une référence positive moyenne Réf. P et une référence négative moyenne Réf. N.
La calibration consiste à attribuer à chaque point la valeur physique :

$$R(i) = C \times \frac{I\,P\,(i) - Réf.\ N}{Réf.\ P\ - Réf.\ N}$$

I P (i) étant la valeur numérisée du i ième point et C un coefficient fonction du canal, déterminé par étalonnage de la lampe au sol avant et après chaque campagne.
Au cours de cette manipulation des données, on établit l'histogramme de l'image dans chacun des canaux.

Dans le cas où on effectue la numérisation canal par canal (numériseur monocanal) on procède au regroupement des N canaux en une seule bande, en effectuant des sauts de lignes afin d'éviter un suréchantillonnage le long de l'axe de vol (nombre de lignes sautées fonction de l'altitude et de la vitesse de l'avion).

Le numériseur 10 canaux, quant à lui, permet d'effectuer des sauts de lignes dès la numérisation et de créer en une seule opération une bande au format standard.

Cette standardisation du format des bandes répond à un besoin d'uniformiser les modes de présentation des données afin d'utiliser des chaînes de prétraitement et de traitement standards, quelle que soit l'origine des données (radiomètres DAEDALUS, SAT, Satellites LANDSAT 1 et 2, etc...).

- Filtrages

Des filtrages des images peuvent être nécessaires pour corriger les effets des fonctions de transfert des instruments de prise de vue ou pour éliminer des bruits sur les données de télémesures.

Les instruments d'optique atténuent les fréquences spatiales élevées : si on veut conserver un contraste aussi bon que possible, en particulier pour détecter des frontières ou des zones homogènes assez petites, il est nécessaire d'amplifier les hautes fréquences.

De même, avant transmission, les appareils électroniques dégradent le signal afin d'éviter les erreurs de repliement de spectre.

Le but des filtrages numériques est de compenser ces dégradations de façon à obtenir un gain constant dans la plage de fréquences spatiales la plus grande possible : une déconvolution des signaux images peut être effectuée pour établir une valeur corrigée de l'amplitude du signal en un point donné à l'aide de sommes pondérées des amplitudes des points voisins, le choix des coefficients de pondérations réalisant un compromis entre la correction des fonctions de transfert optique ou électronique et le temps de calcul.

On peut chercher à étendre le spectre de l'image : ce traitement plus complexe est beaucoup plus onéreux, et son application reste limitée à des cas bien précis et à de très petites zones : amélioration de détails dans des zones fortement contrastées.

La connaissance de propriétés statistiques des images et du bruit permet de corriger les images brutes de façon à atténuer les effets du bruit ; deux types de filtrage peuvent être utilisés :

. un filtrage statistique utilisant une méthode du type de KALMAN : elle a l'avantage d'être séquentielle et simple du point de vue mathématique.

. un filtrage de WIENER où l'image est connue par son spectre, donc traitée globalement. La première méthode peut s'appliquer à l'amélioration de zones fortement contrastées, la seconde est plus performante dans un cas plus général mais aussi plus coûteuse.

- Corrections de prise de vue

L'amplitude reçue en chaque point est une fonction de la nature du point visé et de nombreux paramètres dont les principaux sont :

. les positions relatives du soleil, du point visé, de l'instrument ;
. l'atténuation due à l'atmosphère ;
. les distorsions causées par le relief.

On cherche à calculer pour chaque zone son albédo.

* Une première correction peut ne tenir compte que des premiers paramètres, si les données météorologiques au moment de la prise de vue sont inconnues ou mal connues : on ne fait intervenir alors que l'heure de prise de vue et la position du capteur.

* Si les données météorologiques sont bien connues on peut tenir compte des dégradations apportées par la diffusion et l'absorption de l'atmosphère. Cette correction permet une meilleure mise en coïncidence d'images prises à des époques différentes.

Ces deux traitements ne font pas intervenir les caractéristiques géométriques de l'objet visé et peuvent se résumer à la consultation de tables à plusieurs entrées : valeur du signal enregistré, heure de prise de vue, angle de prise de vue, visibilité...

Cependant, l'énergie réfléchie par une zone de caractéristiques données est très différente suivant qu'elle se trouve sur une portion de terrain horizontale, ou sur un flanc de colline. La correction de cet effet nécessite des données de relief accessibles uniquement par repérage des points visés sur une carte ou par utilisation d'images stéréoscopiques mais le traitement correspondant est plus complexe.

- Corrections géométriques

Les images obtenues ne sont pas en général superposables à des cartes, et deux images de la même zone prises à des instants différents ne peuvent être mises

en coïncidence qu'avec des erreurs qui peuvent être très importantes : il est donc nécessaire de corriger l'image brute de façon à obtenir une image sur laquelle un utilisateur peut repérer des points géographiques donnés, rechercher des alignements, calculer des surfaces...
La correction comporte deux étapes : une détermination de la déformation de l'image brute par rapport à une image de référence qui pourrait être mise en coïncidence avec une carte géographique établie dans un système de projection donné, puis le calcul de l'amplitude qu'auraient les points de cette image de référence.

Deux cas sont à envisager :

- on ne possède aucune information sur le mouvement du capteur : il est alors nécessaire de repérer à la fois sur les images numérisées et sur une carte des points caractéristiques ou amers. La correspondance entre les coordonnées géographiques et la position sur l'image numérisée de ces amers peut être approximée par des fonctions simples. Le nombre d'amers à relever peut être important d'où un travail assez long nécessitant une console de visualisation interactive.

- si on possède un enregistrement des paramètres de position du capteur, ils peuvent être associés à un repérage d'amers en petit nombre pour recaler un modèle de mouvement permettant ensuite de déterminer des approximations des déformations. Dans ce cas, le travail de repérage à effectuer est assez réduit.

Il faut alors calculer pour chaque point de l'image de référence ses coordonnées dans l'image brute avant de lui affecter une amplitude, soit en lui donnant l'amplitude du point de l'image brute le plus proche, soit en faisant une interpolation sur les points voisins.

Les résultats peuvent se présenter sous des formes différentes :

- on se contente de superposer à l'image brute une grille de référence, représentant par exemple les méridiens et les parallèles géographiques, déformée de la même manière que l'image brute : ce traitement permet déjà de repérer des points de coordonnées géographiques connues.

- la correction des déformations est faite dans un repère tangent au mouvement du capteur et on superpose à l'image une grille de référence telle que citée ci-dessus. Ce traitement est plus coûteux que le précédent, car il faut calculer la déformation en chaque point ; il permet :

- de repérer des points de coordonnées géographiques connues grâce à la grille ;
- de retrouver des alignements locaux ;
- de calculer des surfaces en affectant à chacune des deux directions des coefficients de corrections.

Il ne permet pas la mise en coïncidence ou la juxtaposition simple de deux images.

. Le troisième traitement que nous appelons "rectification" et qui est le plus élaboré fournit l'amplitude en tous les points de l'image de référence : le résultat est une carte du terrain, ce qui permet une mise en coïncidence d'images d'origines différentes, des montages simples de bandes de prises de vue ...

2.3. Les logiciels de prétraitement

Le prétraitement des données brutes fournies par les enregistrements des capteurs ou par les télémesures, pour en constituer des données manipulables au sens de la physique et de l'informatique, en vue de leur interprétation, est d'une grande importance. Il suffit pour s'en convaincre d'examiner l'ensemble des opérations citées ci-dessus, dont certaines sont déjà fort complexes.

Dans le centre de calcul où l'on effectue le prétraitement, il est nécessaire de constituer une bibliothèque de logiciels. Elle comprend des algorithmes (1) de transformée rapide de FOURIER (FFT) et de WALSH-HADAMARD (FWT) à 1 et 2 dimensions pour des échantillons allant jusqu'à 8192 points complexes et 512 x 512 points. La FFT est utilisée principalement pour l'analyse spectrale, le calcul des coefficients de déconvolution et le filtrage. La FWT est utilisée pour étudier les performances et qualités des méthodes de compressions et de codage du signal image.

(1) : Un algorithme permet également de décomposer le signal en fonction des vecteurs et valeurs propres de la matrice de covariance (méthode de KARHUNEN-LOEVE). Il peut être utilisé pour effectuer une compression du signal.

- de repérer des points de coordonnées géographiques connues grâce à la grille ;
- de retrouver des alignements locaux ;
- de calculer des surfaces en affectant à chacune des deux directions des coefficients de corrections.

Il ne permet pas la mise en coïncidence ou la juxtaposition simple de deux images.

. Le troisième traitement que nous appelons "rectification" et qui est le plus élaboré fournit l'amplitude en tous les points de l'image de référence : le résultat est une carte du terrain, ce qui permet une mise en coïncidence d'images d'origines différentes, des montages simples de bandes de prises de vue ...

2.3. Les logiciels de prétraitement

Le prétraitement des données brutes fournies par les enregistrements des capteurs ou par les télémesures, pour en constituer des données manipulables au sens de la physique et de l'informatique, en vue de leur interprétation, est d'une grande importance. Il suffit pour s'en convaincre d'examiner l'ensemble des opérations citées ci-dessus, dont certaines sont déjà fort complexes.

Dans le centre de calcul où l'on effectue le prétraitement, il est nécessaire de constituer une bibliothèque de logiciels. Elle comprend des algorithmes (1) de transformée rapide de FOURIER (FFT) et de WALSH-HADAMARD (FWT) à 1 et 2 dimensions pour des échantillons allant jusqu'à 8192 points complexes et 512 x 512 points. La FFT est utilisée principalement pour l'analyse spectrale, le calcul des coefficients de déconvolution et le filtrage. La FWT est utilisée pour étudier les performances et qualités des méthodes de compressions et de codage du signal image.

(1) : Un algorithme permet également de décomposer le signal en fonction des vecteurs et valeurs propres de la matrice de covariance (méthode de KARHUNEN-LOEVE). Il peut être utilisé pour effectuer une compression du signal.

III - LA MANIPULATION ET LA PRESENTATION DES IMAGES

Les données prétraitées peuvent être présentées sur des équipements de visualisation sous forme "d'images" de la totalité ou d'une partie de la zone observée. Ces "images", qui sont des représentations purement conventionnelles des zones observées, constituent rarement par elles-mêmes le "résultat" recherché, celui-ci étant le plus souvent du type statistique sur des surfaces, des localisations, etc. Elles constituent cependant un moyen très efficace pour mettre au point, suivre ou valider des étapes de traitement. Elles demeurent nécessaires dans le cas de traitements opérationnels car ceux-ci exigent en général une intervention, une décision de l'expérimentateur en cours de traitement : comparaison avec des "vérités terrain", entrée de données extérieures à l'image, désignation de points ou de zones, etc.

Nous présentons ici quelques équipements utilisés au CNES, naturellement, d'autres équipements ont été développés par l'Industrie et sont disponibles.

Console visuelle TEKTRONIX 604

Un tube à balayage dont l'écran peut être photographié dans un format 6 x 6 cm permet de présenter des images de 512 x 512 points, 32 niveaux. Un logiciel conversationnel, commandé par une machine à écrire, permet l'activation de programmes de manipulations d'images tels que :

- copie bande à disque d'une ou plusieurs images;
- génération de fichiers complexes (transformée de Fourier) réels ou entiers,
- calibrations linéaires de l'image à partir de seuils,
- choix de la fenêtre à représenter et du facteur de grandissement,
- annotations alphanumériques à partir du clavier et génération de vecteurs,
- etc.

Console visuelle TEKTRONIX 4014

Un tube à mémoire avec clavier alphanumérique permet de présenter des images 800 x 1024 points, 15 niveaux.

A ce matériel est associé un logiciel de manipulation d'images dont les principales fonctions sont :

- gestion de fichier images

A l'aide du clavier, l'utilisateur peut solliciter après choix de la taille et du nombre de bits de codage, le transfert, ou l'effacement sur disque d'une ou plusieurs images préalablement stockées sur bandes magnétiques digitales.

- visualisation interactive avec

. choix de l'image parmi celles qui sont présentes sur disque ;

. calcul et visualisation sur une zone écran, choisie grâce à un réticule, de l'histogramme de tout ou partie de l'image ;

. calibration, éventuellement en fonction de l'histogramme, avec choix par l'opérateur des bornes de calibration (calibration linéaire, optimisée par tranches d'équipopulation, calibrations logarithmique, exponentielle, isophote) ;

. visualisation en négatif ou positif, dans une zone choisie de l'écran, de l'image ainsi calibrée et ce avec un facteur de grandissement quelconque ;

. sélection d'une "fenêtre" dans l'image présente sur l'écran et application des manipulations précédentes (histogrammes, calibration, grandissement,...);

. repérage d'un point, relevé sur l'écran avec le réticule, avec affichage (et perforation de cartes données) des coordonnées géométriques et valeurs en amplitude du point désigné (ou des n points si l'image est multispectrale) ;

. sauvegarde sur fichier disque des résultats obtenus ;

. combinaison linéaire entre canaux et affichage du résultat sur l'écran avec sauvegarde possible sur disque ;

. extraction de zones témoins par repérage des sommets d'un polygone, affichage de la réponse multispectrale de la zone après calcul de la moyenne, de la variance ;

. introduction de masques sur un canal, déterminés par seuillage sur d'autres canaux.

- copies d'images

Lorsque les manipulations de l'image sont terminées, il est possible d'activer, à partir du clavier, un programme de copie de l'image avec désignation par réticule de la zone, à partir des informations du fichier sauvegarde. Cette copie s'effectue sur la console TEKTRONIX 604, on obtient ainsi une image avec

A ce matériel est associé un logiciel de manipulation d'images dont les principales fonctions sont :

- gestion de fichier images

A l'aide du clavier, l'utilisateur peut solliciter après choix de la taille et du nombre de bits de codage, le transfert, ou l'effacement sur disque d'une ou plusieurs images préalablement stockées sur bandes magnétiques digitales.

- visualisation interactive avec

. choix de l'image parmi celles qui sont présentes sur disque ;

. calcul et visualisation sur une zone écran, choisie grâce à un réticule, de l'histogramme de tout ou partie de l'image ;

. calibration, éventuellement en fonction de l'histogramme, avec choix par l'opérateur des bornes de calibration (calibration linéaire, optimisée par tranches d'équipopulation, calibrations logarithmique, exponentielle, isophote) ;

. visualisation en négatif ou positif, dans une zone choisie de l'écran, de l'image ainsi calibrée et ce avec un facteur de grandissement quelconque ;

. sélection d'une "fenêtre" dans l'image présente sur l'écran et application des manipulations précédentes (histogrammes, calibration, grandissement,...);

. repérage d'un point, relevé sur l'écran avec le réticule, avec affichage (et perforation de cartes données) des coordonnées géométriques et valeurs en amplitude du point désigné (ou des n points si l'image est multispectrale) ;

. sauvegarde sur fichier disque des résultats obtenus ;

. combinaison linéaire entre canaux et affichage du résultat sur l'écran avec sauvegarde possible sur disque ;

. extraction de zones témoins par repérage des sommets d'un polygone, affichage de la réponse multispectrale de la zone après calcul de la moyenne, de la variance ;

. introduction de masques sur un canal, déterminés par seuillage sur d'autres canaux.

- copies d'images

Lorsque les manipulations de l'image sont terminées, il est possible d'activer, à partir du clavier, un programme de copie de l'image avec désignation par réticule de la zone, à partir des informations du fichier sauvegarde. Cette copie s'effectue sur la console TEKTRONIX 604, on obtient ainsi une image avec

toutes les possibilités de calibration précédentes, sur film 6 x 6. Cette image peut être annotée à partir du clavier de la console TEKTRONIX 4014 grâce à un générateur de caractères.

- copie alphanumérique et graphique

Un dispositif de recopie qui traduit, sur un format 21 x 27 papier, le contenu de l'écran (histogrammes, coordonnées géométriques et amplitudes des points désignés, résultats de classifications, etc.) est connecté à la console.

Console visuelle CIT - ALCATEL TRIM 512

Une console visuelle plus importante permet la manipulation d'images en noir et blanc et en couleurs.

Le système est constitué par :

- un ensemble de 3 unités de mémoire, de 512 x 512 octets chacunes, associées à 3 mémoires graphiques de 512 x 512 bits. Ces mémoires permettent d'une part de stocker un jeu d'images sélectionnées dans une bibliothèque, d'autre part de rafraîchir, par lecture périodique les images présentées sur le terminal ;
- un ensemble de fonctions programmables soit directement par l'opérateur, par l'intermédiaire d'un panneau de commande, soit par l'ordinateur pilote ;
- un moniteur de TV couleur du type "shadow mask".

L'équipement à partir des images stockées en mémoires images ou mémoires graphiques permet les manipulations suivantes :

- choix de 2 images à visualiser parmi 3 stockées en mémoire ;
- choix d'une partition parmi 4 dans chaque mémoire image et graphique ;
- décadrage de $\pm$ 512 points en horizontal et vertical, possibilité permettant de réaliser la fonction défilement de l'image sur le moniteur TV (opération pouvant s'effectuer sur une image visualisée pendant qu'une seconde reste par exemple fixe) ;
- grandissement ou zoom de rapport 2, 4 ou 8 : associé à la fonction précédente, ce grandissement permet de restituer sur le terminal l'effet de "travelling" ;
- masquage des entrées permettant de choisir le nombre et la place des bits de l'information à visualiser ;

- seuillage avec choix de 2 valeurs de référence et de 2 valeurs fixes, permettant de visualiser l'image en cinq modes différents (exemple : isophotes, seuillage par valeur positive ou négative, etc.) ;
- commande de contraste programmable ;
- commande d'amplitude programmable ;
- programmation de 2 tables couleurs (une par image visualisée sur l'écran) possédant chacune trois modes de fonctionnement :
    - mode transparent noir et blanc,
    - mode vraie couleur (les 3 composantes images chromatiques sont alors stockées dans les 3 mémoires),
    - mode pseudo couleur, qui permet d'associer une couleur choisie par mélange des composantes rouge, bleu, vert à chaque valeur d'un point image ;
- modulation de brillance, d'une image pseudo couleur par la même image ou une image différente en noir et blanc.

Des moyens interactifs sont associés à cet équipement, en plus du panneau de commande précédemment évoqué : ce sont essentiellement un pupitre de 32 touches programmables et une boule roulante à commande digitale. On peut afficher sur l'écran un marqueur dont la forme est définie par microprogrammation et dont la position est fixée par la boule roulante. Un module transmet à l'ordinateur les coordonnées X, Y du marqueur suivant un mode désignation (repérage de point) ou un mode poursuite (qui permet d'initialiser une phase d'écriture dans la mémoire graphique associée à la mémoire image et ainsi de faire apparaître sur le terminal des contours, frontières, etc.). Le clavier de fonction permet par programme d'associer une touche aux différentes manipulations d'images évoquées (défilement, zoom, mode de représentation, etc.) de manière que l'utilisation de ce matériel ne nécessite pas de connaissance informatique particulière.

Console visuelle CIT - ALCATEL V G 1625

Cette console, profondément différente de la précédente, répond à des préoccupations différentes.

Le tube, du type à pénétration au lieu de shadow mask, permet de présenter simultanément une image vidéo monochrome 256 x 256 points, 16 niveaux, obtenue par un balayage du type télévision, et une image graphique quadrichrome 1024 x 1024 points.

La comparaison, par superposition au niveau d'un même écran, d'une image réelle numérisée et d'une image synthétique de référence, permet d'aborder le problème général de la reconnaissance des formes.

L'image stockée dans la mémoire d'entretien permet les manipulations suivantes :

- accès direct à la ligne image ;
- visualisation d'une tranche de données déterminée, permettant des présentations avec seuillage, ou entre isophotes ;
- application d'un facteur de contraste sur la tranche de données visualisée ;
- décadrage programmable de l'échelle de brillance, par addition d'une constante ;
- correction de l'échelle de brillance par table de conversion programmable sur 16 niveaux. Ceci permet, en particulier, d'adapter les niveaux à la sensibilité de l'oeil.

La fonction image graphique comporte :

- un générateur de vecteurs numériques ;
- un générateur de caractères microprogrammé (code ASCII) ;
- un générateur d'aspect permettant 4 couleurs, 3 niveaux de brillance, les tracés pointillés et clignotants.

Des moyens interactifs sont associés à cet équipement : ce sont un clavier alphanumérique et de fonctions programmées, un photostyle permettant la désignation ou le tracé par poursuite, une boule roulante délivrant l'adresse de l'élément désigné.

D'autres modes de représentation des images peuvent être utilisés, mais ils ne sont pas interactifs.

Imprimante

La visualisation des zones à la demande, avec 10 niveaux de gris (dynamique ajustée automatiquement) se fait sur listing. Une numérotation des lignes et des colonnes permet alors d'effectuer un repérage. Ce moyen de visualisation ne trouve son application que pour des petites zones ($\approx$ 200 à 300 lignes, 200 à 300 colonnes) et se prête mal à des exploitations systématiques. Par contre, il s'avère très utile pour obtenir une visualisation rapide, à un moindre coût, dans le cas d'études ponctuelles.

Tracé sur film (CALCOMP 1670)

La visualisation des images se fait avec 8 niveaux de gris (dynamique adaptée) et numérotation des lignes et des colonnes sur film 35 mm.

Tracé sur papier (CALCOMP 1136)

Les points sont codés par des caractère de taille, de nature et de couleur différentes selon leur amplitude. La correction en tangente peut être effectuée en faisant varier la distance entre chaque point le long d'une ligne. Le temps de tracé d'une telle image en couleur sur papier ne permet pas une exploitation systématique du programme mais ce mode de représentation peut être utilisé pour présenter un résultat définitif.

On peut d'une part visualiser une image en trois dimensions par une surface vue en perspective : la troisième dimension est proportionnelle à l'amplitude du point et d'autre part obtenir des visualisations de courbes d'isodensité pour une image déterminée ("courbe de niveau" correspondant à des pas de luminance donnés).

Présentation à l'aide d'équipement de visualisation photographique incrémental

Dans ce domaine, il existe deux équipements fabriqués en FRANCE, le premier par la MATRA : le Visumat, le second par le S.E.P. : le Vizir. On peut utiliser pour ces équipements des bandes magnétiques comportant, outre les amplitudes codées, les ordres de commande nécessaires au contrôle de l'appareil. Par exemple, le Visumat peut visualiser des images de 11000 x 5800 points (avec une résolution ponctuelle de 40µ), de 5500 x 2900 points (résolution 80µ) ; un troisième mode compatible avec la définition des données du satellite américain LANDSAT est implanté (taille du point : 40 x 60 µ). Les programmes de création des bandes Visumat peuvent ajuster automatiquement la dynamique et effectuer la correction de gamma correspondant au type de film utilisé.

Un générateur de caractères permet de faire apparaître un commentaire, une grille, etc...

IV - L'AIDE A L'INTERPRETATION DES IMAGES

L'interprétation des images, au seul vu de leur présentation, ne peut aller généralement très loin et l'utilisateur a besoin de logiciels très souples lui permettant de caractériser les points observés en fonction d'algorithmes plus ou moins élaborés.

Les logiciels de classification ont pour objet de définir des classes de points

- soit de façon automatique en analysant les propriétés intrinsèques des données images (analyse des correspondances, nuées dynamiques, ...). On parle alors de méthode "non supervisée" ;
- soit par l'introduction de vérités terrain qui permettent de définir les classes associées (par leurs densités de probabilité). On parle alors de méthode supervisée.

Les logiciels de classement ont pour objet de choisir, pour chaque point des images avec le maximum de confiance, la classe à laquelle il appartient parmi les classes définies précédemment.

On trouvera ci-après une description sommaire de quelques logiciels utilisés au CNES.

4.1. Logiciels de classification

Classification automatique d'images multispectrales

Le logiciel qui permet, sans a priori, de décomposer l'image étudiée en classes homogènes quant à leurs propriétés spectrales.

Ce système est implanté :

- d'une part, sur le calculateur CDC 7600 ; il convient, en ce cas, à un traitement très rapide mais relativement rigide ;
- d'autre part, sur les calculateurs CII 10 070 ; il autorise, sous cette forme, un traitement interactif extrêmement souple, avec un encombrement mémoire minimum.

Le programme procède en deux étapes

1° Choix d'un espace de représentation qui rend compte au mieux de la structure des points de l'image. Dans cette phase, on opère une analyse factorielle des correspondances sur les réponses spectrales d'un tableau croisé dont chaque ligne représente la réponse multispectrale (codée ou non) des points d'un sous-ensemble de l'image. Les colonnes de ce tableau constituent les caractères des points analysés :

- en l'absence de codage, il y a autant de caractères que de canaux ;
- dans l'hypothèse d'un traitement avec codage, la dynamique de chaque canal est partagée en un certain nombre de niveaux que l'on ajuste de telle sorte qu'ils contiennent tous le même nombre de points. Chacun de ces niveaux (d'équipopulation) constitue un caractères.

L'analyse étant effectuée de façon séquentielle, il n'y a aucune limitation quant à la taille de l'image étudiée. L'espace factoriel étant de dimension réduite par rapport au nombre de canaux, on opère donc une compression de l'information en même temps que le regroupement des points similaires.

2° Dans cet espace, on associe à la représentation euclidienne une hiérarchie indicée ascendante des caractères représentée par un arbre.

Cet arbre peut servir après choix de niveaux de coupure,

- soit à initialiser une procédure d'agrégation autour de centres mobiles (du type "Nuées dynamiques") des représentations des points de l'image ;
- soit à effectuer une segmentation logique de l'espace en classes représentées par un ou plusieurs caractères.

Dans sa version interactive, ce programme permet des dérivations et variantes qui permettent d'orienter la classification selon le gré de l'utilisateur, notamment il est possible de visualiser les projections des points et/ou des caractères dans les plans factoriels, celles des ellipses d'inertie associées aux groupes déterminés ainsi que les images associées aux axes factoriels (combinaisons linéaires des canaux).

Méthode de classification "supervisée"

Analyse discriminante

Si on considère la réponse spectrale d'un objet (ensemble des valeurs de la luminance observée dans chacun des canaux) comme un vecteur aléatoire, l'être

mathématique qui caractérise une classe d'objets (forêt de chênes verts, herbe, zone urbaine, etc.) est sa densité de probabilité. L'algorithme de traitement utilise les zones témoins (vérité terrain) pour évaluer les densités de probabilité.

Mais la seule connaissance des "vérités terrain" n'est pas suffisante pour estimer les densités de probabilité. Il faut une information, ou une hypothèse supplémentaire. Actuellement, la plus simple, l'hypothèse Gaussienne, a été retenue. D'autres logiciels établis sur d'autres hypothèses sont en cours de développement pour contrôler la validité de la première, le logiciel développé visualise les densités de probabilité de chacun des canaux. Cette visualisation présente de nombreux intérêts :

- vérifier si les hypothèses faites sont plausibles ;
- détecter les classes qui seront facilement séparables et celles "qui se ressemblent beaucoup" ;
- déterminer les canaux qui contiennent beaucoup ou peu d'informations pour un problème déterminé.

Le programme visualise, sur un même graphique, jusqu'à quinze densités de probabilités, en utilisant différents couleurs et caractères.

4.2. Logiciels de classement

Ils utilisent :

- soit les résultats de segmentation logique sous la forme d'une matrice de décision ;
- soit des notions de distance dans les espaces définis par les logiciels de classification.

Les résultats sont stockés sur support magnétique :

- statistiques spectrales (moyennes et écarts types dans les canaux utilisés) et spatiales (surfaces absolues et relatives) ;
- images "classées" pouvant être visualisées sur différents supports noir et blanc ou couleur.

A chaque méthode est associé un test de qualité permettant de juger de la validité des traitements effectués.

4.3. Perspectives

Les programmes de classification présentés ci-dessus ne tiennent pas compte de la corrélation spatiale. Ils classent chaque point de l'image sur la base de critères spectraux, indépendamment de ses voisins. Il est intéressant d'utiliser des algorithmes prenant en compte la "reconnaissance de la texture" des objets ainsi que les dispositions relatives des paysages ou des objets reconnus pour améliorer la classification (techniques d'analyse de scènes).

Les opérations à effectuer sur les données images, acquisition, prétraitement, traitement et aide à l'interprétation, stockage des données à différents niveaux, nécessitent de disposer de calculateurs bien adaptés à ces différents problèmes et aptes à manipuler de grandes quantités de données.

L'amélioration du rapport coût calculeurs/performances passe très certainement par la mise en oeuvre d'équipements particuliers du type "processeur spécialisé" dont les algorithmes (de correction, de classement, par exemple) peuvent être câblés ou micro-programmés. Ceci améliore très sensiblement le temps d'exécution par rapport à celui que l'on peut obtenir avec les calculateurs numériques conventionnels et préservent à information-image sa structure d'octet.

Vu par le Centre National
de Documentation Agricole
00 233

PROGRAMMES DE COOPERATION DU CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES (FRANCE) EN TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

par Michèle CHEVREL

Responsable des Programmes
d'Observation de la Terre
Direction des Programmes et de la
Politique Industrielle
C.N.E.S.
129, Rue de l'Université
75007 PARIS

Séminaire de Sensibilisation
sur la Télédétection des
"Ressources Terrestres"
TUNIS les 29 et 30 octobre 1975

Vu par le Centre National
de Documentation Agricole
00 233

PROGRAMMES DE COOPERATION DU CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES (FRANCE) EN TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

par Michèle CHEVREL

Responsable des Programmes
d'Observation de la Terre
Direction des Programmes et de la
Politique Industrielle
C.N.E.S.
129, Rue de l'Université
75007 PARIS

Séminaire de Sensibilisation
sur la Télédétection des
"Ressources Terrestres"
TUNIS les 29 et 30 octobre 1975

PROGRAMMES DE COOPERATION DU CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES (FRANCE) EN TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

L'objet de cet exposé est de présenter les programmes de coopération scientifiques et techniques menés par le CNES dans le domaine de la Télédétection des Ressources Terrestres. Les programmes de météorologie et de collecte de données étant complémentaires des programmes de Ressources Terrestres, des indications seront également données dans ces deux domaines

I.- PROGRAMMES COOPERATIFS EN TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

Parallèlement au développement d'un programme national de télédétection de Ressources Terrestres qui a débuté en 1970, le CNES a également entrepris un programme de coopération.

Le but alors poursuivi était de permettre à la Communauté Française des utilisateurs d'avoir la possibilité de participer à un maximum de programmes en vue d'acquérir la compétence nécessaire pour développer, dans l'avenir, des projets plus ambitieux. Par la suite, les objectifs se sont diversifiés.

./...

PROGRAMMES DE COOPERATION DU CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES (FRANCE) EN TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

L'objet de cet exposé est de présenter les programmes de coopération scientifiques et techniques menés par le CNES dans le domaine de la Télédétection des Ressources Terrestres. Les programmes de météorologie et de collecte de données étant complémentaires des programmes de Ressources Terrestres, des indications seront également données dans ces deux domaines

I.- PROGRAMMES COOPERATIFS EN TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

Parallèlement au développement d'un programme national de télédétection de Ressources Terrestres qui a débuté en 1970, le CNES a également entrepris un programme de coopération.

Le but alors poursuivi était de permettre à la Communauté Française des utilisateurs d'avoir la possibilité de participer à un maximum de programmes en vue d'acquérir la compétence nécessaire pour développer, dans l'avenir, des projets plus ambitieux. Par la suite, les objectifs se sont diversifiés.

./...

Les programmes de coopération du CNES dans le domaine de la Télédétection peuvent être classés suivant trois types d'objectifs :

1) Favoriser la participation d'expérimentateurs français à des programmes spatiaux étrangers.

2) Proposer par accord ou par contrat à d'autres pays l'utilisation du matériel et de l'expérience dans le domaine des Ressources Terrestres acquise en France.

3) Participer à l'élaboration et à la réalisation des programmes de l'Agence Spatiale Européenne (ASE/ESA).

I.1. Objectif n° 1 :

Favoriser la participation d'expérimentateurs français à des programmes spatiaux étrangers.

Entrent dans ce cadre :

- la coopération avec la NASA,
- le contrat passé entre le GDTA[1] et la firme italienne TELESPAZIO.

I.1.1.

Pour certains de ses programmes de satellites, la NASA lance un appel aux expériences à la Communauté Scientifique Internationale.

Le CNES étant l'interlocuteur de la NASA en France, cet appel aux expériences est adressé au CNES qui est chargé d'informer les scientifiques concernés, de

(1) Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale.

./...

centraliser les propositions françaises, et de les transmettre à la NASA accompagnées d'un avis sur l'intérêt de l'expérience proposée.

En général, le CNES apporte une aide aux responsables des propositions agréées par la NASA. Cette aide peut prendre différentes formes : soit sous forme de subvention financière, soit sous forme d'assistance d'un ou plusieurs services du CNES (moyens de calcul entre autres).

Ainsi ont été retenues :

- pour le programme LANDSAT 1*:

  6 expériences françaises.**

- pour le programme LANDSAT 2*:

  1 expérience française (mais des organismes français participent également à deux autres expériences en coopération avec des organismes étrangers).

- pour le projet Earth Resource Experiment Package (EREP) de SKYLAB :

  2 expériences françaises.**

Des propositions ont été envoyées à la NASA pour les programmes :

. Heat Capacity Mapper Mission*
. Nimbus G*

* Les caractéristiques des satellites LANDSAT, Heat Capacity Mapper NIMBUS G, et de la charge utile 'Earth Resource Experiment Package' de SKYLAB, sont données dans le tableau 1 page 21.

** Les caractéristiques des expériences françaises LANDSAT et EREP sont données dans le tableau 2 page 25.

./...

Une procédure analogue sera probablement adoptée pour les autres satellites américains.

I.1.2. La politique actuelle de la NASA étant de restreindre le nombre d'expérimentateurs sélectionnés, et la firme italienne TELESPAZIO ayant pris la décision de construire une station de réception des satellites LANDSAT à Fucino, près de Rome, il a semblé souhaitable d'utiliser au maximum les possibilités de cette station. C'est pourquoi, pour faciliter l'accès des expérimentateurs français aux données LANDSAT, le CNES et l'IGN (1) ont mandaté le Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale (GDTA) pour signer fin juillet un protocole d'accord avec la firme italienne TELESPAZIO. Aux termes de cet accord, le GDTA est le distributeur en France des données LANDSAT sur la France métropolitaine.

Les utilisateurs français ayant besoin de photographies spatiales pour leurs travaux pourront ainsi les acquérir auprès du GDTA.

I.2. Objectif 2 : Mise à disposition des matériels et compétences françaises

Dans le cadre du second type de coopération, les moyens du CNES (Centre de Traitement) et du GDTA (capteurs, laboratoire photographique) ont déjà été utilisés pour des opérations de coopération pure ou ont fait l'objet de contrats commerciaux avec des organismes étrangers.

Ainsi avec la Suède, une coopération a été instaurée entre le CNES et la Swedish Space Corporation pour conduire une campagne de télédétection qui s'est déroulée en juillet 1975.

Cette opération se situe dans le cadre d'études poursuivies pour améliorer la compréhension des impacts et des activités humaines sur les éco-systèmes à haute latitude et haute altitude et ainsi améliorer la gestion des ressources naturelles.

Les objectifs spécifiques de cette expérience sont :

- d'évaluer l'utilité des techniques multispectrales dans les domaines de l'agriculture, de la forestrie et de la protection de l'environnement,

(1) IGN : Institut Géographique National

./...

- de fournir la possibilité de comparer la végétation des régions subarctiques avec celle des régions alpines et subalpines,

- d'acquérir une expérience opérationnelle de la mise en oeuvre d'un radiomètre à balayage multispectral,

- de développer des méthodes de traitement des données multispectrales.

Le déroulement de l'opération s'est effectué selon la procédure suivante :

- définition, faite en commun par des scientifiques français et suédois, des mesures et des sites-tests en France et en Suède,

- l'avion suédois était équipé du radiomètre multispectral du GDTA,

- les données recueillies sont visualisées et numérisées en partie au GDTA,

- les données acquises au-dessus des sites-tests suédois seront exploitées par des scientifiques suédois, et celles recueillies au-dessus des Pyrénées en zone alpine et subalpine, avec le même capteur, seront exploitées par des scientifiques français,

- les deux groupes compareront leurs résultats.

Par contre, pour l'opération réalisée pour le NIWARS, organisme néerlandais de Télédétection, c'est un contrat commercial qui a été conclu entre le GDTA et le NIWARS. Le GDTA a réalisé, sur des sites-tests aux Pays-Bas, des campagnes, en mars, en juin et en juillet, ayant comme thèmes : l'agriculture, la géologie et l'hydrologie.

Par ailleurs, une convention a été signée cette année, entre le CNES et le Centre Canadien de Télédétection. Cette convention prévoit que les deux organismes :

- procèderont à des échanges d'information sur leurs activités,

./...

- faciliteront l'échange de personnels qualifiés,

- inviteront les utilisateurs canadiens pour le CNES et français pour le CCT à venir poursuivre leurs travaux dans leurs installations respectives.

Depuis 1974, le CNES pratique également une nouvelle forme de coopération : il s'agit d'accueillir dans différents services du CNES ou de favoriser l'accord par des organismes français de stagiaires étrangers.

C'est ainsi qu'en 1974 et 1975, dans le cadre d'un accord signé entre le CNES et le LAPAN (organisme spatial indonésien), des stagiaires indonésiens sont venus au GDTA pour s'initier, entre autres, aux techniques de mise en oeuvre d'un laboratoire de photographies de ressources terrestres.

Par ailleurs, le CNES peut également faciliter la coopération entre scientifiques français et scientifiques étrangers, ce qui va être le cas dans le cadre de la coopération avec la Suède.

Enfin, on doit signaler que des négociations sont en cours pour transformer la station de télémesure CNES installée à Ouagadougou en une station de réception des données LANDSAT.

./...

- faciliteront l'échange de personnels qualifiés,

- inviteront les utilisateurs canadiens pour le CNES et français pour le CCT à venir poursuivre leurs travaux dans leurs installations respectives.

Depuis 1974, le CNES pratique également une nouvelle forme de coopération : il s'agit d'accueillir dans différents services du CNES ou de favoriser l'accord par des organismes français de stagiaires étrangers.

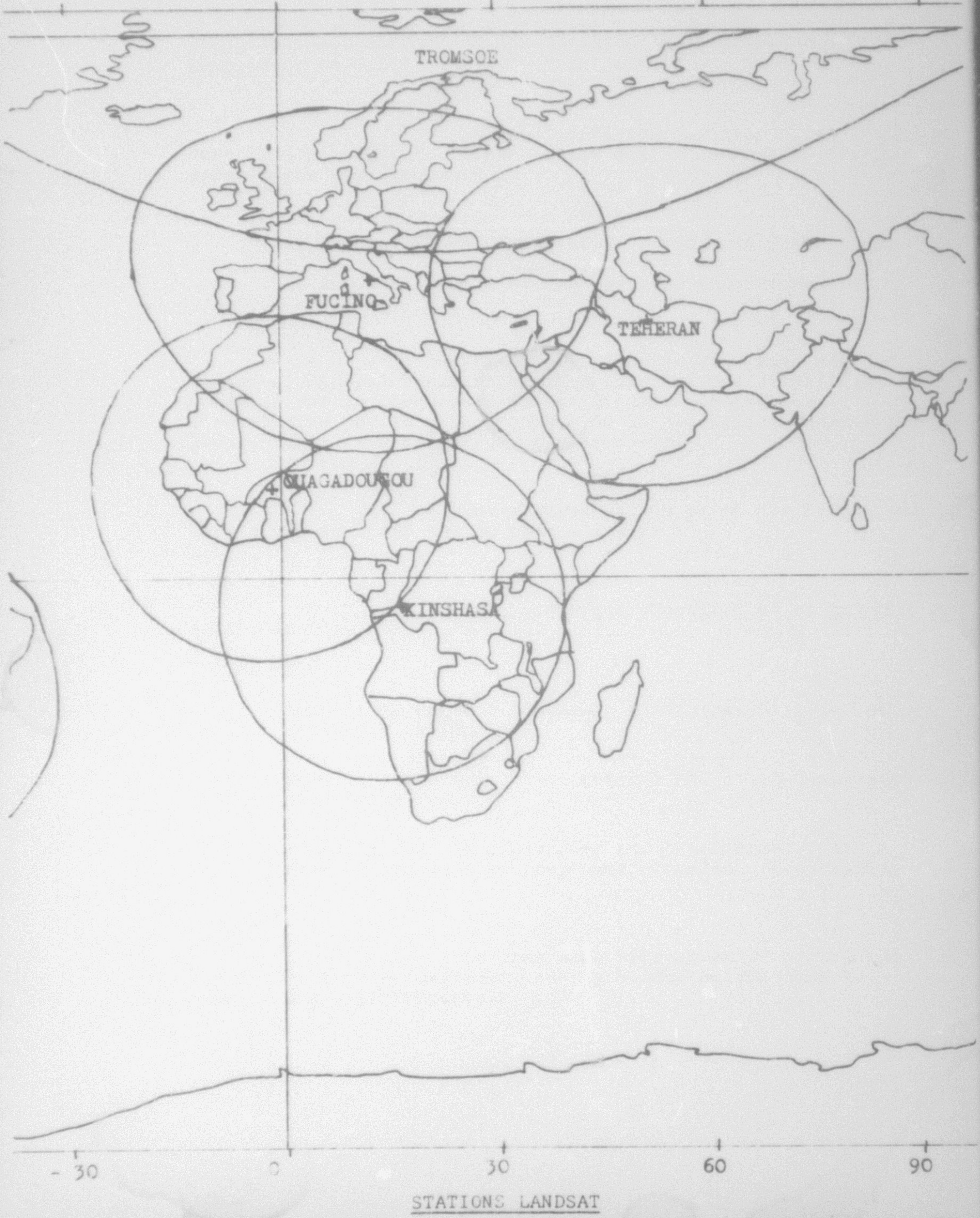
C'est ainsi qu'en 1974 et 1975, dans le cadre d'un accord signé entre le CNES et le LAPAN (organisme spatial indonésien), des stagiaires indonésiens sont venus au GDTA pour s'initier, entre autres, aux techniques de mise en oeuvre d'un laboratoire de photographies de ressources terrestres.

Par ailleurs, le CNES peut également faciliter la coopération entre scientifiques français et scientifiques étrangers, ce qui va être le cas dans le cadre de la coopération avec la Suède.

Enfin, on doit signaler que des négociations sont en cours pour transformer la station de télémesure CNES installée à Ouagadougou en une station de réception des données LANDSAT.

./...

COUVERTURE DES STATIONS DE FUCINO, TEHERAN, KINSHASA & OUAGADOUGOU



STATIONS LANDSAT

I.3. Objectif n° 3 : Participation aux travaux de l'Agence Spatiale Européenne (A.S.E.)

Le CNES participe aux travaux de l'ASE dans le domaine de la télédétection des Ressources Terrestres grâce à ses représentants :

. au Groupe ad hoc consultatif "Ressources Terrestres"

. et au Conseil de l'Agence Spatiale Européenne.

Les propositions et avis émis par le Directeur Général reposent sur les informations détaillées fournies par la communauté des utilisateurs potentiels, c'est-à-dire par le groupe ad hoc de la discipline considérée, groupe censé représenter cette communauté.

Les membres du groupe ad hoc Ressources Terrestres de l'ASE ont un rôle d'expert.

Les principaux objectifs de ce groupe ad hoc sont :

- constituer un lien d'échange d'informations sur les activités nationales,
- être le point de contact entre l'ASE et la communauté géoscientifique,
- jouer le rôle de conseiller et de promoteur pour la mise en oeuvre d'un programme européen d'écographie.

Le programme Ressources Terrestres de l'ASE s'oriente actuellement sur la télédétection dans le domaine des hyperfréquences.

./...

Ces techniques (radars et radiomètres microondes) sont en effet très prometteuses pour de nombreuses applications, mais les technologies et les méthodes de traitement sont trop complexes pour être développées à un niveau national.

II.- PROGRAMMES DE METEOROLOGIE

Les satellites météorologiques déjà en orbite ont démontré les avantages du satellite pour les prévisions météorologiques à moyen terme pour des domaines tels que l'agriculture, la sylviculture, la pêche, le transport, le tourisme, les industries de la construction.

Aujourd'hui, tous pays ou organismes équipés d'une station APT peut recevoir les satellites américains actuellement en service : NOAA 3 et 4 (voir caractéristiques dans tableau 3).

La station de la Météorologie Nationale Française installée à Lannion permet de recevoir les données transmises par ces satellites. Celles-ci ont la forme de photographies haute résolution couvrant le territoire français. L'orbite héliosynchrone des NOAA permet d'obtenir des photos d'une même région prises à 12 heures d'intervalles.

Actuellement, un système global de cinq satellites géostationnaires pourvus de caractéristiques compatibles est en cours d'installation. Ce système permettra une surveillance permanente de la surface terrestre entre les latitudes 55° N et S.

Ce système comprendra 2 satellites américains (1), 1 satellite soviétique, 1 satellite japonais et 1 satellite européen.

(1) Les deux premiers satellites de ce réseau, les satellites américains SMS-1 et SMS-2 ont été placés sur orbite par la NASA les 17 mai 1974 et 4 février 1975, et couvrent respectivement les 2 Amériques (75°W) et le Pacifique (135° W).

Ces techniques (radars et radiomètres microondes) sont en effet très prometteuses pour de nombreuses applications, mais les technologies et les méthodes de traitement sont trop complexes pour être développées à un niveau national.

II.- PROGRAMMES DE METEOROLOGIE

Les satellites météorologiques déjà en orbite ont démontré les avantages du satellite pour les prévisions météorologiques à moyen terme pour des domaines tels que l'agriculture, la sylviculture, la pêche, le transport, le tourisme, les industries de la construction.

Aujourd'hui, tous pays ou organismes équipés d'une station APT peut recevoir les satellites américains actuellement en service : NOAA 3 et 4 (voir caractéristiques dans tableau 3).

La station de la Météorologie Nationale Française installée à Lannion permet de recevoir les données transmises par ces satellites. Celles-ci ont la forme de photographies haute résolution couvrant le territoire français. L'orbite héliosynchrone des NOAA permet d'obtenir des photos d'une même région prises à 12 heures d'intervalles.

Actuellement, un système global de cinq satellites géostationnaires pourvus de caractéristiques compatibles est en cours d'installation. Ce système permettra une surveillance permanente de la surface terrestre entre les latitudes 55° N et S.

Ce système comprendra 2 satellites américains (1), 1 satellite soviétique, 1 satellite japonais et 1 satellite européen.

(1) Les deux premiers satellites de ce réseau, les satellites américains SMS-1 et SMS-2 ont été placés sur orbite par la NASA les 17 mai 1974 et 4 février 1975, et couvrent respectivement les 2 Amériques (75°W) et le Pacifique (135° W).

TABLEAU 3 - SATELLITES METEOROLOGIQUES AMERICAINS

Nom	Date de Lancement	Charges Utiles	Caractéristiques des Missions
ACTUELLEMENT EN SERVICE :			
NOAA-2 NOAA-3	15 octobre 1972 06 novembre 1973	- Scanning Radiometer . Visible (0,52 - 1,10 µ) . Infrarouge (10,5 - 12,5 µ) Ce système prend en permanence des photos de la couverture nuageuse et du sol qui sont directement transmises aux quelques 600 stations APT (Automatic Picture Transmission) actuellement en service dans une centaine de pays. - Very High Resolution Radiometer . Visible (0,6 - 0,7 µ) . Infrarouge (10,5 - 12,5 µ) a une résolution quatre fois meilleure de l'ordre de 0,9 km que le précédent. - Vertical Temperature Profile Radiometer. Ce radiomètre effectue des relevés verticaux du profil thermique de l'atmosphère sur huit niveaux (6 niveaux dans l'atmosphère, au sol, ou sur l'océan et au sommet des nuages) entre 0 et 40 km d'altitude. Il mesure l'énergie infrarouge rayonnée dans une colonne d'atmosphère à base carrée d'environ 60 x 60 km à raison d'un sondage toutes les 0,5 s, soit 12.700 sondages par orbite.	Placés sur des orbites héliosynchrones. Les données VHRR et VTPR sont reçues au Centre NOAA à Wallops Island (Virginie) et Gilmon Creek (Alaska) qui les redistribue. Mais deux pays, la Norvège et la France (CEMS de Lannion), possèdent l'équipement nécessaire pour recevoir directement les images du radiomètre à très haute résolution.

TABLEAU 3 - SATELLITES METEOROLOGIQUES AMERICAINS

Nom	Date de Lancement	Charges Utiles	Caractéristiques des Missions
ACTUELLEMENT EN SERVICE :			
NOAA-2 NOAA-3	15 octobre 1972 06 novembre 1973	- Scanning Radiometer . Visible (0,52 - 1,10 µ) . Infrarouge (10,5 - 12,5 µ) Ce système prend en permanence des photos de la couverture nuageuse et du sol qui sont directement transmises aux quelques 600 stations APT (Automatic Picture Transmission) actuellement en service dans une centaine de pays. - Very High Resolution Radiometer . Visible (0,6 - 0,7 µ) . Infrarouge (10,5 - 12,5 µ) a une résolution quatre fois meilleure de l'ordre de 0,9 km que le précédent. - Vertical Temperature Profile Radiometer. Ce radiomètre effectue des relevés verticaux du profil thermique de l'atmosphère sur huit niveaux (6 niveaux dans l'atmosphère, au sol, ou sur l'océan et au sommet des nuages) entre 0 et 40 km d'altitude. Il mesure l'énergie infrarouge rayonnée dans une colonne d'atmosphère à base carrée d'environ 60 x 60 km à raison d'un sondage toutes les 0,5 s, soit 12.700 sondages par orbite.	Placés sur des orbites héliosynchrones. Les données VHRR et VTPR sont reçues au Centre NOAA à Wallops Island (Virginie) et Gilmon Creek (Alaska) qui les redistribue. Mais deux pays, la Norvège et la France (CEMS de Lannion), possèdent l'équipement nécessaire pour recevoir directement les images du radiomètre à très haute résolution.

La contribution européenne est le satellite METEOSAT.

Initialement, METEOSAT était un programme français qui, du fait de son ampleur et de son intérêt, a été européanisé. Huit des Etats Membres (RFA, Belgique, Danemark, France, Italie, Suède et Suisse), de l'Agence Spatiale Européenne, participeront à ce programme météorologique.

Ce satellite, comme les autres satellites du réseau, fera des prises de vue, toutes les 30 mn, de la surface terrestre et de son système nuageux dans le visible et l'infrarouge simultanément avec une résolution spatiale au point subsatellite de 2,5 km dans le visible, et de 5 km dans l'infrarouge.

Un système de collecte de données est également embarqué.

Outre les applications météorologiques des applications proprement "Ressources Terrestres", apparaissent d'ores et déjà en océanographie et en géologie en particulier.

Placé sur orbite en 1977, METEOSAT (cf. tableau 4) couvrira l'ensemble de l'Europe et de l'Afrique. On remarque ici que la Tunisie est, de par sa situation géographique, particulièrement bien située dans la zone de visibilité de METEOSAT.

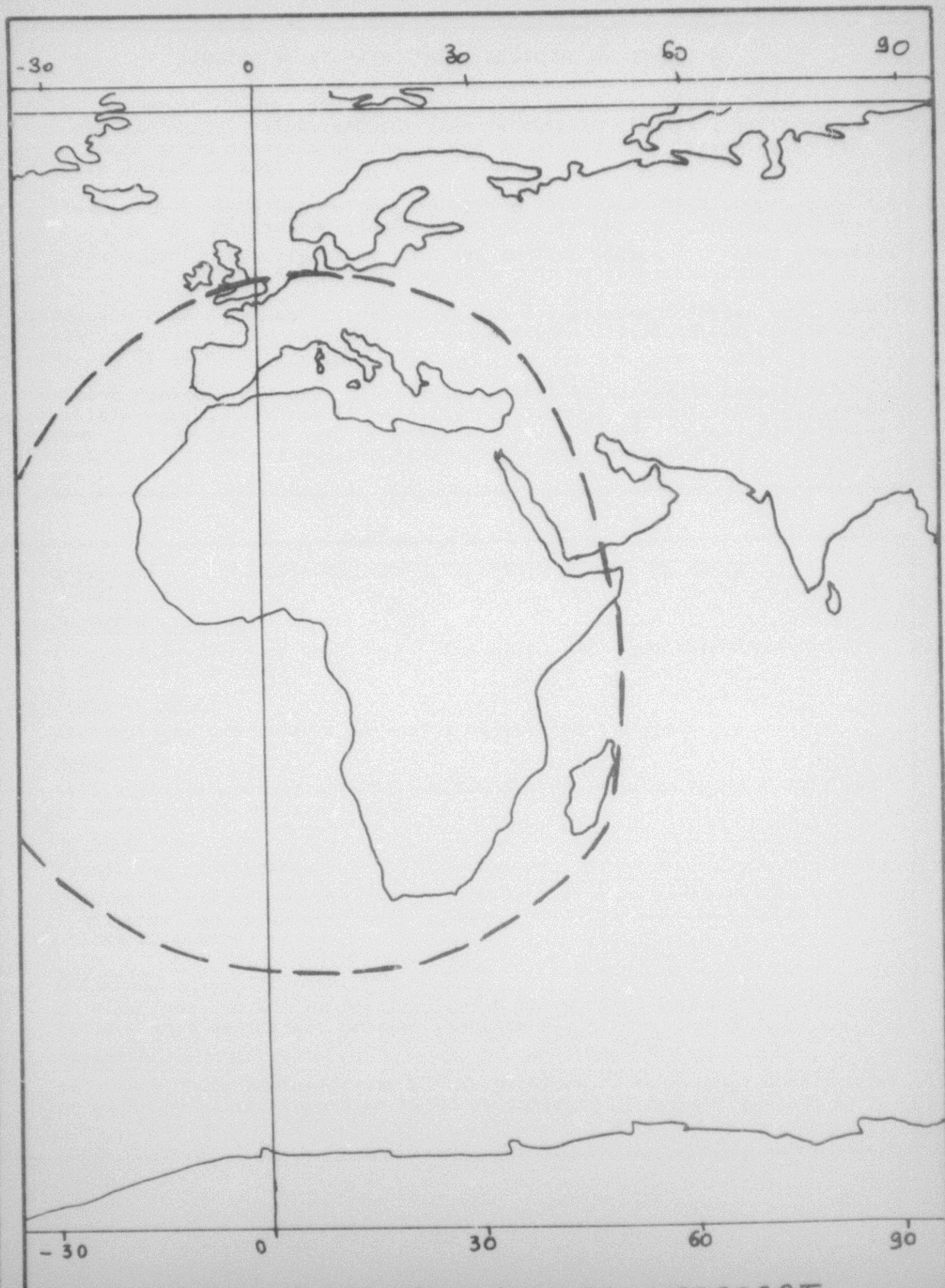
La diffusion des données est assurée via le satellite en utilisant les deux procédures suivantes :

. diffusion digitale (Visible + Infrarouge) 8 bits par point, pleine résolution spatiale et radiométrique ; la réception en sera assurée par des stations du type PDUS (Primary Data Users Stations). C'est la station de Lannion (1) qui, en France, jouera certainement ce rôle,

. diffusion analogique (Visible et Infrarouge) : pleine résolution spatiale, mais résolution radiométrique dégradée, la réception se fera par des stations du genre SDUS (Secondary Data Users Stations) équipées de stations APT.

(1) Située en Bretagne.

./...



Zone de couverture disponible METEOSAT

TABLEAU 4 - PRINCIPALES MISSIONS DE METEOSAT

Prise d'images, toutes les demi-heures, de la surface de la Terre et de son système nuageux simultanément dans le visible et dans l'infrarouge (une image produite en 25 mn toutes les 30 minutes) et transmission des données brutes au sol.

. Visible : 5000 lignes de balayage de 5000 éléments d'image chacune ; résolution géométrique : 2,5 km au point sub-satellite.

. Infrarouge : 2500 lignes de balayage de 2500 éléments d'image chacune ; résolution géométrique : 5 km au point sub-satellite.

Diffusion (sur 2 canaux interchangeables) des données traitées de l'installation centrale au sol METEOSAT aux stations d'utilisation de ces données via le satellite.

Collecte (grâce à 2 canaux d'interrogation et 66 canaux de compte rendu) et relais vers le sol via le satellite de données émanant soit de plates-formes, interrogées ou auto-programmées, fixes ou dérivantes, équipées de senseurs, soit d'un satellite gravitant sur orbite polaire.

TABLEAU 5 - PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU SYSTEME ARGOS

. Couverture :

Mondiale assurée par deux satellites placés sur orbite héliosynchrone à 830 km et inclinée à 98°

. Fonctionnement :

24h/24 (avec une moyenne de quatre relevés quotidiens).

. Durée :

1978-1986, le premier satellite TIROS-N sera lancé en janvier 1978 et le second, NOAA, en avril 1978.

. Performances :

- Collecte de données
- Recueil et transmission automatique de 4 à 32 paramètres tels que températures, pression, hygrométrie par plate-forme qu'elle soit fixe ou mobile.

. Précision :

de 3 km pour les bouées dérivantes à 5 km pour les ballons, la précision de la mesure de vitesse moyenne étant de 1,6 m/s.

. Capacité :

de 3000 à 4000 plates-formes si ces dernières sont du type localisation et de 16000 plates-formes (4 mots) en collecte de données seule.

Par ailleurs, les données numériques sont disponibles au centre de traitement spécialisé METEOSAT installé à DARMSTADT (RFA).

Grâce à des procédures de radiodiffusion, les données sont disponibles dans les deux heures suivant les prises de vue. Il est possible de les obtenir dans un délai inférieur à la journée à DARMSTADT.

Pour recevoir ou participer à METEOSAT il y a plusieurs solutions possibles. Pour la diffusion digitale (Visible et Infrarouge), il faut une station de grande dimension telle que la station STARIS équipée d'un visualisateur VIZIR construite par la SEP sous contrat de la Météorologie Nationale, géré par le Centre d'Etudes Météorologiques Spatiales de Lannion. Celle-ci comporte toutes les fonctions depuis la réception du signal comprenant le système de pointage d'antenne jusqu'à la restitution de photographies sur film en négatif ou en positif prêtes à l'exploitation.

Pour la diffusion analogique, seule une légère modification des stations APT est nécessaire. Enfin, pour des travaux de recherches où le délai d'obtention des données importe peu, des accords de coopération pourront être négociés avec les pays pourvus d'une station PDUS.

III.- PROGRAMME DE COLLECTE DE DONNEES

Outre le système de collecte de données déjà mentionné pour METEOSAT, deux autres systèmes de collecte de données et de localisation sont en cours de développement ou en projet. Il s'agit respectivement des projets ARGOS et GEOLE.

III.1. ARGOS

ARGOS est un système de localisation et de collecte de données de plates-formes automatiques par un satellite.

Réalisé par la France, il sera embarqué à bord des satellites américains TIROS N et de ses dérivés opérationnels NOAA.

Il s'agit d'un système opérationnel qui assurera un service continu durant plusieurs années (de 1978 à 1986) (cf. tableau 5 page 5).

Ce programme a fait l'objet d'un protocole tripartite signé en décembre 1974 par le CNES, la NASA et la NOAA.

Pour le CNES, ce programme fait suite au programme EOLE de localisation et de collecte de données qui a parfaitement fonctionné de 1971 à 1974. Le satellite EOLE interrogeait des plates-formes qui répondaient, la localisation était effectuée à partir des mesures de distance et de mesures Doppler.

Le système ARGOS peut être considéré comme une simplification d'EOLE, les plates-formes étant seulement émettrices et la localisation étant effectuée à partir des seules mesures Doppler. Les applications d'un tel système sont très nombreuses :

. dans les sciences de la terre (géologie, hydrologie, glaciologie, agronomie, volcanologie, etc...), et dans les sciences de l'atmosphère (météorologie, climatologie, pollution ...).

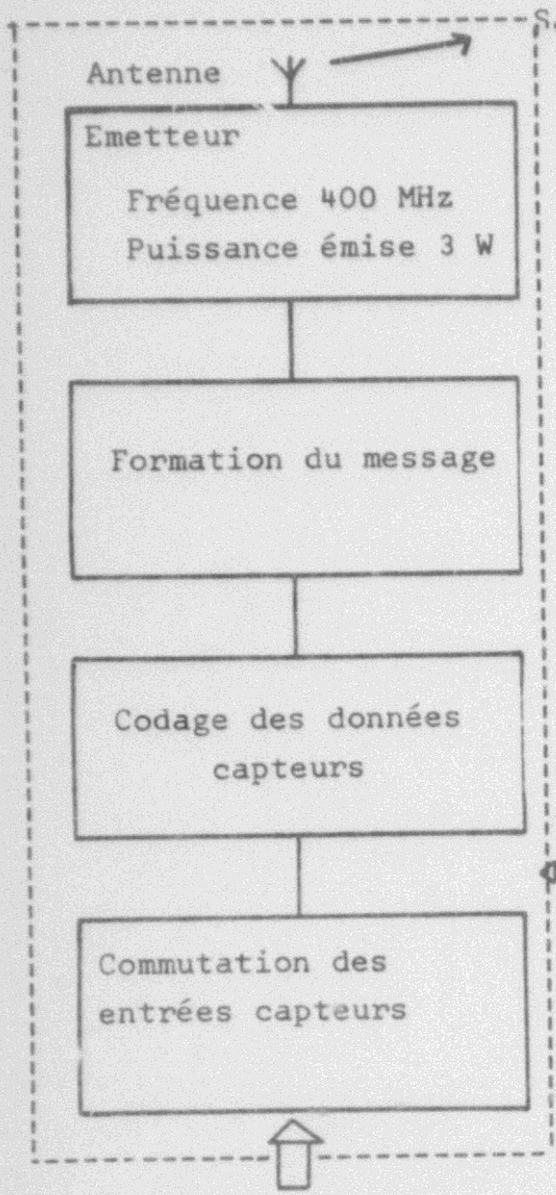
ARGOS permettra également de recueillir des données sur l'environnement et de mesurer des mouvements en n'importe quel point de la Terre de manière automatique. Les résultats seront transmis aux utilisateurs sous une forme directement exploitable dans un délai très court.

Les principales caractéristiques et le schéma de fonctionnement du système sont données dans les tableaux 6 et 7.

L'exploitation de ce système sera assurée par un service installé au centre technique du CNES à Toulouse. Cette Entité Exploitante sera chargée, entre autre, de proposer un contrat définissant la fourniture et le type de traitement (standard ou personnalisé) appliqué aux données.

./...

TABLEAU 6 - BALISES ARGOS



Masse de la balise ~ 2 kg

Le CNES a entrepris des études pour la mise au point de balises correspondant aux 3 grandes catégories d'application du système ARGOS :

. balises destinées à des ballons (météorologie),

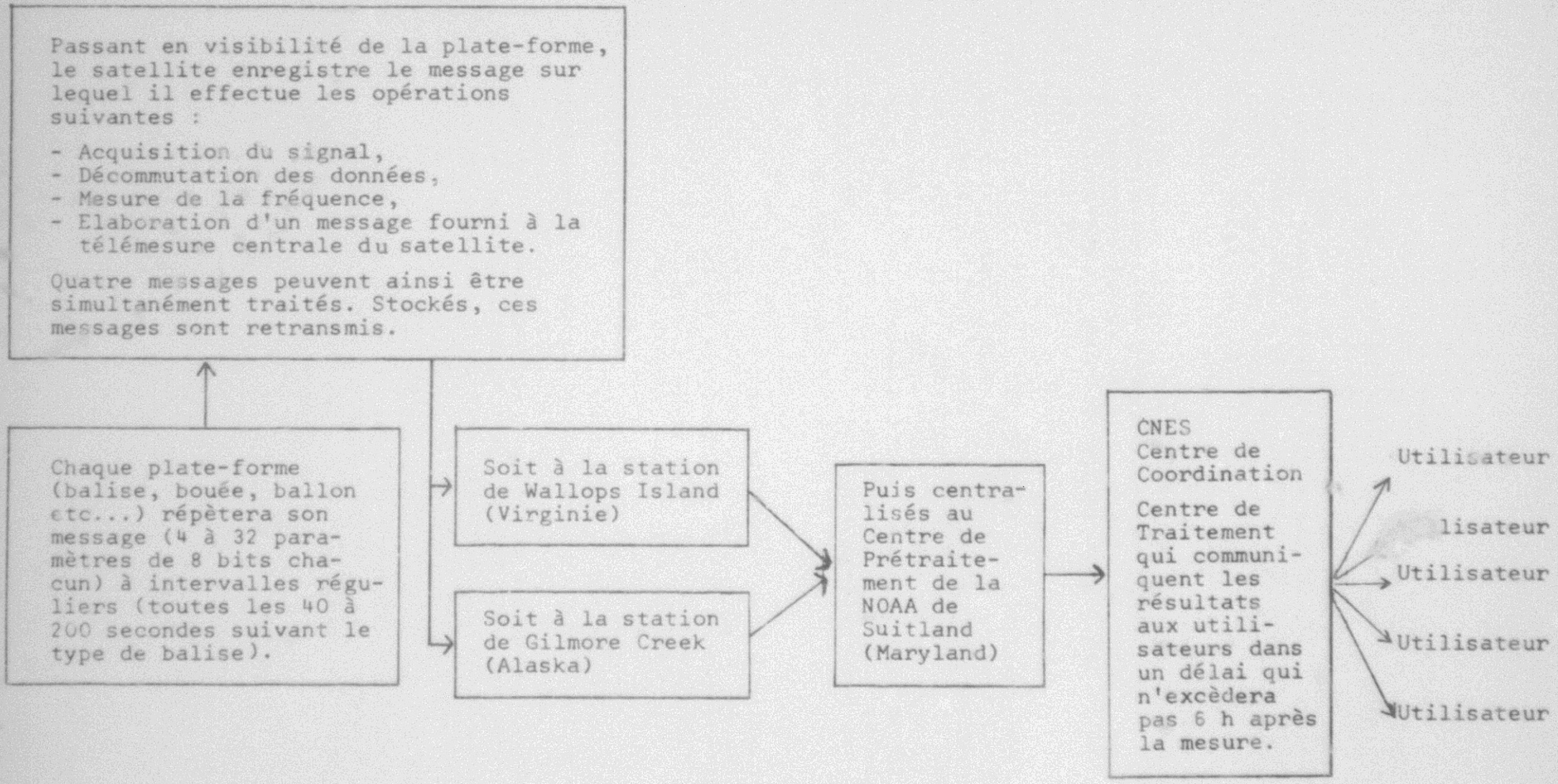
. balises placées sur des bouées fixes ou dérivantes (océanologie, météorologie),

. balises fixes terrestres (météorologie, hydrologie, vulcanologie, etc...).

Chaque utilisateur aura la possibilité de concevoir et de fabriquer ses balises à condition qu'elles satisfassent un certain nombre de spécifications.

./...

TABLEAU 7 - SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME ARGOS



III.2. GEOLE

Les immenses besoins mondiaux pour la création ou la redéfinition des réseaux géodésiques, base indispensable d'une exploitation rationnelle des ressources naturelles et d'un aménagement du territoire au service de l'homme, peuvent être remplis par la mise en place d'un système opérationnel de localisation de haute précision, accessible à tous, et d'une mise en oeuvre sur le terrain la plus simple possible.

Les techniques spatiales ont atteint le niveau nécessaire pour fournir ce service et c'est dans cette perspective que le CNES, en liaison avec la communauté des utilisateurs, a conçu et défini le système GEOLE (cf. tableau 8).

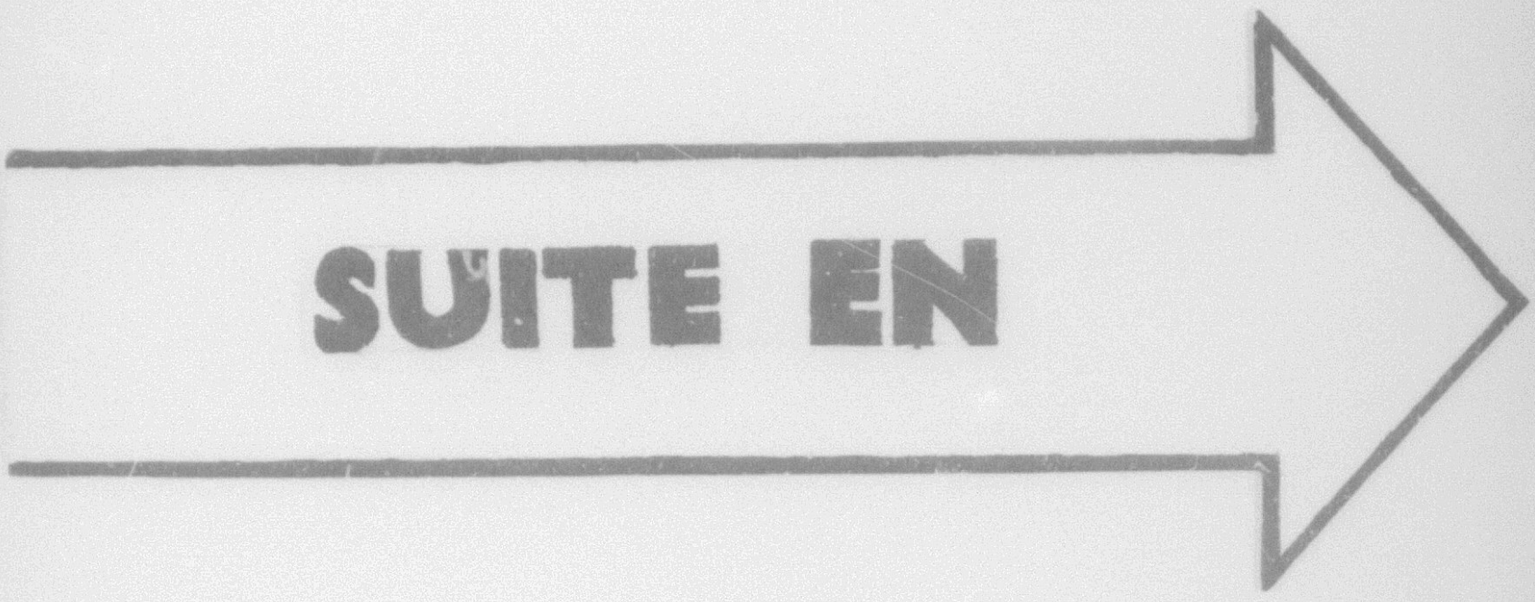
Le principe de fonctionnement du système GEOLE est issu, comme pour ARGOS, de l'expérience acquise par le satellite EOLE : des répondeurs au sol de conception simple sont interrogés séquentiellement par le satellite et des mesures aller et retour de distance et de vitesse radiale sont effectuées et stockées à bord du satellite. Après traitement au sol, le résultat est retransmis à l'utilisateur par l'intermédiaire du satellite. Le fonctionnement des répondeurs au sol est totalement automatique.

Les performances du système de mesure permettent d'obtenir une précision absolue meilleure que un mètre sur les trois dimensions en 24 heures en tout point du globe et par tout temps. Les résultats sont disponibles sur le terrain 24 heures après la fin des mesures.

Système civil mis à la disposition de la communauté mondiale, GEOLE devrait être entre autre le système idéal, dans les années 1980, pour les utilisations géodésiques telles que recherches minières, exploitation pétrolière, grands travaux d'équipement dans les pays neufs dont la cartographie détaillée est très peu avancée.

GEOLE a été proposé par la France à ses partenaires européens au sein de l'Agence Spatiale Européenne. Le programme de développement comprend le lancement et l'exploitation d'un premier satellite préopérationnel vers 1980 si une décision est prise rapidement.

./...



F 2

MICROFICHE N°

00230

République Tunisienne

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

CENTRE NATIONAL DE

DOCUMENTATION AGRICOLE

TUNIS

الجمهورية التونسية

وزارة الفلاحة

المركز القومي
للتوثيق الفلاحي

تونس

F 2

TABLEAU 8 - MISSIONS DE GEOLE

- Mission principale : Localisation précise automatique de points fixes pour des applications de Géodésie, de Topographie et de Cartographie.

. Positions fournies avec une précision de un mètre (dans les trois dimensions) dans un système de référence mondial unique géocentrique.

. Résultats obtenus en 24 heures et disponibles sur le site ou ailleurs dans un délai très court, c'est-à-dire moins de 24 heures après la dernière mesure.

. Fonctionnement par tout temps, en tout point du globe, quelles que soient les conditions d'environnement au sol.

. Equipement au sol conçu pour les opérations sur le terrain, transportable et simplifiant au maximum l'intervention humaine.

. Service continu de grande fiabilité.

. Coût d'utilisation compétitif.

- Missions secondaires :

. Localisation immédiate avec une précision de 10 mètres.

. Recalage de navigation : 20 à 30 mètres (coordonnées horizontales)
et 5 à 10 cm/s (vitesse horizontale)

. Géodésie scientifique :

- définition d'un système de référence mondial géocentrique permanent,
- rattachement des réseaux géodésiques régionaux,
- rotation de la Terre et mouvement du pôle,
- mouvements et déformations de la croûte.

./...

Le système GEOLE opérationnel qui prendrait la suite, est destiné à couvrir les besoins au cours de la décade 1980 - 1990. Son financement est à l'étude.

La mission de GEOLE à caractère civil et international permet d'envisager l'ouverture des phases de développement et d'exploitation à une large participation d'Etats non européens.

Ainsi, les programmes que nous venons d'évoquer vont permettre aux scientifiques français et aux scientifiques étrangers d'utiliser au mieux les techniques spatiales dans des domaines très variés. Et, avantage non négligeable, ils vont donner naissance à des accords de coopération créant ou renforçant les liens existant entre les communautés scientifique et technique des pays concernés.

TABLEAU I - SATELLITES DE RESSOURCES TERRESTRES AMERICAINS

Nom du Satellite	Date de Lancement	Objectifs	Charge utile	Caractéristiques des Missions
PROGRAMME TERMINE SKYLAB-EREP Earth Resources Experiment Package.	14 mai 1973 Fin de l'expérience 08 février 1974 Mise en orbite de la station : 14 mai 1973 Mission n° 1 (SL 2) : 25 mai 1973 22 juin 1973 Mission n° 2 (SL 3) : 18 juillet 73 25 septembre 73 Mission n° 3 (SL 4) : 16 novembre 73 08 février 74	- Complémentaires des objectifs de LANDSAT en ce qui concerne la discipline étudiée - évaluation des possibilités des capteurs embarqués en vue de leurs éventuelles modifications avant leur utilisation dans des programmes ultérieurs (EOS, SEASAT, etc...)	- Multispectral photographic . Multispectral photographic Camera (0,4 - 0 9 µ) . Earth Terrain Camera (0,4 - 0,88µ) - Infrared Spectrometer (0,4 - 2,5, 6,6 - 16 µ) - Multispectral Scanner (0,41 - 1,35 - 1,48 - 2,43 - 10,2 - 12,5µ) - Microwave radiometer scatterometer and Altimeter (13,8 - 14,0 GHz) - L-Band Microwave Radiometer (1,42 GHz)	Trois équipages de trois astronautes chacun se sont relayés à bord de SKYLAB et ont totalisé 171 jours de présence dans la station orbitale.
PROGRAMMES ACTUELLEMENT EN SERVICE LANDSAT-1 LANDSAT-2	23 juillet 1972 22 janvier 1975	- Inventaire et prévisions agricoles. - Cartographie de l'utilisation des sols. - Cartographie des eaux de surface. - Etude de l'eutrophisation des lacs.	- Radiomètre multispectral . 0,5 - 0,6 µ . 0,6 - 0,7µ . 0,7 - 0,8µ . 0,8 - 1,1µ	Orbite : 900 km circulaire héliosynchrone 9h30 m noeud descendant. Répétitivité de passage : 18 jours. ./...
		- Cartographie des frontières des glaces de mer et de leurs mouvements.	Résolution spatiale : 80 m Largeur de champ : 185 km - 3 caméras RBV 0,475µ → 0,575µ 0,580µ → 0,680 µ 0,690µ → 0,830 µ - Dimension de la ligne 45 m au sol. - Largeur de champ : 185 - 185 km - Système de collecte de données : 8 canaux - 400 MHz - Enregistreur magnétique. Remarque : Le système RBV de LANDSAT-1 n'a pas fonctionné.	Remarque : Placés à 180° l'un de l'autre LANDSAT 1 et 2 permettent d'obtenir une répétitivité de 9 jours.
PROJETS Heat Capacity Mapping Mission (H.C.M.M.) (Applications Explorer Mission - A)	1977 - 1978	- Discrimination des types de roches et localisation des ressources. - Mesure de l'humidité des sols. - Cartographie thermique des effluents.	- Radiomètre à deux canaux. 10,5 - 12,5µ Précision : 0,7°K 0,5 à 1,1 µ Précision : 0,1mm/cm2	Orbite circulaire à 600 km héliosynchrone 14 h au noeud ascendant. Répétitivité de passage : 1,5 j à 3,5 j. Durée de vie : 1 an

Nom du Satellite	Date de Lancement	Objectifs	Charge utile	Caractéristiques des Missions
		- Recherche géothermique. - Etude des champs de neige pour les prévisions du bilan en eau	- Résolution spatiale : 500 m x 500 m	Fonctionnement en temps réel en bande S.
LANDSAT-C	Octobre 1977	Prolongement des expériences LANDSAT 1 et 2.	Identique à LANDSAT-2 avec un canal thermique en plus.	Identique à LANDSAT-2
NIMBUS G	1978	- Etude de la pollution atmosphérique. - Océanographie : . mesure de la température de surface . couleur de l'eau . température et interface atmosphérique. - Etude de l'environnement ozone bilan radiatif terrestre.	- Radiomètre millimétrique : . 4 bandes entre 10,69 et 39 GHz . bande balayée : 600 km . Résolution spatiale 20 à 60 Km. - Radiomètre visible et infrarouge . cinq bandes entre 0,443 et 0,8 μ . une bande 10,5 à 12,5 μ Bande balayée : 1000 km Résolution spatiale 800 m. Autres senseurs : . sondeurs stratosphérique et mésosphérique pour déterminer les profils de pression et les constituants mineurs entre 15 et 100 km. . sondeur de température et de constituants mineurs entre 15 et 70 km. . capteurs dans l'UV pour mesurer la teneur en ozone. . Mesures de la constante solaire. . Mesures entre 5 et 10 pour déterminer la teneur en CO_2 , SO_2 , NO_2 et OH_2 , NH_3 , aérosols.	
ERSOS (Non décidé)	1978	LANDSAT domestique	Identique à LANDSAT 2	Identique à LANDSAT 2
EOS (Non décidé)	1980	- Prévision agricole - Expérience de contrôle de l'irrigation - Cartographie plus fine de l'utilisation des terres.	. Thematic mapper 7 canaux : 0,5 μ - 0,6 μ 0,6 μ - 0,7 μ 0,7 μ - 0,8 μ 0,8 μ - 1,1 μ	Orbite : 900 km circulaire, héliosynchrone à 9h30 au noeud descendant. Répétitivité de passage : 18 jours.

Nom du Satellite	Date de Lancement	Objectifs	Charge utile	Caractéristiques des Missions
		- Planification régionale du bilan des ressources en eau. - Contrôle côtier des estuaires et des océans. - Détermination des sources de pollution sol et eau	1,55 µ - 1,75 µ 2,08 µ - 2,35 µ 10,4 µ - 12,6 µ - Dimension de la tache au sol : . Visible à Infrarouge moyen : 30 à 50 m . Infrarouge thermique : 90 à 100 m Zone balayée : 180 km . High Resolution table imager 4 canaux : 0,5 µ - 0,6 µ 0,6 µ - 0,7 µ 0,7 µ - 0,8 µ 0,8 µ - 1,1 µ Dimension de la tache au sol : 10 à 20 m Zone balayée (orientable) : 36 km Système de collecte de données.	

REMARQUES :
Le programme prévoit 17 vols utilisant 4 satellites réparables (utilisation de la Navette Spatiale). Dans les missions futures est prévu l'embarquement d'un radar latéral en bandes X et L. EOS servira à des missions météorologiques et océanographiques.

SEOS	1985	- Surveillance continue d'évènements comme les tremblements de terre, les innondations, les feux. - Dynamique des estuaires.	- Large Earth Survey Telescope. - Plusieurs bandes à déterminer entre 0,2 et 15 µ - Résolution spatiale : 100 m dans le visible - 800 m dans l'infrarouge thermique. - Caméra RBV entre 0,4 et 0,9 sur un champ de 1000 x 1000 km résolution 200 m, de 200 x 200 km résolution : 40 m. - Collecte de données.	Satellite géostationnaire. Pas d'enregistreur magnétique.
SEASAT (Décidé)	1978	- Mesure du géoïde. - Surveillance de l'état de la mer. - Localisation et cartographie des frontières des courants. - Cartographie des glaciers, détecteur de nappes d'huile, étude d'effluents,...	. Radar altimétrique à impulsions, tache au sol : 27 km sous la trace du satellite fréquence : 13,9 GHz ($\Longrightarrow$ mesure de la hauteur des vagues et du géoïde $\pm$ 0,3 m). . Scattéromètre (mesure des vents de surface de 15 à 20 m/s) fréquence : 13 GHz. . Deux directions : 10° et 35° . Tache image $\lesssim$ 50 km	Orbite : 800 km circulaire polaire. Répétitivité : 2 jours (?) Durée de vie : 2 ans Fréquence de télémesure des données scientifiques en bande S. Enregistreur magnétique embarqué non utilisé pour les données radar imageur.

Nom du Satellite	Date de Lancement	Objectifs	Charge utile	Caractéristiques des Missions
		- Planification régionale du bilan des ressources en eau. - Contrôle côtier des estuaires et des océans. - Détermination des sources de pollution sol et eau	1,55 µ - 1,75 µ 2,08 µ - 2,35 µ 10,4 µ - 12,6 µ - Dimension de la tache au sol : . Visible à Infrarouge moyen : 30 à 50 m . Infrarouge thermique : 90 à 100 m Zone balayée : 180 km . High Resolution table imager 4 canaux : 0,5 µ - 0,6 µ 0,6 µ - 0,7 µ 0,7 µ - 0,8 µ 0,8 µ - 1,1 µ Dimension de la tache au sol : 10 à 20 m Zone balayée (orientable) : 36 km Système de collecte de données.	

REMARQUES :
Le programme prévoit 17 vols utilisant 4 satellites réparables (utilisation de la Navette Spatiale). Dans les missions futures est prévu l'embarquement d'un radar latéral en bandes X et L. EOS servira à des missions météorologiques et océanographiques.

SEOS	1985	- Surveillance continue d'évènements comme les tremblements de terre, les innondations, les feux. - Dynamique des estuaires.	- Large Earth Survey Telescope. - Plusieurs bandes à déterminer entre 0,2 et 15 µ - Résolution spatiale : 100 m dans le visible - 800 m dans l'infrarouge thermique. - Caméra RBV entre 0,4 et 0,9 sur un champ de 1000 x 1000 km résolution 200 m, de 200 x 200 km résolution : 40 m. - Collecte de données.	Satellite géostationnaire. Pas d'enregistreur magnétique.
SEASAT (Décidé)	1978	- Mesure du géoïde. - Surveillance de l'état de la mer. - Localisation et cartographie des frontières des courants. - Cartographie des glaciers, détecteur de nappes d'huile, étude d'effluents,...	. Radar altimétrique à impulsions, tache au sol : 27 km sous la trace du satellite fréquence : 13,9 GHz ($\Longrightarrow$ mesure de la hauteur des vagues et du géoïde $\pm$ 0,3 m). . Scattéromètre (mesure des vents de surface de 15 à 20 m/s) fréquence : 13 GHz. . Deux directions : 10° et 35° . Tache image $\lesssim$ 50 km	Orbite : 800 km circulaire polaire. Répétitivité : 2 jours (?) Durée de vie : 2 ans Fréquence de télémesure des données scientifiques en bande S. Enregistreur magnétique embarqué non utilisé pour les données radar imageur.

Nom du Satellite	Date de Lancement	Objectifs	Charge utile	Caractéristiques des Missions
		- Planification régionale du bilan des ressources en eau. - Contrôle côtier des estuaires et des océans. - Détermination des sources de pollution sol et eau	1,55µ - 1,75µ 2,08µ - 2,35µ 10,4 µ - 12,6µ - Dimension de la tache au sol : . Visible à Infrarouge moyen : 30 à 50 m . Infrarouge thermique : 90 à 100 m Zone balayée : 180 km . High Resolution table imager 4 canaux : 0,5µ - 0,6µ 0,6µ - 0,7µ 0,7µ - 0,8µ 0,8µ - 1,1µ Dimension de la tache au sol : 10 à 20 m Zone balayée (orientable) : 36 km Système de collecte de données.	

REMARQUES :
Le programme prévoit 17 vols utilisant 4 satellites réparables (utilisation de la Navette Spatiale). Dans les missions futures est prévu l'embarquement d'un radar latéral en bandes X et L. EOS servira à des missions météorologiques et océanographiques.

SEOS	1985	- Surveillance continue d'évènements comme les tremblements de terre, les innondations, les feux. - Dynamique des estuaires.	- Large Earth Survey Telescope. - Plusieurs bandes à déterminer entre 0,2 et 15µ - Résolution spatiale : 100 m dans le visible - 800 m dans l'infrarouge thermique. - Caméra RBV entre 0,4 et 0,9 sur un champ de 1000 x 1000 km résolution 200 m, de 200 x 200 km résolution : 40 m. - Collecte de données.	Satellite géostationnaire. Pas d'enregistreur magnétique.
SEASAT (Décidé)	1978	- Mesure du géoïde. - Surveillance de l'état de la mer. - Localisation et cartographie des frontières des courants. - Cartographie des glaciers, détecteur de nappes d'huile, étude d'effluents,...	. Radar altimétrique à impulsions, tache au sol : 27 km sous la trace du satellite fréquence : 13,9 GHz (⟹ mesure de la hauteur des vagues et du géoïde ± 0,3 m). . Scattéromètre (mesure des vents de surface de 15 à 20 m/s) fréquence : 13 GHz. . Deux directions : 10° et 35° . Tache image ≤ 50 km	Orbite : 800 km circulaire polaire. Répétitivité : 2 jours (?) Durée de vie : 2 ans Fréquence de télémesure des données scientifiques en bande S. Enregistreur magnétique embarqué non utilisé pour les données radar imageur.

Nom du Satellite	Date de Lancement	Objectifs	Charge utile	Caractéristiques des Missions
			- Deux champs balayés à 450 km de large. . Radiomètre millimétrique passif (mesure de la température de surface à ± 15°C, des vents de surfaces entre 10 et 50 m/s à 20 % , cartographie des glaciers). Multifréquence (≥ 4 GHz, ≥ 21 GHz, ≤ 35 GHz + tache au sol 15 à 100 km (selon la fréquence). Zone balayée 900 km. . Radiomètre infrarouge thermique (température de surface à 1° par ciel clair). Résolution spatiale : 1 à 7 km. Zone balayée : 1500km . Radar imageur (⇒ spectre directionnel des vagues > 50 m de long, glaces, hydrocarbure, courant de surface).	
			Résolution spatiale : 25 à 100 m. Zone balayée : 100 à 200 km de chaque côté du satellite.	

TABLEAU II - EXPERIENCES FRANCAISES REALISEES A BORD DE SATELLITES AMERICAINS

Nom du Satellite	Nom de l'Expérience	Investigateurs	Objectifs
LANDSAT-1 23 juillet 72	AFNICA (Aménagement des Ressources Naturelles par Inventaire Cartographique Automatique).	Professeur REY du Service de la Carte de la Végétation, associé aux membres du Groupe Toulousain de Télédétection : le Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements, et divers laboratoires de l'Université Paul Sabatier de Toulouse.	. Etablir un code de correspondance entre les images spatiales et la vérité-sol telle que celle fournie par les cartes agronomiques et géologiques. . Exploiter l'information sous forme numérique pour transcrire automatiquement les signatures spectrales des ressources naturelles de régions tempérées.
	PYRALP (Pyrénées - Alpes)	Institut Français du Pétrole associé au Centre de Géographie Appliquée de l'Université de Strasbourg et au Bureau de Recherches Géologiques et Minières.	. Apport de l'image spatiale pour l'étude géologique de la relation tectonique entre deux grands massifs montagneux.
	GOLION (Golf du Lion)	Ecole Nationale Supérieure du Pétrole et des Moteurs, associé au Centre de Recherches de Pau.	. Etude de la sédimentation ancienne et récente dans le Golf du Lion et évolution du Delta du Rhône au cours des âges.
	POLUMER (Pollution de la mer)	Institut Français du Pétrole.	. Etude du processus de pollution de la mer par les hydrocarbures.
	FRALIT (French Atlantic Littoral)	Professeur VERGER du Laboratoire de Géomorphologie de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, associé à l'Institut Géographique National et au Laboratoire de Pédologie de l'Université de Poitiers.	. Etude de la Côte Atlantique de la France couvrant l'océan (courants sédimentologie) et les terres basses (marais salés).
	Etudes géologiques minérales dans le Massif Central, au Dahomey, au Portugal et à Madagascar.	Bureau de Recherches Géologiques et Minières, associé à l'Institut Français du Pétrole et à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.	. Etudes sur des zones tests en vue d'évaluer l'apport en géologie des images multispectrales à petite échelle.
SKYLAB EREP (Earth Resources Experiment Package) 14 mai 1973	PYRALP	Institut Français du Pétrole	. Comparaison avec les documents obtenus avec LANDSAT-1 pour l'étude des relations géologiques entre les massifs montagneux des Pyrénées et des Alpes.
	METEOROLOGIE	Direction de Météorologie Nationale Directeur : A. VILLEVIEILLE	. Etude des relations entre les radiations terrestres (données collectées par des satellites météorologiques) et différents phénomènes météorologiques, essentiellement organisation des masses nuageuses, répartition de la pluie et la fonte des neiges.
LANDSAT 2 22 janvier 1975	FRALIT-B	Mêmes investigateurs que pour FRALIT-A sur LANDSAT-1.	. Prolongement et extension du projet FRALIT A : étude multidisciplinaire du littoral atlantique français.
	AGRESTE (Agricultural Resources Investigation in Northern Italy and Southern France).	Communauté Economique Européenne associée du côté français : au Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements au Service de la Carte de la Végétation, au Centre d'Etude et d'Aménagement des Ressources Naturelles et à l'Institut National de la Recherche Agronomique (Centre de Versailles) ; du côté italien : aux divers Instituts spécialisés dans le riz ou les forêts.	. Inventaire, prévision de récoltes et détection des maladies en riziculture. . Evaluation du volume de bois et la différenciation des clônes dans les peupleraies. . Inventaire des hêtraies et des résineux de plantation.
	SAPHYR	Ministère de l'Industrie et des Travaux Publics de la République du Mali associé à l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre Mer (ORSTOM) et au Bureau pour le Développement de la Production Agricole (BDPA).	. Etude de l'hydrologie de surface pour mieux comprendre les processus de remplissage et de vidage du Niger. . Suivi des changements annuels d'exploitation agricole des zones incendiées ou non. . Etude de la végétation naturelle.

REPUBLIQUE TUNISIENNE
MINISTERE DE L'AGRICULTURE
DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU ET EN SOL
DIVISION DES SOLS

Vu par le Centre National
de Documentation Agricole
00 234

SEMINAIRE DE SENSIBILISATION

«LA TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES»

TUNIS 29 - 30 OCTOBRE 1975

L'UTILISATION DES PHOTOS ERTS EN CARTOGRAPHIE THEMATIQUE

UN EXEMPLE PRATIQUE D'UTILISATION :

LA CARTE D'EROSION DU BASSIN VERSANT DES OUEDS ZEROUD - MERGUELLIL

PAR

A. SOUISSI Pédologue – Division des Sols

/7 ' UTILISATION DES PHOTOS E.R.T.S. EN CARTOGRAPHIE THEMATIQUE

UN EXEMPLE PRATIQUE DE CETTE UTILISATION : CARTE D'EROSION

INTRODUCTION.

L'utilisation de la télédétection pour expliquer les phénomènes globaux de la nature a contribué et contribue encore au développement de l'écologie autant que le microscope électronique en Biologie. Ceci explique l'étendue de son champ d'application dans toutes les sciences qui étudient l'inventaire des ressources terrestres (Géologie, Hydrologie, Pédologie etc...).

La Télédétection se caractérise par sa vision synthétique et objective et contribue à la réalisation d'études. Elle permet rapidement et économiquement la collecte des informations sur des grandes surfaces. Nous n'allons pas dans cette communication exposer toutes les techniques et les applications de la Télédétection, mais contentons-nous tout simplement de voir l'utilité des photos E.R.-T.S. dans le domaine de la cartographie Thématique. Une simple interprétation classique sans passer par l'exagération de contrasts la Digitalisation etc... pourrait-elle être suffisante pour la réalisation de cartes Thématiques à petites échelles (carte de sol, végétations, d'érosion etc...).

Principe de l'Utilisation des Photos E.R.T.S.

Depuis plus de vingt ans, la principale activité de la Division des Sols a été l'inventaire des sols du pays. Cet inventaire a permis d'avoir des renseignements importants sur les sols de Tunisie (cartes, notes, thèses études complètes etc...). Mais ces cartes et ces études sont faites à des échelles différentes (1/50.000° - 1/100.000° etc...) et dont la synthèse pose un problème majeur dû à leur complexité. D'ailleurs les difficultés rencontrées lors de la réalisation de la Tunisie au 1/500.000° proviennent essentiellement du manque de documents synthétiques à petites échelles (1/200.000°). Pour éliminer cet obstacle on a pensé à l'utilisation des photos E.R.T.S. pour la cartographie à petite échelle. Celles-ci nous donnent un aperçu synthètique des sols. Leur échelle actuelle 1/1.000.000° pourrait être aggrandie au 1/200.000° sans trop d'inconvenients. Le principe essentiel dans leur utilisation est la délimitation des zones homogènes qu'on caractérisera par la suite suivant le thème envisagé. (Sol, Végétation, Erosion etc...). En ce qui concerne la Pédologie on pourrait à partir des documents existants déjà à la Division des Sols identifier pédologiquement ces zones homogènes et on aboutit ainsi à obtenir facilement des cartes à petite échelle très synthétiques.

.../...

Jusqu'à présent, la délimitation des zones homogènes est faite par une interprétation classique se basant sur les différences de tons et d'aspects; mais l'incorporation de nouvelles techniques (Color composite, Digitalisation etc...) donne plus de précision a nos limites.

Nous pouvons nous contenter à l'heure actuelle d'interpréter visuellement les photos E.R.T.S. prises sur des bandes différentes du spectre électro-magnétique. Sachant que la réponse d'une portion de terrain est différente suivant la bande spectrale avec laquelle elle est prise, on peut multiplier nos moyens d'investigation pour délimiter les zones homogènes en opérant par comparaison. Partant de ces reflexions générales sur la cartographie thématique, la Division des Sols s'est servie des photos E.R.T.S. pour la réalisation d'une étude sur l'érosion des Bassins-Versants des Oueds Zéroud et Merguellil. Cette étude que nous allons reprendre dans cette communication et servant comme exemple pratique d'utilisation des photos E.R.T.S. est réalisée par J.Y. LOYER et AH. SOUISSI et classée à la Division des Sols sous le Numéro 493.

CARTE DE L'EROSION DES BASSINS-VERSANTS DES OUEDS ZEROUD - MERGUELLIL

PAR J.Y. LOYER et AH. SOUISSI

BUT DE L'ETUDE :

Depuis que le site du Barrage de Sidi Saâd est connu on ne cesse de se préoccuper des moyens à mettre en oeuvre pour empêcher l'atterrissement dans la retenue du futur barrage. Celui ci doit être construit sur l'Oued Zéroud drainant un bassin versant de plus de 8.500 Km^2. Les interventions à l'amont de la retenue attenueraient son envasement et par conséquent prolongeraient la vie du barrage.

Conscient de la gravité du problème, le Gouvernement Tunisien a invité les Techniciens à déterminer l'origine des transports solides et à localiser les zones les plus sensible à l'érosion pour leur accorder une certaine priorité de traitement antiérosif. Pour dégrossir le problème, on a pensé préparer un document général à petite échelle au 1/200.000° permettant d'orienter par la suite nos futures recherches plus détaillées.

METHODOLOGIE :

Devant la complexité du problème plusieurs démarches ont du être tentée pour résoudre ce dernier.

.../...

L'idéal serait de connaître les débits solides à l'exutoire de Sidi Saâd pour nous donner une idée globale du phénomène et aux exutoires de chaque sous-bassin pour pouvoir les classer par ordre de priorité d'intervention de traitement antierosif. Or ces données nous manquent.

A part quelques estimations globales détruites à la suite des inondations de l'année 1969, il n'existe que quelques données régulières hydrologiques quantitatives à l'exutoire général de Sidi Saâd et presque aucune donnée concernant les autres exutoires.

Une seconde approche a été faite en considérant les divers facteurs qui conditionnent l'érosion, en essayant de préciser leur contribution au phénomène d'envasement.

Pour essayer cette démarche, on a invité les spécialistes de chaque discipline à établir des cartes de lithologie, des pentes, de couvert végétal, de précipitations, de sols, de ruissellement etc... Ces cartes ont été réalisées avec une précision suffisante vue l'échelle adaptée au 1/200.000° mais des difficultés se sont présentées lors de leur synthèse; car il s'agit de données subjectives et ne traduisant nullement l'érosion elle-même qui est le résultat intégré de tous ces facteurs. Malgré l'attribution d'un coefficient d'érosion au niveau de chaque discipline toutes nos tentatives de synthèse ont été vaines. En outre tous les facteurs de l'érosion n'étaient pas considérés, en particulier le facteur anthropique (densité humaine, charge de cheptel) dont la contribution au phénomène est pourtant très importante.

Devant l'insuffisance des données hydrologiques et la difficulté d'interprétation du phénomène d'érosion à partir des données séparées, on a pensé résoudre le problème autrement.

En considérant que le phénomène d'érosion est le résultat d'intéraction de tous les facteurs responsables tant du milieu physique que du milieu humain, on a pensé à l'étudier à partir des photos E.R.T.S. qui nous le décrivent tel qu'il est. Une fois décrit et délimité dans l'espace on pourrait analyser la prépondérance de tel ou tel facteur sur ce phénomène.

La photographie utilisée est en noir et blanc; au 1/1.000.000° prise par satellite le 7 Février 1973, programme N.A.S.A. - E.R.T.S. E-1 canal M.S.S. 5 (0,6 - 0,7). Son excellente qualité a permis de tirer un agrandissement au 1/200.000° couvrant les 8.500 Km^2 du bassin.

.../...

Cette photo visualise tous les phénomènes de surface. Le réseau hydrographique est bien dessiné par les lits d'oued d'aspect blanchâtre contrastant avec les plaines et terrasses de teintes plus ou moins grises. Les zones inondables apparaissent foncées; l'érosion est bien traduite par la mise à nue de la roche mère et par les ravins. Rien que par l'aspect de la photo on peut déterminer la lithologie, les apports sableux, l'épaisseur des sols qui ont l'avantage de traduire le degré de dégradation de la couverture pédologique et dans une certaine mesure le type d'érosion.

Lors de la cartographie du phénomène d'érosion le travail a comporté deux étapes :

- La première a consisté essentiellement à une photo-interprétation qui nous a permis de déterminer les zones homogènes par différences d'aspects et de tons.

  Ce sont les zones d'ablation et les zones d'accumulation : Cinq unités ont été différenciées traduisant d'une part le degré de gravité atteint par l'érosion, d'autre part les accumulations :

  - zones d'ablation forte
  - zones d'ablation moyenne
  - zones d'ablation faible
  - zones d'accumulation stable
  - zones d'accumulation reprise par l'érosion hydrique.

- La seconde étape qui est capitale consistait à vérifier cette photo-interprétation à partir des nombreuses données existantes en particulier la carte pédologique, la carte de végétation etc...

  Beaucoup de spécialistes connaissant le milieu naturel du Bassin versant Zeroud - Merguellil nous ont assisté dans ce travail.

- La troisième étape consisterait à identifier sur le terrain les zones homogènes (ground truth ou vérité terrain), chose non réalisée encore dans cette étude compte tenu de son caractère urgent et synthètique.

  Cette étape est nécessaire dans la réalisation de cartes à plus grandes échelles (1/100.000° - 1/50.000°).

.../...

Cette photo visualise tous les phénomènes de surface. Le réseau hydrographique est bien dessiné par les lits d'oued d'aspect blanchâtre contrastant avec les plaines et terrasses de teintes plus ou moins grises. Les zones inondables apparaissent foncées; l'érosion est bien traduite par la mise à nue de la roche mère et par les ravins. Rien que par l'aspect de la photo on peut déterminer la lithologie, les apports sableux, l'épaisseur des sols qui ont l'avantage de traduire le degré de dégradation de la couverture pédologique et dans une certaine mesure le type d'érosion.

Lors de la cartographie du phénomène d'érosion le travail a comporté deux étapes :

- La première a consisté essentiellement à une photo-interprétation qui nous a permis de déterminer les zones homogènes par différences d'aspects et de tons.

  Ce sont les zones d'ablation et les zones d'accumulation : Cinq unités ont été différenciées traduisant d'une part le degré de gravité atteint par l'érosion, d'autre part les accumulations :

  - zones d'ablation forte
  - zones d'ablation moyenne
  - zones d'ablation faible
  - zones d'accumulation stable
  - zones d'accumulation reprise par l'érosion hydrique.

- La seconde étape qui est capitale consistait à vérifier cette photo-interprétation à partir des nombreuses données existantes en particulier la carte pédologique, la carte de végétation etc...

  Beaucoup de spécialistes connaissant le milieu naturel du Bassin versant Zeroud - Merguellil nous ont assisté dans ce travail.

- La troisième étape consisterait à identifier sur le terrain les zones homogènes (ground truth ou vérité terrain), chose non réalisée encore dans cette étude compte tenu de son caractère urgent et synthètique.

  Cette étape est nécessaire dans la réalisation de cartes à plus grandes échelles (1/100.000° - 1/50.000°).

.../...

Cette étude souligne l'intérêt des images E.R.T.S. dans l'établissement de documents intégrés sur l'ensemble d'un bassin versant à des échelles de l'ordre de 1/200.000°. Il faut néanmoins considérer celle-ci comme une première étape de travail ayant pour seul objectif d'orienter les praticiens vers les zones les plus susceptibles d'apporter des atterissements dans la retenue du futur barrage de Sidi Saâd. Elle devra obligatoirement être suivie d'études plus analytiques à des échelles adaptées.

CONCLUSION :

A travers cet exemple on voit que l'avenir de la Télédétection dans l'observation des phénomènes globaux est certain. Mais il ne faut pas se limiter simplement à l'observation des photos E.R.T.S. pour obtenir des renseignements généraux qui sont insuffisants pour étudier des phénomènes précis telles que la pollution, l'érosion, la désertisation, les inondations etc...

Ces disciplines nécessitent des traitements speciaux tels que l'exagération des contrasts, la composition des couleurs et même la Digitalisation). Pour cela, il faudrait disposer d'un laboratoire spécialisé dans la Télédétection effectuant des interprétations de tout ordre.

Pour éviter la dispersion des efforts, ce laboratoire pourrait avoir un caractère national et travailler pour tous les Services Techniques (Agricoles - Géologiques - Topographiques etc...).

DOCUMENTS CONSULTES

J.Y. LOYER
AH. SOUISSI : Carte de l'érosion des bassins-versants des Oueds Zeroud et Merguellil - Division des Sols - N° 693

M. HAMZA : Rapport de Mission à Tarbes sur la Télédétection des Ressources Terrestres - D.R.E.S. - Tunis -

SH. SOUISSI : La Télédétection des Ressources Terrestres E.S. 90 - Division des Sols -

Vu par le Centre National
de Documentation Agricole
00235

/ A TELEDETECTION ET SES APPLICATIONS METEOROLOGIQUES EN TUNISIE

---:§:---

La mesure ou l'estimation des paramètres Météorologiques, tels que la température, la pression atmospherique, la pluie, la direction du vent et sa vitesse, l'humidité, la nébulosité, l'état de la mer, la durée d'insolation, l'energie solaire etc..., ont été pendant très longtemps faites à l'aide d'instruments plus ou moins simples manuel.

Les instruments dits à lecture directe donnent la valeur du paramètre mesuré, directement, c'est le cas par exemple de la température, d'autres instruments fournissent des données qui permettent de calculer la valeur du paramètre tel que la mesure de la vitesse du vent.

Toutes ces mesures ont lieu dans les stations météorologiques qui constituent des réseaux d'observations plus ou moins homogènes.

L'étendue des régions inhabitées tels que les déserts, les océans, les mers les régions montagneuses et l'éspace entourant notre planète constituent des lacunes ; où l'observateur humain ne peut procéder à la mesure directe des paramètres météorologiques.

L'importance météorologique et l'influence de ces régions très vastes sur le comportement de l'atmosphère et son évolution ne peut nous laisser indifférents.

Il est en effet essentiel de connaitre les caractéristiques météorologiques des déserts, que sont des sources secondaires de chaleur, des océans sources principales de l'humidification de l'atmosphère. C'est grâce aux progrés de la technologie que la météorologie a pu accomplir elle même les progrés que vous connaissez.

La mesure à distance ou télédetection de certains paramètres qui manquaient au météorologiste a pu être effectuée et de nouveaux horizons pour le développement de la météorologie se sont ouverts.

Les régions classées inaccessibles il y a quelques années sont devenues de véritables laboratoires de recherches, en effet l'expérience Tropicale du GARP (I) dans l'Atlantique (ETGA) qui s'est déroulée de Juin à Septembre 1974 a eu comme champs d'action une grande partie de l'océan Atlantique avec la participation de 12 aéronefs specialement équipés une quarantaine de navires de recherche des satellites météorologiques (géostationnaires et polaires).

Les énormes quantités de données rassemblées durant les quatres mois nécessiteront plus de deux années de traitement au moyen de gros Ordinateurs pour que les objectifs scientifiques fondamentaux de l'ETGA soient atteints.

La télédetection en météotologie a progressé par étape.

D'abord le sondage de l'atmosphère pour mesurer la température et l'humidité , la pression atmosphérique à différents niveaux ainsi que la vitesse et la direction du vent.

.../...

Les données obtenues deux fois par jour à 00 H et 12 H ont permis d'étudier les caractères de stabilité et d'instabilité des couches atmosphériques et de définir la qualité et l'origine des masses d'air d'où un grand apport pour les méthode de prévision au sol et en altitude. Ce sondage de l'atmosphère a été réalisé aussi bien au moyen de système optique (direction et force du vent) qu'électromécanique (température, pression humidité).

Après la dernière guerre mondiale le Radar a fait son apparition en météorologie.

Les premiers Radars ont été utilisés pour observer la couverture nuageuse dans une région de quelques dizaines de KM autour du Radar.

L' amèlioration dûe au radar était la possibilité d'observer les nuages de jour comme de nuit et de pouvoir en suivre les déplacements

Les Radars météorologiques furent par la suite perfectionnés au point de devenir un instrument indisposable pour la prévision à courte échéance et la recherche les radars de 10 CM de longueur d'onde, une fois étalonnée pour une région déterminée donnent les quantités de pluie precipitation dans toute cette région et non pas d'une manière ponctuelle comme les pluviomètres classiques.

Il sera par conséquent très interessant d'avoir l'intégration de tout l'eau précipitable pour une région dans le but de mieux servir l'agriculture et l'hydrologie.

Par ailleurs le radar permet aujourd 'hui une analyse physique très détaillée des systèmes nuageux.

La détection des nuages convectifs dangeureux pour le trafic aérien ou générateur de chute de grêle facilitera les opérations de lutte à entreprendre prochainement en TUNISIE grâce au radar très perfectionné de THALA installé en AOÛT 1975.

L'avenement des satellites météorologiques d'abord polaires puis géostationnaires a permis à la météorologie de faire encore des progrès géants.

Ce dernier né des moyens modernes de télédetection est venu, à temps pour élargir considérablement le champs d'action du météorologiste.

Les satellites polaires qui effectuent des révolutions autour du globe en l'espace de 90 minutes environ prennent des photos des nuages des régions survolées et les transmettent directement vers les nombreuses stations terrestres situées dans presque tous les pays. Ces photos prises dans le visible puis simultanément dans le visible et l'infrarouge ont permis d'améliorer l'analyse des cartes météorologiques.

La rotation de la terre combinée avec les révolution du satellite fait qu'une région donnée ne recoit ces photos de nuages qu'une seule période dans la journée (à TUNIS dans la matinée au cours de trois révolutions ou le satellite et visible par l'antenne du reception) pour surmonter cet inconvenient et vu l'interet grandissant et la variété des informations que pouvait fournir le satellite météorologique : les météorologistes toujours plus exigents disposent actuellement des satellites géostationnaires qui seront dans quelques années au nombre de cinq.

.../...

Deux américains sont fonctionnels depuis Mai et Novembre 1974 sont placés au dessus de l'équateur aux longitudes 70° et 140° OUEST.

Un satellite Russe METEOR sera placé à la lattitude 0° et longitude 70° EST.

Un satellite Japonais à lancer en Septembre 1977 sera placé à la longitude 140° EST au dessus de l'Equateur.

Et enfin METEOSAT satellite Géostationnaire Européen à lancer en Juillet 1977 sera placé au dessus de l'équateur et du méridien Zéro.

Tous ces satellites géostationnaires seront placés à une altitude d'environ 36 000 KM (Météosat 35 900 KM) tourneront évidemment avec la même vitesse angulaire que la terre et envirront vers celle-ci des informations météorologiques sous formes d'image ou alphanumérique.

Le satellite géostationnaire Européen METEOSAT qui interesse directement notre pays, puisqu'il couvrira les régions comprises entre les lattitudes 60° NORD et SUD et longitudes 60° EST et OUEST fournira :

a)Une image toute les demi-heures des nuages au dessus de l'Europe, de la Méditérrannée et de l'Afrique du Nord.

b)Des images infrarouges toutes les trois heures de toute la Zone Météosat.

Pour les météorologistes synoptiques, le meilleur usage est fait de la spécialisation du canal IR infrarouge qui fournit des images de jour et de nuit. Les images infrarouge et visible sont toutes deux utiles principalement pour l'analyse des cartes en surface.

c)Le Canal vapeur d'eau (nouveauté sur météosat) donne des informations sur la répartition de la vapeur d'eau dans les courants aériens, dans la partie supérieure de la troposphère. Les données du canal vapeur d'eau peuvent constituer un bon outil pour l'analyse des cartes d'isobares de la haute trospnosphère.

d)La température de la surface de la mer avec une erreur inférieure à un degrés pour des mailles de cent KM de coté.

e)Le champs de vent en direction et force

f)Le bilan énergétique

g)Un sondage température humidité relative pour les couches situées entre le sol et 30 KM d'altitude.

Ces informations sont d'une extreme importance au dessus des deserts et des océans.

Le programme de dissemination de Météosat comprendra outre les images de nuages fournies par lui-même, les images prises par son voisin occidental S M S 1 ainsi qu'un choix de cartes météorologiques transmis par le centre de traitement au sol à DARMSTADT en République Fédérale d'Allemagne Météosat assurera en effet des fonctions de télécommunications spécialisées pour les régions lointaines du continent Africain.

.../...

Deux américains sont fonctionnels depuis Mai et Novembre 1974 sont placés au dessus de l'équateur aux longitudes 70° et 140° OUEST.

Un satellite Russe METEOR sera placé à la lattitude 0° et longitude 70° EST.

Un satellite Japonais à lancer en Septembre 1977 sera placé à la longitude 140° EST au dessus de l'Equateur.

Et enfin METEOSAT satellite Géostationnaire Européen à lancer en Juillet 1977 sera placé au dessus de l'équateur et du méridien Zéro.

Tous ces satellites géostationnaires seront placés à une altitude d'environ 36 000 KM (Météosat 35 900 KM) tourneront évidemment avec la même vitesse angulaire que la terre et envirront vers celle-ci des informations météorologiques sous formes d'image ou alphanumérique.

Le satellite géostationnaire Européen METEOSAT qui interesse directement notre pays, puisqu'il couvrira les régions comprises entre les lattitudes 60° NORD et SUD et longitudes 60° EST et OUEST fournira :

a)Une image toute les demi-heures des nuages au dessus de l'Europe, de la Méditérrannée et de l'Afrique du Nord.

b)Des images infrarouges toutes les trois heures de toute la Zone Météosat.

Pour les météorologistes synoptiques, le meilleur usage est fait de la spécialisation du canal IR infrarouge qui fournit des images de jour et de nuit. Les images infrarouge et visible sont toutes deux utiles principalement pour l'analyse des cartes en surface.

c)Le Canal vapeur d'eau (nouveauté sur météosat) donne des informations sur la répartition de la vapeur d'eau dans les courants aériens, dans la partie supérieure de la troposphère. Les données du canal vapeur d'eau peuvent constituer un bon outil pour l'analyse des cartes d'isobares de la haute trospnosphère.

d)La température de la surface de la mer avec une erreur inférieure à un degrés pour des mailles de cent KM de coté.

e)Le champs de vent en direction et force

f)Le bilan énergétique

g)Un sondage température humidité relative pour les couches situées entre le sol et 30 KM d'altitude.

Ces informations sont d'une extreme importance au dessus des deserts et des océans.

Le programme de dissemination de Météosat comprendra outre les images de nuages fournies par lui-même, les images prises par son voisin occidental S M S 1 ainsi qu'un choix de cartes météorologiques transmis par le centre de traitement au sol à DARMSTADT en République Fédérale d'Allemagne Météosat assurera en effet des fonctions de télécommunications spécialisées pour les régions lointaines du continent Africain.

.../...

Pour revenir au titre de mon intervention qui est "la télédétection en Météorologie appliquée à la Tunisie" je dirai tout simplement que tous ces progrès réalisés en météorologie s'appliquent à tout les pays y compris la TUNISIE.

Ils n'ont d'intêret que dans la mesure où ils sont exploités pour servir l'économie Nationale après leur avoir donné la forme convenant à chaque utilisateur tels que l'agriculture, l'idustrie la pêche les transports le tourisme etc...

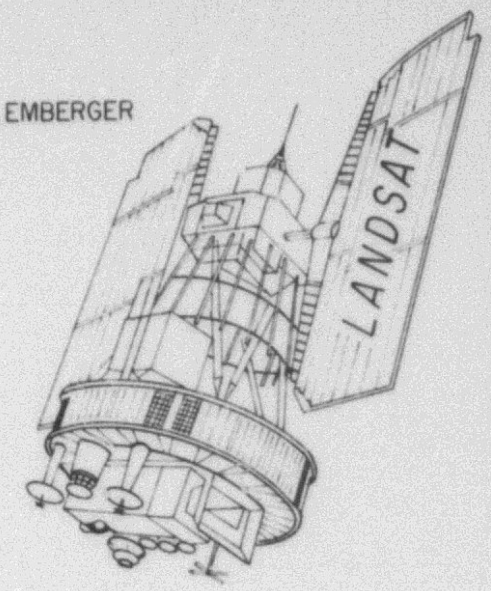
Le Directeur de l'Institut National
de la Météorologie

MONCEF ATADI

Vu par le Centre National
de Documentation Agricole
00236

PRINCIPAL INVESTIGATEUR
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE D'ÉTUDES PHYTOSOCIOLOGIQUES ET ÉCOLOGIQUES L.EMBERGER
B.P _ 5051 _ 34 033 _ Montpellier Cedex

Co - investigateurs
Institut National de la Recherche Agronomique
de Tunisie (I.N.R.A.T.)
Mission C.E.P.E. / C.N.R.S. de Gabès
Office de la Recherche Scientifique d'Outre - Mer
(O.R.S.T.O.M.) - Mission de Gabès
Programme aidé par le Centre National
d'Études Spatiales (C.N.E.S.)



Séminaire de sensibilisation
"TÉLÉDÉTECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"
Tunis, 29 - 30 Octobre 1975

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET ARZOTU

par
M. STA-M'RAD et G. LONG



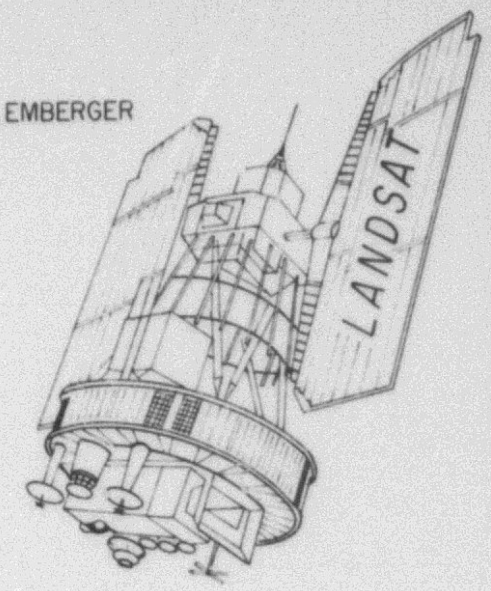
EXPERIENCE ARZOTU

Tunis, Montpellier, Octobre 1975
I.N.R.A.T. / C.E.P.E.

Vu par le Centre National
de Documentation Agricole
00236

PRINCIPAL INVESTIGATEUR
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE D'ÉTUDES PHYTOSOCIOLOGIQUES ET ÉCOLOGIQUES L.EMBERGER
B.P _ 5051 _ 34 033 _ Montpellier Cedex

Co - investigateurs
Institut National de la Recherche Agronomique
de Tunisie (I.N.R.A.T.)
Mission C.E.P.E. / C.N.R.S. de Gabès
Office de la Recherche Scientifique d'Outre - Mer
(O.R.S.T.O.M.) - Mission de Gabès
Programme aidé par le Centre National
d'Études Spatiales (C.N.E.S.)



Séminaire de sensibilisation
"TÉLÉDÉTECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"
Tunis, 29 - 30 Octobre 1975

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET ARZOTU

par
M. STA-M'RAD et G. LONG



EXPERIENCE ARZOTU

Tunis, Montpellier, Octobre 1975
I.N.R.A.T. / C.E.P.E.

Séminaire de sensibilisation
"TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"
Tunis, 29-30 octobre 1975

PRESENTATION GENERALE DU PROJET ARZOTU

(Zones Arides de Tunisie)

par

M'Hamed STA-M'RAD (INRAT) et Gilbert LONG (CNRS/CEPE)

Tunis, Montpellier, octobre 1975
INRAT/CEPE

Séminaire de sensibilisation
"TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"
Tunis, 29-30 octobre 1975

PRESENTATION GENERALE DU PROJET ARZOTU*
(Zones Arides de Tunisie)

par

M'Hamed STA-M'RAD (INRAT) et Gilbert LONG (CNRS/CEPE)

*réalisé dans le cadre général de la Convention INRAT/CNRS relative au Projet "Parcours du Sud" de l'INRAT

. conçu et exécuté par le CEPE/CNRS (département d'écologie, groupe de télédétection)

. avec la participation des chercheurs du CNRS et de l'ORSTOM en poste à Gabès

. avec l'aide financière du CNES (direction des programmes scientifiques)

Tunis, Montpellier, octobre 1975
INRAT/CEPE

Séminaire de sensibilisation

"TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"

Tunis, 29-30 octobre 1975

Titre de la Communication : Présentation générale du Projet ARZOTU concernant les zones arides de la Tunisie

Auteurs : MM. M'Hamed STA-M'RAD, Directeur de l'INRAT et Gilbert LONG, Directeur de l'Ecothèque méditerranéenne du CNRS

Plan de la Communication

1. Généralités sur le Programme ERTS-LANDSAT et perspectives d'application à la Tunisie
2. Présentation du Projet ARZOTU
   - 2.1. Historique
   - 2.2. Définition des objectifs
   - 2.3. Territoire considéré
   - 2.4. Phases des études
   - 2.5. Données disponibles de la période 1972-73
   - 2.6. Données commandées pour la période 1975-76
3. Moyens engagés
4. Résultats attendus
5. En matière de conclusion provisoire

1. GENERALITES SUR LE PROGRAMME ERTS-LANDSAT ET PERSPECTIVES D'APPLICATION A LA TUNISIE

Le Programme ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*) de la NASA, devenu depuis le 13 Janvier 1975 le Programme LANDSAT, a été mis en place *"en tant que moyen de recherche et de développement afin de démontrer que la télédétection à partir de l'espace représentait une approche possible et pratique de la gestion efficace des ressources terrestres"* (*in* "Data Users Handbook", NASA). Ce programme a été ouvert aux expérimentateurs et utilisateurs non-américains, sous certaines conditions qui seront évoquées ci-après.

Dans l'état actuel du Programme ERTS-LANDSAT, cette famille de satellites comprend :

. 2 satellites opérationnels LANDSAT 1 et LANDSAT 2, le premier en opération depuis 1972, le second lancé le 22 Janvier 1975 et opérationnel depuis avril 1975, tous deux considérés en priorité comme satellites *expérimentaux*, c'est-à-dire susceptibles d'aider les chercheurs à se familiariser avec l'emploi de ces plateformes spatiales pour l'étude des phénomènes de la surface de la terre et l'inventaire des ressources terrestres ;

. 1 satellite approuvé, dont le lancement est prévu pour fin 1977, LANDSAT C(=3), dont la vocation pourrait être plutôt *commerciale*, bien qu'il présente des avantages techniques *nouveaux* pour les expérimentateurs.

LANDSAT 1 et LANDSAT 2 disposent à l'origine des mêmes systèmes de détection et d'enregistrement, à savoir :

. un système *RBV*, *Return Beam Vidicon Camera*, qui consiste en 3 caméras indépendantes de télévision, mises en opération simultanément, chacune captant des données dans la partie visible du spectre, de 0,48 à 0,83 micromètre ; chaque image correspond à une aire au sol de 185 km x 185 km ; la résolution spatiale au sol est de l'ordre de 80 m ;

. un système *MSS*, *Multispectral Scanner*, qui est un balayeur optique mécanique multispectral, captant des données dans 4 canaux simultanément, dans une partie du visible et dans le proche infra-rouge, au total entre 0,5 et 1,1 micromètre ; chaque image correspond aussi à une aire au sol de 185 km x 185 km ; la résolution spatiale au sol est de l'ordre de 80 m ;

. un système *WBVTR, Wideband Video Tape Recorders :* il s'agit d'enregistreurs video qui stockent les données à bord du satellite lorsque celui-ci exécute une mission dans une portion de la Terre où il n'y a pas de station de réception au sol en vue ; ces données enregistrées sont donc transmises au sol en temps différé ;

. un système *DCS, Data Collection System :* il s'agit d'un système d'acquisition de données qui proviennent de stations de mesure au sol.

Pour de nombreuses raisons, tant technologiques qu'expérimentales, *seules les données en provenance du MSS,* enregistrées sur WBVTR (LANDSAT 1, période 1972-73) ou communiquées à une station de réception au sol (LANDSAT 1 et 2, période 1975-76) intéressent présentement la région méditerranéenne dans son ensemble et, en particulier, le territoire tunisien à propos duquel le Projet ARZOTU, dont il sera question au chapitre 2, s'applique.

Il convient de signaler que LANDSAT C est programmé avec les mêmes dispositifs que LANDSAT 1 et 2. Toutefois, la NASA a annoncé que le RBV fournirait une résolution de 40 m (au lieu de 80) et couvrirait tout le spectre visible panchromatiquement. Par ailleurs, le MSS disposerait d'un 5ème canal qui consistera en un *canal thermique IR* dans la bande 10,4-12,6 micromètres. Il est certain que ces innovations sont de nature à intéresser les expérimentateurs , d'où l'intérêt de programmer des études et des actions qui pourraient se prolonger, en Tunisie, au moins jusqu'en 1978 ; ceci, bien entendu, dans la mesure où LANDSAT C serait autorisé à opérer au-dessus de l'aire de réception au sol de la station de Fucino (Italie), hypothèse que l'on peut être autorisé à formuler.

Le programme LANDSAT avait été conçu de telle façon qu'au début de l'année 1975, la répétitivité des satellites 1 et 2 permette un passage sur le même territoire-test *tous les 9 jours.* Cependant, ce pas de temps n'a donné lieu à acquisition et exploitation de données que sur *le territoire américain.*

En effet, pour la région méditerranéenne, la NASA n'a autorisé l'acquisition de données par la station de réception italienne de Fucino, qu'à partir du satellite LANDSAT-1, *période du 22 mars au 24 juillet 1975,* puis du satellite LANDSAT-2, *depuis le 24 juillet 1975.* La station de réception au sol, située à une centaine de kilomètres de Rome, est gérée par

la société italienne Telespazio, laquelle a passé un contrat avec la NASA pour l'acquisition et la diffusion des données en provenance d'une aire potentielle de *3000 km de rayon* autour de Fucino. La mise en fonctionnement de cette station a été effective au printemps 1975, mais les enregistrements n'ont pas encore été distribués. Fucino est en principe capable - sous réserve de l'accord de la NASA et des demandeurs de données - de programmer l'acquisition de données de n'importe quelle portion de territoire située dans l'aire potentielle indiquée ci-dessus et, notamment, de toute la Tunisie. A l'heure actuelle (octobre 1975) ce programme d'acquisition est donc conforme aux conditions de survol de LANDSAT 2 (passage tous les 18 jours).

Compte tenu de ce qui vient d'être exposé, le territoire tunisien n'est susceptible d'avoir fait (ou de faire) l'objet d'acquisition de données que dans les deux cas officiels suivants :

. *période 1972-73 :* exécution, à l'initiative de la NASA, de quelques tests d'acquisition, donnant lieu à diverses "missions" programmées apparemment dans le désordre, mais couvrant, au total, toute la Tunisie ;

. *période à partir de 1975 :* exécution, à l'initiative de demandeurs de données (ex : CNRS/INRAT), de programmes d'acquisition précis.

En ce qui concerne les données acquises au cours de la première période, une liste des images disponibles est diffusée, sur demande, par "EROS Data Center, Sioux Falls, South Dakota" ; tous les expérimentateurs et utilisateurs intéressés peuvent acquérir ces données. C'est ce qui a été fait par le CEPE-L.Emberger pour les données du Projet ARZOTU concernant le Sud de la Tunisie.

2. PRESENTATION DU PROJET ARZOTU

2.1. Historique

Au cours du 1er semestre 1972, la NASA invitait les utilisateurs potentiels de LANDSAT 2, dont le lancement était programmé à l'époque pour fin 1973, à soumettre des propositions d'expérience.

Réalisant tout l'intérêt que pouvait présenter la télédétection

par satellite, pour la *généralisation des résultats acquis au sol* dans le cadre du Projet "Parcours du Sud" de *l'Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie (INRAT)*, projet réalisé avec la participation d'autres organismes tunisiens (Direction des Ressources en Eau et en Sol, DRES ; Direction des forêts ; Commissariats régionaux de développement agricole, CRDA ; Office des terres domaniales, OTD ; etc.), en coopération avec des équipes du *Centre National de la Recherche Scientifique*, (CNRS, Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques Louis Emberger, de Montpellier), et de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre Mer (ORSTOM), sous l'égide des Nations Unies (FAO et Unesco principalement), il fut décidé, après un entretien entre M. le Directeur de l'INRAT et les responsables de la mission du CEPE/CNRS à Gabès, de soumettre un avant-projet à la NASA.

Cet avant-projet fut rédigé en août 1972 et transmis à la NASA par le "Principal Investigateur" (G. LONG), les co-investigateurs étant d'une part, M. STA-M'RAD, Directeur de l'INRAT, et, d'autre part, des chercheurs du CNRS à Montpellier (B. LACAZE, G. DEBUSSCHE), ou ceux directement concernés par le déroulement du projet "Parcours du Sud", en poste à Gabès (Ch. FLORET, E.LE FLOC'H).

Les autorités tunisiennes (Ministère de l'Agriculture) appuyèrent cette proposition par lettre du 20 janvier 1973.

Le programme de lancement de LANDSAT 2 ayant subi divers retards et, par ailleurs, des faits nouveaux s'étant produits (installation de la station de réception au sol à Fucino, en Italie) et les règles d'acceptation des propositions par la NASA ayant changé, le responsable à la NASA du Programme LANDSAT conseilla au "Principal Investigateur" de négocier avec la station italienne de Fucino la possibilité d'acquérir des données à partir de LANDSAT 1 encore en fonction. De la fin 1974 à aujourd'hui des négociations ont donc été poursuivies pour s'assurer qu'un minimum de données soient disponibles au cours de la période 1975-76.

Au début de 1975, il fut décidé d'associer les experts de l'ORSTOM, en poste à Gabès, au projet ARZOTU. Cette participation était vivement souhaitée, notamment pour couvrir les aspects pédologiques, géomorphologiques et hydrologiques de surface.

2.2. Définition des objectifs

Le sigle ARZOTU a été créé lors de la présentation de l'avant-projet à la NASA. Il signifie tout simplement : *ARID ZONES OF TUNISIA*, ou Zones Arides de Tunisie.

Il s'agit plus précisément d'étudier dans quelle mesure les données disponibles de la télédétection par satellite des ressources terrestres sont de nature à faciliter, à l'aide d'une approche globale, holistique, principalement écologique, le *recensement des phénomènes majeurs qui caractérisent l'état actuel et les conditions d'évolution de la surface* dans le Sud de la Tunisie.

On prendra notamment en considération : les relations entre la végétation spontanée (ou cultivée) et le milieu, l'état des parcours, les conditons générales de l'utilisation agricole des terres, les conditions géomorphologiques, pédologiques, hydrologiques et, d'une manière générale, l'évolution, dans l'espace et dans le temps, des variables qui conditionnent la nature et la stabilité des équilibres écologiques et les conditions de leur dégradation (steppisation, désertisation, salinisation,...).

L'un des thèmes prioritaires de ce Projet pourrait être la "prévision des récoltes et la surveillance de l'environnement" ou, plus modestement, la détermination de l'évolution du potentiel végétal spontané ou cultivé et de ses relations avec le milieu, à travers une analyse chronoséquentielle de zones-test et de sites de mesure.

Toutefois, il convient de souligner que le projet ARZOTU a été conçu en premier lieu comme un *programme expérimental*, et non comme un *programme d'application*. C'est la raison pour laquelle les zones-test retenues sont essentiellement celles à propos desquelles des *données de terrain* ont déjà été recueillies, ou bien, dont le recueil est programmé dans le cadre des accords de coopération conclus d'une part, entre l'INRAT et le CNRS et, d'autre part, entre la DRES et l'ORSTOM.

Le programme ARIDMED, du Comité français, présenté à la Direction de l'Enseignement, de la Recherche et de la Formation des Cadres du Ministère de l'Agriculture de Tunisie en juin 1975, comporte une ACTION n°4 qui concerne la coopération scientifique et technique pour la mise en oeuvre des aspects scientifiques du Projet ARZOTU.

tifiques du Projet ARZOTU.

2.3. Territoire considéré

En raison de la nature des données disponibles pour la période 1972-73 (au total 14 "images" pour le Sud de la Tunisie) et des objectifs qui ont été fixés pour la période 1975-76, le territoire considéré dans le cadre du Projet ARZOTU concerne principalement une première zone d'environ 200 000 hectares appelée *zone-test de ZOUGRATA*, et une deuxième zone, de superficie non encore définie, appelée *zone-test de BIR SOLTANE*.

La *vérité-terrain* est conduite principalement sur ces deux zones-test. Toutefois, dans la mesure du possible, on essaiera de généraliser certains résultats, reconnus comme suffisamment fiables et reproductibles, à l'ensemble des territoires couverts par les "images" de 1972-73, ou à celles qui seraient disponibles pour la période 1975-76.

Ce souci de généralisation pourrait concerner en priorité un essai de *"Cartographie de la désertisation et des zones menacées par la désertisation"*, basé sur une approche écologique, susceptible de donner lieu à la publication d'un rapport et de cartes qui seront présentés à la *Conférence mondiale sur la désertisation*, organisée par l'UNEP, à Nairobi, en août 1977. Il faut rappeler, en effet, qu'à la suite des réunions FAO-UNESCO-UNEP de Sfax (avril 1975) et de Téhéran (février 1975), l'UNEP a pris la décision d'encourager la mise en place d'études-pilotes dans chacune des grandes zones écologiques du monde où les processus de désertisation créent des situations alarmantes. Ainsi, pour ce qui concerne la zone écologique des déserts soumis aux conditions du climat méditerranéen, la Tunisie a été considérée comme l'un des pays capable de faire connaître son expérience, qui est quasi unique dans cette partie du monde.

2.4. Phases des études

2.4.1. Phase préparatoire

La nature même des données disponibles, dont les caractéristiques seront données en détail dans les exposés suivants, imposait une longue *préparation technique* qui a commencé au CEPE en 1970 et qui s'est prolongée jusqu'à aujourd'hui.

Les voies choisies pour l'analyse des données étant d'une part, l'interprétation à partir des "images" et, d'autre part, une analyse numérique par voie automatique des données enregistrées sur "bandes magnétiques", il a fallu tester les aptitudes d'une petite équipe à maîtriser progressivement les techniques proposées.

Cette maîtrise n'a pu être acquise que grâce aux nombreux tests effectués aussi bien au CEPE, à Montpellier, qu'au CNES, à Paris et à Toulouse. Pour atteindre cet objectif, l'on a dû réunir ou utiliser des moyens techniques relativement importants (Visionneur I2S du CEPE à Montpellier, pour la création des images en couleurs composites ; accès à des ordinateurs puissants à Montpellier, à Paris et à Toulouse ; création de logiciels appropriés, etc.) et consentir des efforts financiers relativement importants.

Pour faciliter son déroulement, cette phase préparatoire a été réalisée à partir des données LANDSAT 1 du Sud de la France (Projet GOLION) de manière à optimiser la mobilisation des moyens et à permettre des contrôles sur le terrain.

2.4.2. Premiers tests sur les données du Sud de la Tunisie

Une *deuxième phase* a commencé en 1975, avant même que les données de la Tunisie acquises par la station de Fucino soient disponibles. Pour cette deuxième phase, l'équipe de Montpellier et l'équipe de Gabès ont pris en considération les données LANDSAT 1 du Sud de la Tunisie de la période 1972-73.

2.4.3. Prise en compte des données de la campagne 1975-76

La *troisième phase* des études devrait démarrer avant la fin 1975 ; on envisage d'utiliser principalement les données LANDSAT 1 et LANDSAT 2 de la période 1975-76. Cette phase comporte une intensification des opérations de contrôle sur le terrain, aussi bien que des activités accomplies en France, ainsi que la formation "in-service" d'experts tunisiens.

2.5. Données disponibles de la période 1972-73

Quatorze "images" LANDSAT 1 du Sud de la Tunisie, disponibles dans les 4 canaux du MSS, achetées à EROS Center, Etats-Unis, sont archivées *au groupe de télédétection du CEPE-L.Emberger*, à Montpellier. Celles-ci proviennent de missions LANDSAT 1 comprises entre le 2 octobre 1972 et le 7 février 1973. La plupart sont exploitables, sauf cas de couverture nuageuse importante. Un document de travail établi par Mme DEBUSSCHE et M. LACAZE donne les renseignements utiles suivants :

- le *tableau 1 :* rassemble les indications générales sur ces photographies qui ont été numérotées dans une série unique = CEPE N°1 à CEPE N°14.

- le *tableau 2 :* indique les dates de prises de vues, l'importance relative de la couverture nuageuse et des appréciations générales sur les conditions d'utilisation des images.

- la *carte 1 :* (en annexe) indique la localisation des images LANDSAT 1 de la période 1972-73 relative au Sud de la Tunisie.

On remarque que toutes les zones-test qui sont cartographiées sur le terrain dans le cadre du Projet "Parcours du Sud", qui font l'objet de mesures répétitives de la production végétale et de l'évaluation de l'importance de la désertisation, peuvent être analysées au moins sur une série d'images ; la plupart d'entre elles sont même couvertes par 3, voire 4 séries d'images, prises à des dates différentes (cf. *tableau 3, carte 1*).

En plus de ces données "images", livrées par la NASA sur support film, en positifs ou négatifs 70 mm x 70 mm, (échelle 1/3369000) le CEPE a fait l'acquisition des *"bandes magnétiques"* correspondant aux images n° 7 (9 novembre 1972) et n°13 (7 février 1973) de la Tunisie du Sud, bandes à partir desquelles un programme de traitement automatique a été mis en oeuvre. Il est bon de préciser que ces deux images correspondent au même espace géographique ; elles permettent, en conséquence, un début d'analyse chronoséquentielle, ce qui est l'un des atouts le plus évident de la télédétection par satellite.

Tableau 1

Caractéristiques des images LANDSAT 1 du Sud de la Tunisie (localisation), pour la période 1972-1973

PICTURE CENTER		SUBLAT	POINT	NO
LONG	LAT	LONG	LAT	CEPE
11.83	33.30	11.89	33.26	1
11.62	32.90	11.66	32.87	2
11.11	35.81	11.12	35.79	3
10.66	34.38	10.67	34.36	4
10.22	32.97	10.24	32.93	5
9.67	35.81	9.68	35.78	6
9.22	34.37	9.24	34.36	7
8.78	32.94	8.80	32.93	8
8.18	35.76	8.23	35.73	9
7.74	34.33	7.78	34.30	10
11.64	33.03	11.69	33.04	11
7.94	34.72	7.97	34.69	12
9.22	34.57	9.28	34.54	13
8.78	33.13	8.84	33.10	14

SOUTHERN TUNISIA

OBSERV. ID	ORB	R	M	TRANS MODE	STAT	TOT	QUALITY RBV	MSS	P
				R M C	EPH	PROD	12312345		
1071-09192	985			R	FA	20	R 0	GGGG	
1107-09200	1487			R	FA	0	R 1	GGGG	
1108-09250	1501			R	FA	10	R 0	GGG	
1108-09252	1501			R	FA	10	R 1	GGGG	
1108-09255	1501			R	FA	0	R 1	GGGG	
1109-09304	1515			R	FA	0	R 1	GGGG	
1109-09311	1515			R	FA	0	R 1	GGGG	
1109-09313	1515			R	FA	0	R 1	GGGG	
1110-09363	1529			R	FA	10	R 1	GGGG	
1110-09365	1529			R	FA	0	R 1	GGGG	
1125-09201	1738			R	FA	50	R 0	GPGG	
1182-09364	2533			R	FA	10	R 0	GGGG	
1199-09311	2770			R	GL	0	R 1	GGGG	
1199-09314	2770			R	GL	0	R 1	GGGG	

N° CEPE	Date	% nuages	Appréciations sur les conditions d'utilisation des images
1	2 octobre 1972	20 %	littoral non caché par les nuages
2	7 novembre 1972	0 %	totalement exploitable
3	8 novembre 1972		zone au Nord du périmètre, contour non tracé sur la carte
4	8 novembre 1972	10 %	partiellement exploitable
5	8 novembre 1972	10 %	partiellement exploitable
6	9 novembre 1972	0 %	zone au Nord du périmètre, contour non tracé sur la carte-totalement exploitable
7	9 novembre 1972	5 %	majeure partie exploitable
8	9 novembre 1972	1 %	majeure partie exploitable
9	10 novembre 1972	0 %	totalement exploitable
10	10 novembre 1972	0 %	totalement exploitable
11	25 novembre 1972	50 %	partiellement exploitable
12	21 janvier 1973	50 %	moitié sud exploitable
13	7 février 1973	0 %	totalement exploitable
14	7 février 1973	0 %	totalement exploitable

Tableau 2

Caractéristiques des images LANDSAT 1 du Sud

de la Tunisie

(dates de prises de vues, nébulosité, conditions d'utilisation)

pour la période 1972-73

N° photo CEPE	Date	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	2.10.72								Xpp				
2	7.11.72								Xpp				
3	8.11.72												
4	8.11.72	X	X	X			X						X
5	8.11.72				X	X	X		X	X			X
6	9.11.72												
7	9.11.72	X	X	X	X	X	Xpp		X			X	X
8	9.11.72				Xpp	Xpp			X		X		
9	10.11.72												
10	10.11.72												
11	25.11.72												
12	21.01.73											X	
13	7.02.73	X	X	X	X	X	Xpp	X				X	X
14	7.02.73				X	X				X			

Tableau 3

Possibilités d'études diachroniques de certains territoires à partir des données LANDSAT 1 (période 1972-73)

A : Chahal ; B : Hadj Gacem ; C : Zougrata ; D : Oglat Merteba ; E : Oglat Merteba ; F : Mareth ; G : Oum Ech Chia ; H : Médenine ; I : Guelb Mizna ; J : Douz ; K : Gafsa ; L : El Adala.

pp : pro parte (partiellement)

Les possibilités d'utilisation des images et des bandes magnétiques dans le cadre précis du Projet ARZOTU seront indiquées par Mme DEBUSSCHE et M. LACAZE. Les résultats en cours d'obtention ou attendus seront plus particulièrement présentés par MM. FLORET, LE FLOC'H et PONTANIER.

2.6. Données commandées pour la période 1975-76

2.6.1. En 1975

Ont été commandées des prises d'images aux dates suivantes :

. 26-28 avril 1975, 11 images } LANDSAT 1
. 10 juillet 1975 , 2 images }
. 4 novembre 1975, 2 images : LANDSAT 2

Si les conditions de nébulosité sont défavorables (plus de 30 % de nuages), ces dates sont décalées de 18 jours.

Le choix de ces dates a été fait en fonction des critères suivants :

. début de la mise en opération de la station de réception au sol de Fucino, ce qui correspondait au milieu du "printemps" (avril) ;

remarque : La première prise de vue s'avère être relativement *tardive* pour une analyse *correcte* de la végétation spontanée ou cultivée (extension de la céréaliculture) dans le Sud de la Tunisie.

. choix d'une "phase estivale" typique (juillet 1975) ;
. choix d'une "phase automnale" typique (novembre 1975), susceptible de permettre une analyse de l'état de démarrage de la céréaliculture (premiers stades végétatifs ; labours récents) et de la végétation pastorale.

2.6.2. Pour 1976

Le programme 1976 n'est pas encore établi d'une façon définitive

à ce jour. On prévoit, entre autres, de mieux maîtriser la période "printanière" (février à avril), par une demande pertinente de prises de vues sur au moins *deux dates critiques*, dont il conviendra de discuter entre toutes les parties prenantes au Projet ARZOTU.

Le coût[1] des bandes magnétiques livrées par Telespazio est tel, qu'il n'est pas possible, pour *un programme essentiellement expérimental*, de faire des commandes trop importantes. On prévoit de se limiter aux *besoins fondamentaux* du programme de recherche qui a été établi. Bien entendu, cette attitude est dictée par l'importance relativement faible des moyens qu'il a paru possible de mobiliser pour la réalisation du Projet ARZOTU. *Si des moyens nouveaux étaient annoncés, il serait encore possible de modifier cette décision.*

3. MOYENS ENGAGES

En l'état actuel (octobre 1975) du programme de travail, les moyens engagés sont les suivants :

3.1. Personnel

- . 2 chercheurs à plein temps au CEPE-L.Emberger,
- . 1 programmeur à temps partiel au CEPE-L.Emberger,
- . temps partiel de collaborateurs scientifiques à Gabès (mission CNRS et mission ORSTOM),
- . temps partiel de techniciens CNRS et INRAT à Montpellier et à Gabès.

3.2. Matériel

- . visionneur I2S pour l'analyse des images selon les techniques de couleurs composites (CEPE/CNRS).

---

(1) 600$US la bande magnétique, correspondant à une "image" dans les 4 canaux ; les bandes livrées sont en 1600 b.p.i., ce qui pose certains problèmes de compatibilité.

. moyens photographiques :

. 1 labo photo au CEPE-L.Emberger
. des facilités d'accès à divers labo commerciaux

. moyens de calcul :

. au CEPE-L.Emberger et à l'Ecothèque méditerranéenne : ensembles MITRA 15, CII 10010, et périphériques,
. à l'Université des Sciences et des Techniques du Languedoc (USTL) de Montpellier : ensemble IBM 360-65, et périphériques,
. à la Division de Mathématique du Centre National d'Etudes Spatiales à Toulouse : ensemble CDC 6600 et CII 10065,
. logiciels appropriés : CNES, CEPE...

. divers :

. accès au système "Digicol" de la Société MATRA
. moyens de fonctionnement mobilisés par le CNRS, l'ORSTOM et l'INRAT pour les contrôles sur le terrain dans le Sud de la Tunisie.

3.3. Aide spécifique

. *Convention CNRS-CNES :* faisant l'objet d'une aide logistique indispensable (accords internationaux, moyens de calcul...) et d'une aide financière (aide aux laboratoires) comportant, entre autres, l'acquisition des données LANDSAT 1 et 2 de la campagne 1975 pour un coût total de 45 000 F.

. D'autre part, pour la période automne 1975-automne 1976, *l'INRAT a proposé à l'UNEP de l'aider* à former 2 ou 3 experts tunisiens qui participeraient à part entière, à Montpellier et à Gabès, à toutes les opérations du Projet ARZOTU. Une requête a été adressé à l'UNEP qui l'a accueillie très favorablement. Ainsi, la Tunisie bénéficiera directement d'une expérience unique dans cette partie de la région méditerranéenne et accroîtra dès lors son capital d'expertise, qu'elle entend par ailleurs mettre à la disposition des pays du Nord de l'Afrique (cf. résultats et re-

commandations de la réunion FAO/UNESCO/UNEP de Sfax, avril 1975).

. Enfin, l'ORSTOM a pris la décision d'affecter un pédologue à plein temps au Projet ARZOTU, ce qui renforcera l'équipe scientifique et accroîtra les chances de valoriser les résultats sur les ressources physiques (sol, eau).

. D'autres concours sont attendus mais non encore convenablement définis pour faire l'objet ici d'une annonce officielle.

4. RESULTATS GENERAUX ATTENDUS

Nous les exprimerons d'une manière très succincte, laissant à d'autres rapporteurs le soin de les préciser dans le détail.

Sur le *plan technique*, on se propose :

. de comparer les moyens conventionnels et les moyens nouveaux de la télédétection pour l'évaluation générale des ressources naturelles ;

. d'étudier l'importance des données LANDSAT pour la cartographie thématique aux échelles moyennes, et pour la surveillance des conditions écologiques dans les zones arides.

Sur le plan des *disciplines*, on se propose d'obtenir des résultats expérimentaux portant :

. sur les possibilités d'évaluation de *l'état des cultures*,
. sur les possibilités d'évaluation de *l'état des terrains de parcours*,
. sur les possibilités d'évaluation de *l'état général du développement régional*,
. sur les conditions des *sols*,
. sur les conditions *hydrologiques de surface*,
. sur les risques *d'érosion* et les conditions générales des *déséquilibres écologiques* (désertisation).

La *justification du recours aux données LANDSAT* pour l'obtention de ces résultats peut être fournie succinctement de la manière suivante :

. le caractère *"dynamique"* des études proposées implique la disponibilité de données répétitives pour les mêmes espaces considérés ; ce que parmet le programme LANDSAT (répétitivité = 18 jours) ;

. *l'étendue considérable* de la zone considérée et les *difficultés d'accès* sont des critères favorisant une approche globale, synoptique, des phénomènes à recenser ; ce que permettent les satellites de la famille ERTS-LANDSAT ;

. les *conditions écologiques générales* sont telles dans les zones arides, que des *changements rapides* peuvent se produire (par ex. à la suite de pluies exceptionnelles, aux saisons critiques, en automne ou au printemps) dans la couverture végétale et pour ce qui concerne les mouvements des eaux et des sédiments ;

. la *végétation* étant particulièrement rare et clairsemée en certaines périodes (été), il devient possible alors d'examiner attentivement la *nature physique des substrats*, ce qu'il est difficile de faire dans des zones écologiques où la couverture végétale "verte" est quasi permanente.

5. EN MATIERE DE CONCLUSION PROVISOIRE

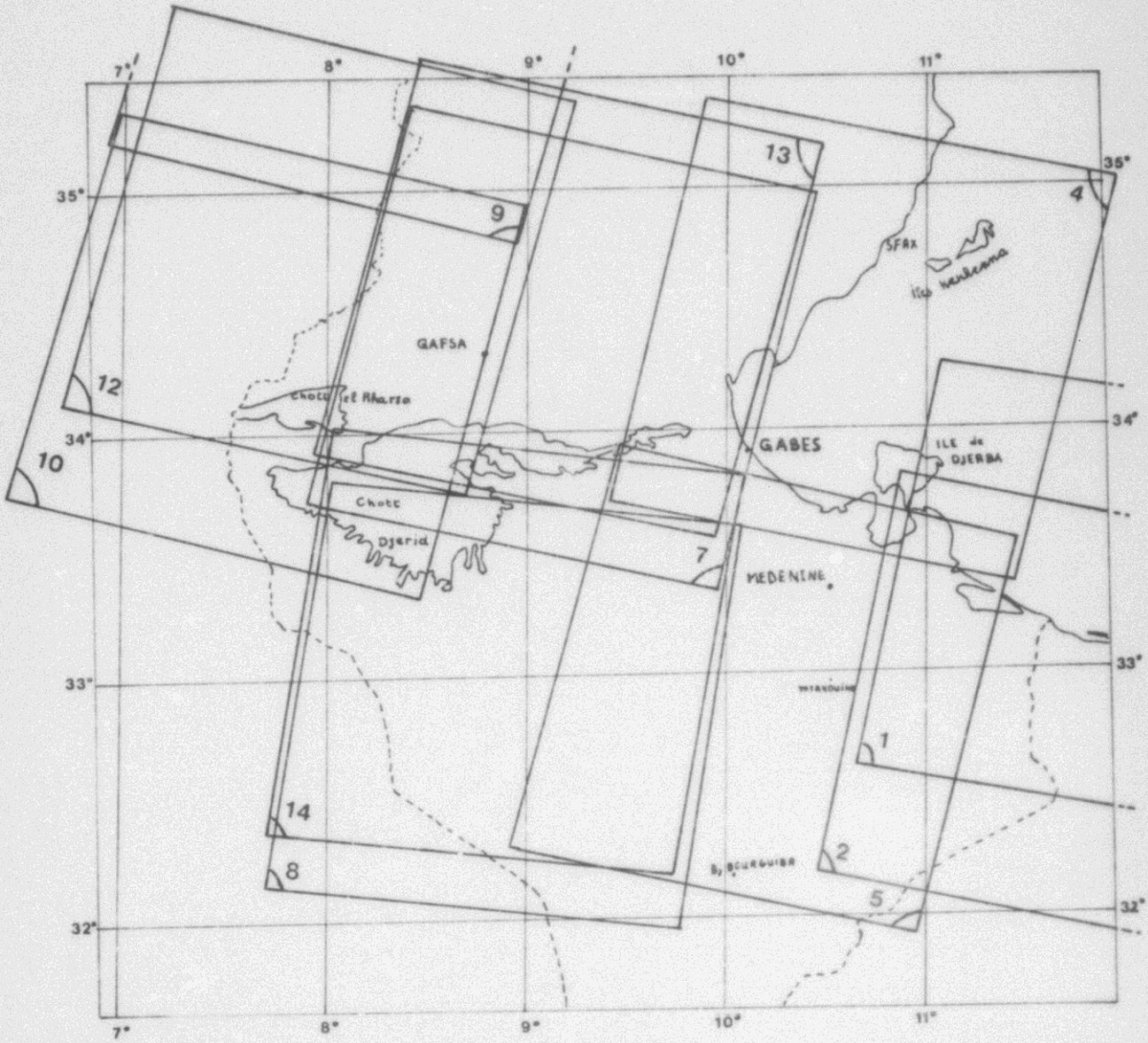
Il est clair, par conséquent, qu'au moins à titre d'hypothèse de travail, l'utilisation rationnelle des données de la télédétection des ressources terrestres est jugée comme étant de nature à *apporter, sous réserve de la mise en oeuvre d'une expérimentation appropriée, des éléments de réponse à quelques-unes des questions importantes que se posent aujourd'hui les planificateurs, les aménageurs, les techniciens du développement régional, aussi bien que les économistes et les écologues au sens large, ou plus généralement les spécialistes de la croissance économique et de la diagnose et de la gestion des ressources naturelles.*

Un *instrument nouveau* -issu d'un processus technologique avancé - est proposé à toutes les nations, non sans quelques réserves et certaines contraintes. La principale contrainte, à nos yeux, est, en premier lieu, l'obligation qui est faite aux chercheurs, aux techniciens et aux décideurs d'avoir à imaginer et à mettre en oeuvre une *approche globale*, la seule qui soit justifiée, pour faire face à *l'énorme quantité d'information* qui submerge les équipes chargées de *l'interprétation thématique*. L'utilisation de ce

nouvel instrument implique donc d'une part, la *réalisation d'expériences préalables avant le passage au stade opérationnel ou commercial*, et d'autre part, la *formation d'experts généralistes qualifiés*, tels que ceux qui sont recommandés par les instances internationales, pour s'occuper du devenir et de la gestion des ressources naturelles de l'écosphère (cf. Programmes MAB et EMASAR pour la Tunisie).

Le Projet ARZOTU est donc une occasion offerte à la Tunisie pour s'initier aux nouvelles techniques proposées, en expérimentant sur son propre territoire, confrontée à ses propres problèmes et, le plus tôt possible, en mobilisant ses propres experts.

Tel qu'il est conçu, le Projet ARZOTU est encore remarquablement incomplet si on le compare à certains projets réalisés par les centres de recherche spécialisés des Etats-Unis. Entre autres, il ne comporte pas à ce jour *la réalisation simultanée d'expériences par porteurs aériens (avion, ballon)*, opérant en particulier à moyenne (3-10 km) ou haute (30km) altitudes. De telles "missions", programmées en parallèle avec les prises de vues LANDSAT, pourraient être considérée comme indispensables pour l'étude de certains thèmes, eu égard aux caractéristiques des données LANDSAT (insuffisance de la résolution spatiale ; trop grande largeur des bandes spectrales du MSS...) et aux difficultés réelles de la vérité-terrain (faible recouvrement de la végétation ; intrication d'unités très contrastées...) sur les sites-test retenus.



CARTE 1

LOCALISATION DES IMAGES LANDSAT 1 RELATIVE AU SUD DE LA TUNISIE

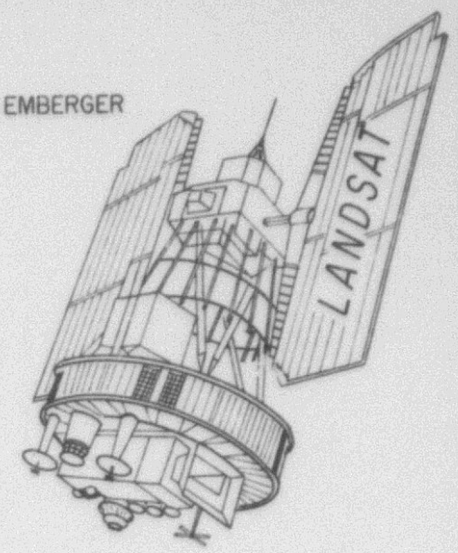
(période 1972-73)

Vu par le Centre
de Documentation Agricole
00237

PRINCIPAL INVESTIGATEUR
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE D'ÉTUDES PHYTOSOCIOLOGIQUES ET ÉCOLOGIQUES L. EMBERGER
B.P. - 5051 - 34 033 - Montpellier Cedex

Co - investigateurs
Institut National de la Recherche Agronomique
de Tunisie (I.N.R.A.T.)
Mission C.E.P.E. / C.N.R.S. de Gabès
Office de la Recherche Scientifique d'Outre - Mer
(O.R.S.T.O.M.) - Mission de Gabès

Programme aidé par le Centre National
d'Études Spatiales (C.N.E.S.)



Séminaire de sensibilisation
"TÉLÉDÉTECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"
Tunis, 29 - 30 Octobre 1975

ANALYSE DES IMAGES LANDSAT DU SUD DE LA TUNISIE

PREMIERS RÉSULTATS ET PROGRAMMES ENGAGÉS

par

G. DEBUSSCHE



EXPERIENCE ARZOTU

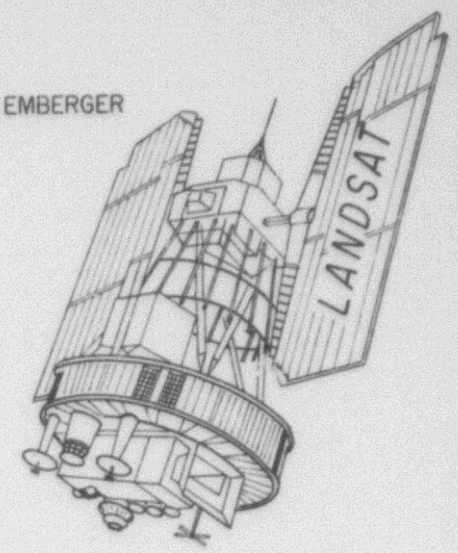
Tunis, Montpellier, Octobre 1975
I.N.R.A.T. / C.E.P.E.

Vu par le Centre
de Documentation Agricole
00237

PRINCIPAL INVESTIGATEUR
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE D'ÉTUDES PHYTOSOCIOLOGIQUES ET ÉCOLOGIQUES L. EMBERGER
B.P. - 5051 - 34 033 - Montpellier Cedex

Co - investigateurs
Institut National de la Recherche Agronomique
de Tunisie (I.N.R.A.T.)
Mission C.E.P.E. / C.N.R.S. de Gabès
Office de la Recherche Scientifique d'Outre - Mer
(O.R.S.T.O.M.) - Mission de Gabès

Programme aidé par le Centre National
d'Études Spatiales (C.N.E.S.)



Séminaire de sensibilisation
"TÉLÉDÉTECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"
Tunis, 29 - 30 Octobre 1975

ANALYSE DES IMAGES LANDSAT DU SUD DE LA TUNISIE

PREMIERS RÉSULTATS ET PROGRAMMES ENGAGÉS

par

G. DEBUSSCHE



EXPERIENCE ARZOTU

Tunis, Montpellier, Octobre 1975
I.N.R.A.T. / C.E.P.E.

Séminaire de sensibilisation
"TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"
Tunis, 29-30 octobre 1975

ANALYSE DES IMAGES LANDSAT DU SUD DE LA TUNISIE
premiers résultats et programmes engagés

par

G. DEBUSSCHE

Département d'Ecologie Générale
C.E.P.E. Louis Emberger
Montpellier

Tunis, Montpellier, octobre 1975
INRAT/CEPE

SOMMAIRE

Avertissement

1 - Introduction

2 - Problématique

3 - Choix des niveaux de perception et de précision de l'analyse

4 - Les images-test

5 - Les données photographiques originales

6 - Les documents de travail

6.1. Nature des documents

6.1.1. Documents bruts

6.1.2. Documents élaborés

6.1.2.1. Les équidensités colorées

6.1.2.2. Les compositions colorées

7 - Analyse des images-test : tests de photo-identification

7.1. Image du 9 Novembre 1972 (Région de Gabès)

7.1.1. Caractéristiques de l'image

7.1.2. Les documents noir et blanc

7.1.3. Les équidensités colorées

7.1.4. Les compositions colorées

7.2. Image du 7 Février 1973 (Région de Gabès)

7.2.1. Caractéristiques de l'image

7.2.2. Les documents noir et blanc

7.2.3. Les équidensités colorées

7.2.4. Les compositions colorées

7.3. Images du 9 Novembre 1972 et du 7 Février 1973 de la région de Bir Soltane

7.3.1. Caractéristiques des images

7.3.2. Les documents noir et blanc

7.3.3. Les équidensités colorées
7.3.4. Les compositions colorées

7.4. L'analyse diachronique

8 - Conclusions

7.3.3. Les équidensités colorées
7.3.4. Les compositions colorées

7.4. L'analyse diachronique

8 - Conclusions

Avertissement

Les observations présentées dans ce texte proviennent de l'analyse *en laboratoire* d'images-test. Les résultats des identifications, bien qu'en partie vérifiés sur le terrain, sont fortement liés à l'application des méthodes d'exploitation des images.

Cette partie *théorique* est complétée par les exposés oraux des experts en poste à Gabès, exposés qui portent sur l'identification précise des thèmes à partir des mêmes images-test vérifiées à l'aide de données-terrain.

Les résultats considérés comme des *hypothèses de travail* au niveau représenté par ce texte, seront donc infirmés ou confirmés lors de l'exposé oral.

1 - INTRODUCTION

Durant la phase préliminaire de l'expérience ARZOTU, l'accent a été mis sur le caractère expérimental de l'étude des documents photographiques qui doit déboucher tout naturellement sur le perfectionnement et la mise au point des méthodes d'exploitation des données *"images"*. En effet, les méthodes doivent être nécessairement testées, car de leur facilité d'application et de leur efficacité dépend le déroulement des analyses chronoséquentielles.

Ces analyses chronoséquentielles qui portent sur l'étude de l'évolution d'un thème ou d'un phénomène dans le temps, constituent l'originalité essentielle de ce type de données en provenance des satellites.

L'intérêt de cette première phase du programme a donc été d'aider à la reconnaissance du territoire tunisien considéré et de nous familiariser non seulement avec ses problèmes spécifiques, mais également avec l'imagerie par l'intermédiaire de laquelle nous serons capable de le percevoir et de le comprendre.

Un premier test a été réalisé sur un territoire qui nous était familier (Sud de la France, région de Montpellier) ; l'expérience ainsi acquise ne permet pas cependant de passer à un territoire écologique bien différent sans difficultés et sans nécessiter une importante adaptation des méthodes d'exploitation des données.

En effet, malgré l'expérience acquise pour tout ce qui concerne la préparation et l'obtention des documents de travail susceptibles d'être confrontés directement aux documents cartographiques, il a été nécessaire de tester à nouveau l'éventail des possibilités offertes par les images LANDSAT (pouvoir de discrimination, pouvoir de résolution vis-à-vis des thèmes, etc.) et de redéfinir, dans certains cas, les méthodes d'analyses en fonction des thèmes et des problèmes spécifiques au territoire du Sud Tunisien.

Une grande part de cet exposé est donc consacré aux questions techniques d'ordre divers ; le souci des expérimentateurs est de définir des méthodes simples et efficaces, faisant intervenir le minimum de matériel indispensable et, de ce fait, le plus performant quant aux moyens engagés et vis-à-vis des objectifs de l'étude.

2 - PROBLEMATIQUE

D'une façon générale, l'analyse des données images comprend trois grandes étapes correspondant aux trois objectifs principaux suivants :

1) l'identification des objets et des phénomènes du territoire observé (critères taxinomiques),
2) l'évaluation des processus-clés à fort impact sur le milieu, notamment en ce qui concerne la distribution dans l'espace (critères spatiaux),
3) l'étude des phénomènes dynamiques et de leur évolution dans le temps (critères temporels).

On soulignera le fait que l'étude à caractère chorologique (étude de la distribution spatiale des objets et des phénomènes) est nécessairement précédée d'études précises ponctuelles, ou correctement localisées en XY ; cette approche spatiale, conduite en fonction des objectifs thématiques des recherches poursuivies sur un certain nombre de sites-test, est la base de la mise en oeuvre rationnelle de tout *processus de généralisation*.

Cette *première phase*, ou phase de reconnaissance, essentiellement *"ponctuelle"*, est donc primordiale. Elle fournit une *série de tests* qui doivent déboucher sur l'évaluation des capacités offertes par les images du type LANDSAT, et permettre l'étude objective d'un certain nombre de problèmes propres aux types de milieu rencontrés en Tunisie du Sud.

La *deuxième phase* comporte l'analyse des processus d'évaluation de l'état des ressources naturelles, l'étude des phénomènes temporels, les projets de recensement ou d'inventaire, le zonage écologique. Cette deuxième phase est abordée ici seulement du point de vue théorique. Le caractère expérimental du Projet ARZOTU ne permettant pas, dans un premier temps, une

analyse couvrant toute la superficie du territoire représentée par un cliché LANDSAT (185km x 185km), soit 34.225 km^2, *a fortiori* par plusieurs clichés.

C'est la raison pour laquelle le processus de généralisation spatiale a été mis en oeuvre à partir d'observations ponctuelles correctement localisées et correspondant à des sites-test connus et notablement variables. Des méthodes classiques de la photo-interprétation (analyse de la texture, structure des unités) n'ont pas été employées d'une façon *systématique*, si ce n'est pour analyser les sites-test. Le processus de la photo-interprétation (délimitation des zones homogènes, isophènes, et identification) n'a donc pas été suivi dans ses formes conventionnelles.

Dans le cadre de cette expérience nous sommes confrontés au problème suivant : assurer la réalisation des 3 objectifs principaux de l'analyse, ce qui implique automatiquement la résolution de toutes les difficultés propres au caractère technique de l'obtention des *"documents"* compatibles avec ces objectifs et les thèmes qu'ils sous-tendent ; cette compatibilité dépend :

- du niveau de perception auquel l'étude est envisagée
- du niveau de précision attendu ou requis
- du contenu informatif des thèmes étudiés.

Parallèlement à ces contraintes, viennent s'ajouter celles qui dépendent :

- de *l'accessibilité ou la disponibilité des moyens technologiques* nécessaires à la réalisation et à l'obtention des documents de travail ;
- de *la qualité des documents obtenus* : c'est-à-dire du pouvoir de résolution et du pouvoir de discimination vis-à-vis des thèmes étudiés aux niveaux de perception et de précision correspondants.

3 - CHOIX DES NIVEAUX DE PERCEPTION ET DE PRECISION DE L'ANALYSE

Pour toutes les raisons énoncées ci-dessus, nous avons été amenés

à ne retenir *a priori* que deux niveaux de perception :

1) le niveau de la région écologique
2) le niveau du secteur écologique.

Un troisième niveau - celui de la station - n'est abordable que par les données numériques.

A ces niveaux de perception sont associés des niveaux de précision qui sont liés :

- à l'échelle des documents cartographiques disponibles
- aux potentialités de discrimination des images vis-à-vis des thèmes.

A des échelles plus grandes que le 1/200 000, les analyses ne peuvent pas être réalisées par la seule étude des images, pour la simple raison qu'il n'est pas possible d'agrandir davantage les documents initiaux par suite de la mauvaise qualité des images photographiques ainsi obtenues.

L'analyse porte :

a) *au niveau de la région écologique :*

- sur le zonage écologique (délimitation de régions écologiques)
- sur l'étude de la situation des zones-test dans le contexte régional
- sur la généralisation au niveau régional de l'étude de l'évolution des ressources végétales et physiques (terres, eaux...)
- sur l'étude de l'impact des facteurs de la désertisation, en vue de déterminer les conditions de la surveillance des zones sensibles au processus de désertisation.

b) *au niveau sectoriel :*

- sur le zonage écologique (délimitation de secteurs écologiques)
- sur l'identification et l'inventaire des cultures et des parcours ; sur l'évaluation de leur production globale (utilisation agricole des terres en général)
- sur les conditions géomorphologiques, pédologiques et hydrologiques (en vue d'une traduction à moyenne échelle).

4 - LES IMAGES-TEST

Sur les 14 images LANDSAT 1 du Sud de la Tunisie (dans les 4 canaux du MSS) existantes et archivées au CEPE-L.Emberger, seules 4 d'entre elles ont été retenues pour la phase préparatoire du Projet ARZOTU.

Cette sélection a été faite, non seulement pour éviter une trop grande dispersion géographique incompatible avec le caractère expérimental de l'étude, mais également pour limiter le nombre et la variabilité spatiale des phénomènes de la surface terrestre analysée.

Les 2 principales zones-test qui font l'objet de mesures répétitives et d'études cartographiques thématiques (zone de Zougrata et zone de Bir Soltane) justifient le recours à un faible nombre de clichés qui s'est avéré suffisamment exhaustif pour ne pas être augmenté durant la suite de l'expérience.

La numérotation des images retenues, correspondant à leur ordre d'archivage au CEPE, et les références de la NASA, sont les suivantes :

- image n° 7 E1109-09311 du 9 novembre 1972
- image n° 8 E1109-09313 du 9 novembre 1972
- image n° 13 E1199-09311 du 7 février 1973
- image n° 14 E1199-09314 du 7 février 1973

Leur localisation est indiquée sur la *figure 1*.

5 - LES DONNEES PHOTOGRAPHIQUES ORIGINALES

Les images sont disponibles sous forme de négatifs et de positifs transparents sur film 70 mm. Le format de l'image est de 55 mm x 55 mm et son échelle est le 1/3 369 000.

Pour la même surface de territoire analysé, et à un instant donné, on possède 4 images qui correspondent aux 4 canaux d'enregistrement du MSS.

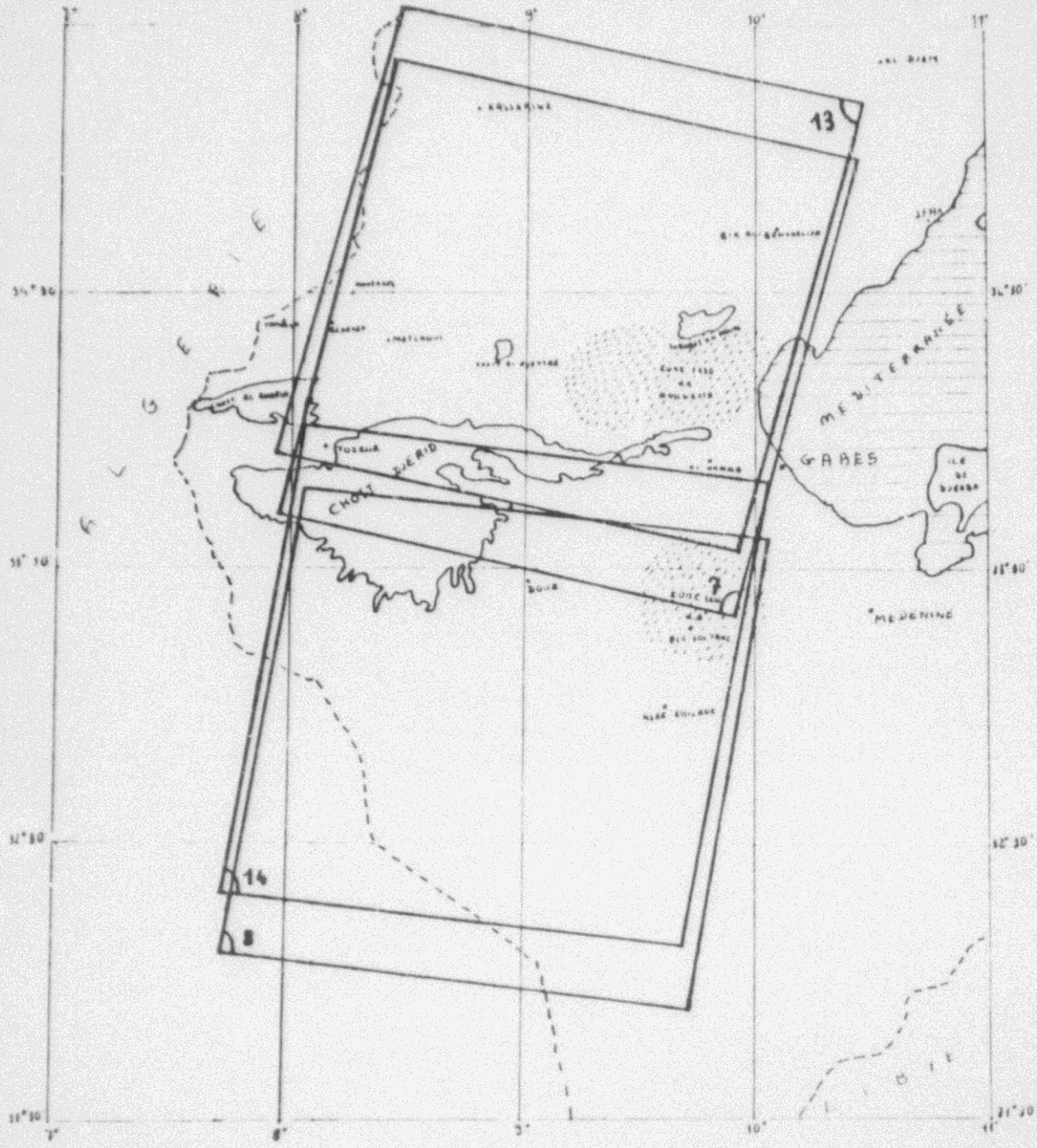


FIGURE 1

Localisation des images-test de l'expérience préliminaire
au Projet ARZOTU et des Zones-test de Zougrata et de Bir Soltane

Dans tous les cas, ce sont ces données initiales qui sont à la source de tous les documents de travail qui seront étudiés ci-après.

6 - LES DOCUMENTS DE TRAVAIL

6.1. Nature des documents

A partir des négatifs, on obtient facilement des agrandissements utilisables à toutes les échelles comprises entre le 1/3 369 000 et le 1/200 000.

A partir des négatifs et des positifs

. on peut réaliser :

- des projections en noir et blanc des images de chacun des canaux
- des projections colorées des images par superposition, grâce au système du visionneur I2S (obtention de compositions colorées synthétisant l'ensemble des informations de 2, 3 ou 4 canaux).

. et obtenir des tirages sur papier.

6.1.1. Documents bruts : images dans les 4 canaux

Les images originales (négatifs et positifs sur film), si elles permettent une exploitation par projection fixe (moyens élémentaires de projection), ont un format qui permet difficilement de les exploiter directement de façon rationnelle. C'est pourquoi il est intéressant de travailler sur des agrandissements tirés sur papier. Ceux-ci, dans le cas des agrandissements des images des 4 canaux en noir et blanc, peuvent être réalisés valablement jusqu'à l'échelle du 1/200 000 ; au-delà, le défaut de netteté et le grain des tirages masque l'information contenue sur les images.

Les documents noir et blanc sont indispensables car ils constituent le support de base :

- de l'expression cartographique
- de la localisation des phénomènes étudiés
- des études analytiques

6.1.2. Documents élaborés

6.1.2.1. Les équidensités colorées

Celles-ci proviennent de l'analyse des documents originaux grâce au système *DIGICOL* (I2S) qui, par la sélection d'un certain nombre de niveaux de densités d'une image et par l'attribution d'une couleur à chacun des niveaux, permet d'obtenir un document présentant autant *d'équiplages colorées* que de nombre de sélections.

Cet appareil comprend essentiellement une caméra de télévision, qui filme les clichés, reliée à un système de traitement comportant un *"mini-ordinateur" et un écran de télévision.*

Le nombre de niveaux et, par là même, le nombre de couleurs sont fonction de la finesse des analyses requises ; il varie de 1 à 32 pour ce type d'appareil.

Le document coloré final est visualisé sur l'écran de télévision ; il correspond à l'image de la photographie originale où les groupes de valeur de gris sont réunis en équiplages colorées.

Cette technique permet à la fois de séparer des niveaux de densité qui ne sont pas discernables par l'oeil humain et d'étendre les observations faites en un point d'un cliché à tout l'ensemble du document (d'une façon objective).

Il est évident que le document simplifié obtenu contient moins d'informations que l'original ; malgré cette restriction l'intervention du photo-interprète est loin d'être supprimée, car si cette technique d'exploitation l'aide dans le processus d'analyse elle n'empêche pas l'ambiguïté qu'une couleur peut représenter plusieurs phénomènes de la surface terrestre ou, inversement, qu'un même phénomène peut être représenté par plusieurs couleurs.

6.1.2.2. Les compositions colorées

Celles-ci proviennent de la superposition des documents transparents originaux positifs ou négatifs - ou bien d'agrandissements de ces do-

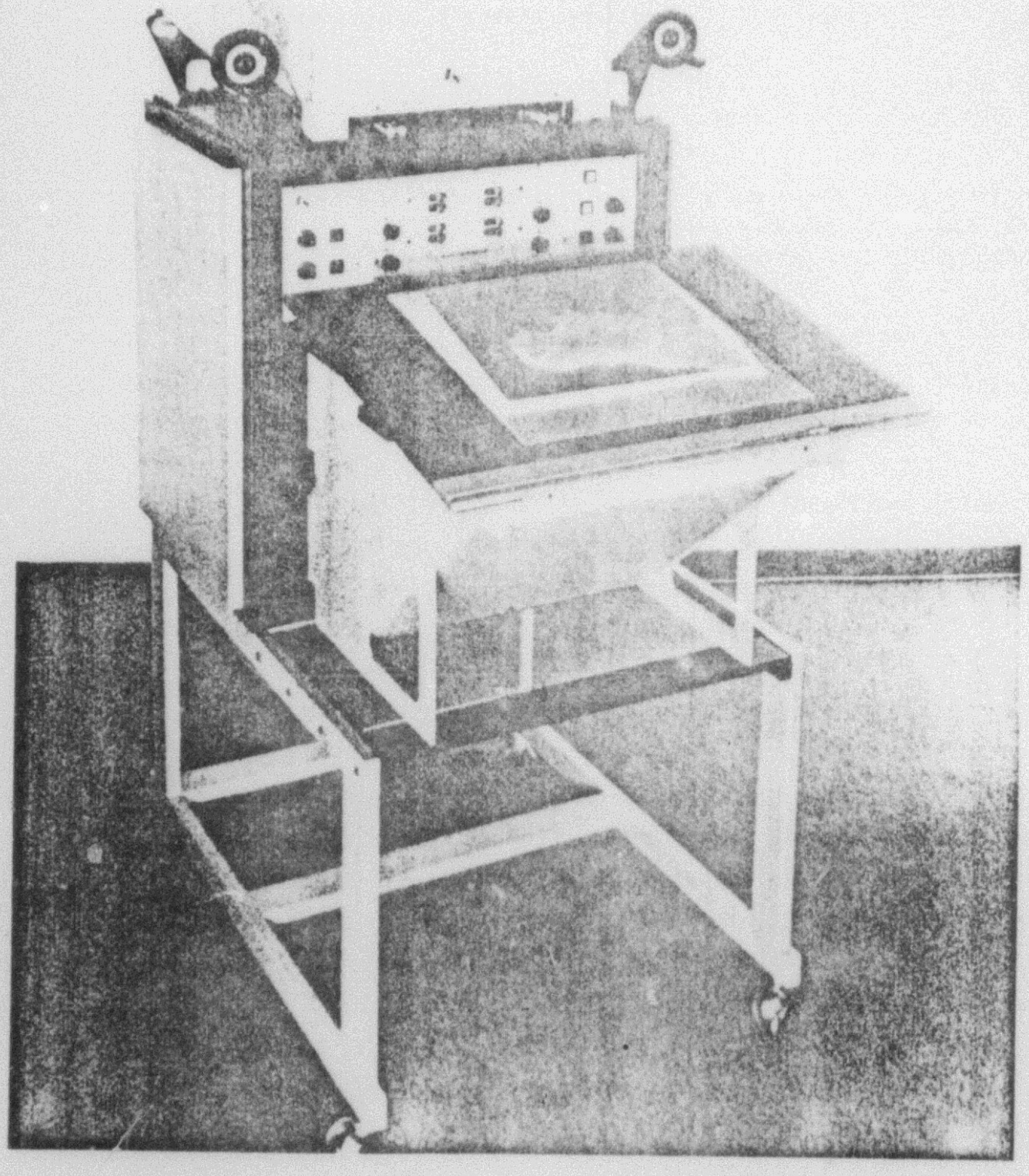


FIGURE 2

Ensemble visionneur I2S disponible au CEPE à Montpellier

cuments sur des supports identiques - réalisée à l'aide du visionneur I2S *(figure 2)*. L'adjonction de filtres colorés et la projection des images sur un écran dépoli permettent d'obtenir un certain nombre de combinaisons *"filtre* x *image* x *illumination"*.

Deux types d'écrans dépolis sont utilisables :

- un écran vertical sur lequel l'image apparaît agrandie au 1/1 000 000 (à partir duquel sont photographiées les combinaisons intéressantes)
- un écran adapté en table lumineuse sur lequel l'image apparaît au 1/500 000 (à partir duquel sont réalisés les travaux de photo-interprétation et de cartographie).

Il suffit de photographier l'écran du visionneur sur lequel sont projetées les images colorées pour obtenir un document de travail que l'on peut garder sous forme de diapositifs ou tirer ensuite sur papier.

On peut obtenir des agrandissements des compositions colorées aussi poussés que ceux réalisés pour les images noir et blanc (directement au visionneur), grâce à l'agrandissement d'une *portion d'image*, mise à la place des négatifs ou positifs originaux dans le système I2S.

On remarquera qu'avec le satellite LANDSAT 1, étant donné que d'une série de prises de vues à une autre les conditions d'enregistrement restent identiques sur le plan géographique, deux images d'une même zone, prises à des dates différentes, peuvent être parfaitement superposées ; ceci facilite l'étude *diachronique* des phénomènes et constitue l'un des principaux atouts de l'observation par satellite.

Si l'on superpose (au visionneur) des images d'une même zone prises à des dates différentes, les *différentes variations de couleurs ou couleurs dominantes peuvent être interprétées comme étant le reflet de changements intervenus sur le territoire analysé entre les deux périodes de prises de vues.*

7 - ANALYSE DES IMAGES-TEST : TESTS DE PHOTO-IDENTIFICATION

7.1. Image du 9 novembre 1972 (Région de Gabès)

7.1.1. *Caractéristiques de l'image*

Cette image correspond à un territoire géographique délimité par : les Djebels Chambi et Semmama, Bir Ali Ben Khalifa au Nord, Matmata et Tozeur au Sud.

Malgré une légère couverture nuageuse qui masque la région de Sidi Bou Zid, la totalité du cliché peut être analysée.

7.1.2. *Les documents "noir et blanc"*

a) les problèmes

La reconnaissance et l'identification des unités de la surface terrestre selon les méthodes de la photo-interprétation classique sont basées sur l'analyse de la texture et de la structure de leurs images. Dans le cas de l'étude des documents bruts *(images des 4 canaux)* cette analyse doit être menée sur les 4 types d'images correspondant aux 4 canaux.

Le processus du choix des critères d'analyse est donc répété 4 fois.

D'une façon générale, étant données les difficultés de manipulation des 4 images, seules celles des canaux les plus performants vis-à-vis du ou des thèmes étudiés sont analysées d'une façon systématique.

De toute façon, quel que soit le canal, *dans le cas de territoires faiblement couverts de végétation :*

- les informations liées à la structure des unités sont constantes
- seules changent les tonalités.

En résumé, les limites des unités sont toujours présentes.

Le processus d'identification de l'unité délimitée est donc basé sur l'étude de la tonalité *(niveau de gris)* par canal ou par la comparaison des tonalités prises dans les 4 canaux. Nous arrivons alors à la limite de la méthode, liée au fait que à un niveau de gris peuvent correspondre plusieurs types d'unités et inversement une même unité peut être représentée par plusieurs niveaux de gris différents.
La comparaison des données canal par canal est donc très vite limitée et le problème est d'autant plus crucial que *les risques de confusion prennent un caractère spatial important aux échelles considérées.*

Toutefois, cette limitation perçue ne réduit pas l'intérêt de l'utilisation des documents noir et blanc. Support indispensable à toute expression et reconnaissance cartographique sur le terrain ils permettent l'identification des unités par le biais de leur structure ; ils sont seulement d'un emploi difficile dès lors qu'on veut synthétiser les informations fournies par les quatre canaux.

Leur utilisation est d'autant mieux valorisée que l'interprète fait intervenir sa connaissance du territoire.

b) Evaluation du pouvoir de discrimination

Afin d'obtenir le maximum de résultats, il est possible de combiner l'utilisation des positifs et des négatifs.

Grâce aux *documents négatifs* on obtient plus de *détails :*

- *dans les zones aquatiques en général :* lagumes, étangs, zones immergées de faible profondeur, surface d'eau libre (exemples codés de 1 à 4, *figure 3 ;* golfe de Gabès, Sebkha Sidi Mansour, Sebkha En Noual...)

- dans les zones *"humides"* ou récemment immergées (exemples codés de 5 à 9, *figure 3*)

- *dans les zones à couvert végétal important* ou bien en partie *masquées par une zone d'ombre* (exemples codés de 10 à 14, *figure 3 :* oasis, périmètres irrigués, région du Djebel Chambi et du Djebel Semmama).

Pour le restant de l'image, peu dense (la majeure partie) ce sont les *positifs* qui permettent d'extraire le plus d'informations.

En ce qui concerne plus particulièrement le couvert végétal :

- *les oasis* (codées 10 Gabès ; 15 Metouia ; 16 El Hamma ; 17 Khebili, Douz... ; 18 Nefta, Tozeur, Degache ; 19 Gafsa ; *figure 3*),
- certains *périmètres irrigués* (codés 11, 20 ; *figure 3*),
- les zones à *couvert végétal dense (Pin d'Alep, Genévrier* par exemple, codées 12, 13, 14 ; *figure 3*),

sont *détectées* aisément bien que sur les documents noir et blanc, leurs tonalités voisines de celles des zones aquatiques incitent à les confondre avec elles.

La distinction entre les oasis, les plantations d'eucalyptus, les périmètres irrigués n'est pas possible sur cette image.

Pour ce qui concerne l'identification des *zones cultivées*, en raison de l'absence de détection de structures agraires géométriques, les zones cultivées, labourées, sont souvent confondues avec les zones humides, sableuses ou à sol profond.

Les identifications faites sur la *figure 4* donnent une idée des difficultés de la reconnaissance des unités dans le cas de cette image (zone test de Zougrata) :

(*figure 4 :* 1 à 4 : zones cultivées ou à végétation *"verte"*; 5 : steppe *d'Alfa ;* 6 et 7 zone de cultures sur sable ; 8 : zone de cultures sur sol sableux profond ; 9, 10 : périmètres irrigués ; 11, 12 : zones de cultures sur limons ; 13 : zone de cultures (moins denses) sur sable ; 14 à 16 : zones de cultures sur limon ; 17 : chott ; 18 : dunes sans couvert végétal ; 19 : dunes couvertes de végétation ; 20 : parcours très dégradés à *Arthrophytum scoparium ;* 21, 22 : zones salées à *Salsola tetrandra ;* 23 : Steppe à *Rantherium* zone de cultures : Garaet Zougrata.)

c) Comparaison entre les canaux

La différence entre les images des 4 canaux est difficile à établir.

Dans le cas de territoires faiblement couverts de végétation où

SUITE EN

F 3

MICROFICHE N°

00230

République Tunisienne

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

CENTRE NATIONAL DE

DOCUMENTATION AGRICOLE

TUNIS

الجمهورية التونسية

وزارة الفلاحة

المركز القومي
للتوثيق الفلاحي

تونس

F 3



E000-301 E000-001 N033-301 E000-30
09NOV72 C N34-22/E000-13 N N34-21/E000-14 MSS 5 R SUN EL33 AZ152 190-1515-A-1-N-D-2L NASA ERTS E-1109-09311-5 01

E000-301 E000-001 E000-301

FIGURE 3

Agrandissement au 1/1 000 000 de l'image du
9 novembre 1972 (canal 5 - Région de Gabès)
Codage des unités identifiées.



FIGURE 4

Agrandissement au 1/500 000 de l'image du
9 novembre 1972 (canal 5 - Zone test de Zougrata).
Codage des unités identifiées.

l'influence des variables physiques de la surface terrestre est prépondérante, la différence entre les canaux est moins immédiatement perceptible que pour les territoires présentant un couvert végétal important.

Des observations ponctuelles ou localisées permettent les remarques suivantes :

- *les canaux (4,5) et (6,7) sont respectivement fortement corrélés entre eux ;*
- *les canaux 4 et 5 fournissent le plus d'informations concernant le couvert végétal, tandis que les canaux 6 et 7 sont les plus contrastés pour ce qui concerne l'eau et le sol ;*
- *cependant les canaux 5 et 6 ne sont pas fondamentalement différents ; le canal 6 conservant une grande partie des informations propres au canal 5.*

Pour l'étude de certains thèmes, la comparaison des canaux extrêmes (4 et 7) est très suffisante ; c'est le manque de contraste - qui absorbe et noie la plus grande partie des données relatives au couvert végétal dans le canal 4 - qui nous conduit à sélectionner le couple *"canal 5 + canal 7"* ; ces deux canaux sont les plus contrastés pour l'étude de la végétaiton et du milieu.
On utilisera le canal 4 essentiellement pour une meilleure discrimination des zones aquatiques de faible profondeur, zones côtières, lagunaires, marais et étangs.

7.1.3. *Les équidensités colorées (figure 5)*

Cette technique d'exploitation automatique des documents photographiques permet d'analyser les images *canal par canal*. Son avantage est avant tout d'être une méthode *objective* qui permet d'étendre la reconnaissance d'un certain nombre de niveaux de densité à l'ensemble d'un document.

Cependant, la compression des données ainsi réalisée (simplification) par l'analyse d'un petit nombre de niveaux accentue les risques de confusions qui sont d'autant plus importants que :

- l'échelle des documents est petite,

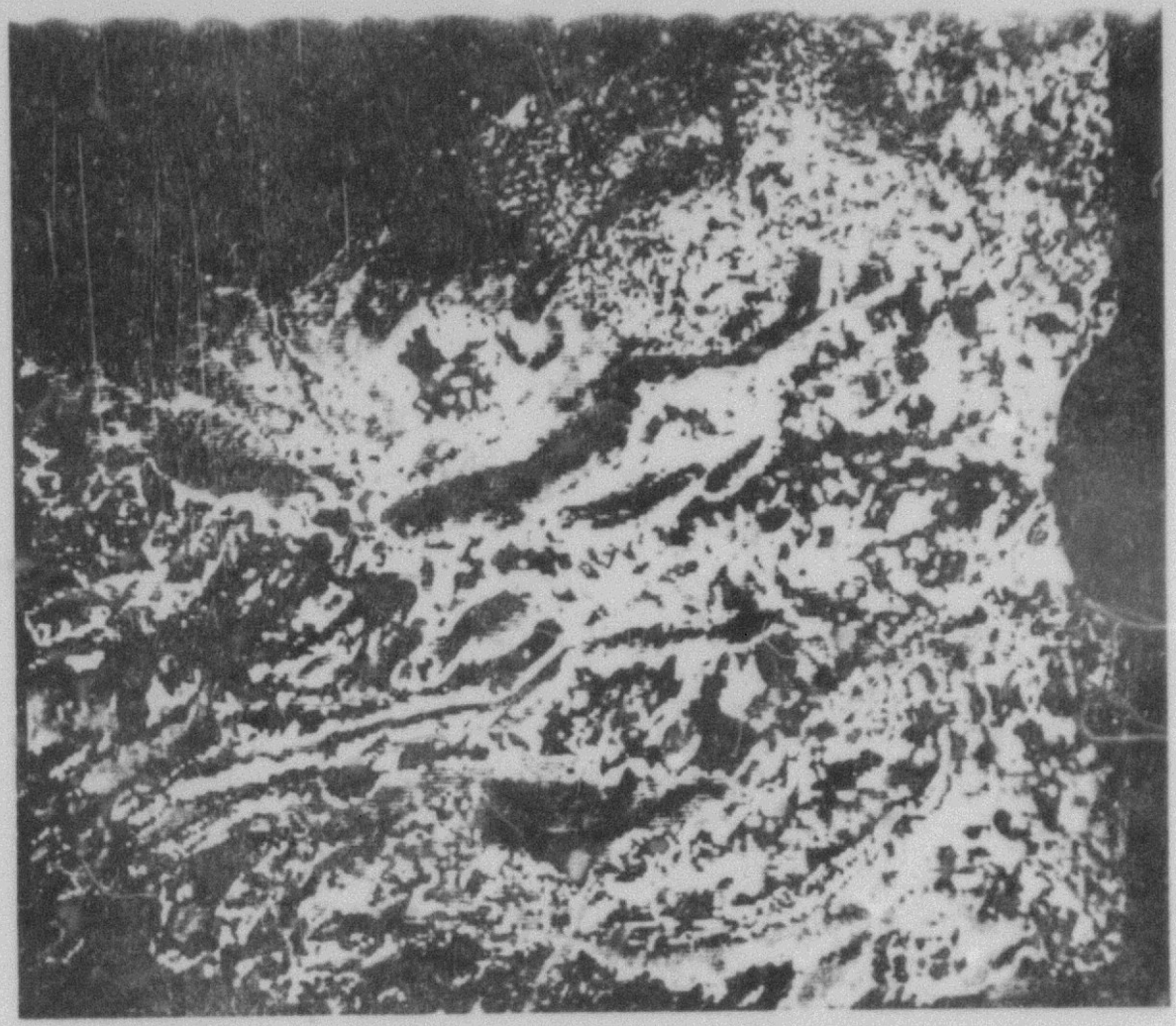




FIGURE 5
Equidensité colorée de l'image du 9 novembre 1972
(canaux 5 et 7) obtenue grâce au système *DIGICOL*

- le type d'image concerne des unités en mosaïques et fortement imbriquées,
- la diversité des milieux (plusieurs régions écologiques concernées) accentue la variabilité des phénomènes,
- la résolution du système utilisé limite ses performances.

Dans le cas de l'image considérée, étant données les difficultés d'identification d'après les tonalités des unités (§ 7.1.2.), la simplification du document offre une aide très restreinte.
Car quelle que soit la combinaison choisie et, bien que certaines limites soient toujours apparentes, l'analyse des plages colorées n'aide pas à l'identification des unités. Ce qui est notre problème le plus immédiat.

7.1.4. *Les compositions colorées*

Comme cela a déjà été signalé, les limites d'unités sont déjà acquises au niveau des documents bruts. *Toutefois, c'est la réunion des informations des 4 canaux-présentée sous la forme de visualisation colorée-qui permet une différenciation accrue des unités.*

La variation de la densité résultante de la superposition de 2, 3 ou 4 images est ici traduite par la dominance plus ou moins forte des couleurs complémentaires de celle des filtres affectés à chacun des canaux considérés.

Le changement de filtres et la superposition de positifs ou de négatifs ont pour objet de diversifier les combinaisons lors de la recherche du document le plus intéressant.

Parmi toutes les combinaisons testées nous retiendrons :

Canal 5 (filtre vert) + Canal 7 (filtre rouge), documents positifs, 100 % illumination (figure 6)

Les unités qui apparaissent dans la couleur verte ou rouge *traduisent les différences les plus marquées entre les 2 canaux.*

Les zones les plus denses dans le canal 5 absorbent la couleur verte du filtre affecté à ce canal ; elles apparaissent *en rouge :* c'est le cas des zones de végétation "verte" des *périmètres irrigués* (codés 11 et 20, *figure 3*) et des oasis (codées 10, 15 à 19, *figure 3*).



FIGURE 6

Composition colorée de l'image du 9 novembre 1972
(région de Gabès)
canaux 5 (filtre vert) + canal 7 (filtre rouge)
100 % d'illumination
Codage des unités identifiées

Les zones les plus denses dans le canal 7 apparaissent alors en *vert :* ce sont les *zones d'eau :* eau libre en surface (codées 3, 4, 21 et 25, *figure 3).*

Les couleurs intermédiaires de toute la gamme considérée traduisent la diversité d'unités dont la réponse spectrale est moins différenciée sur l'un ou l'autre des canaux.

Par rapport aux documents "noir et blanc", on *différencie* les classes d'unités suivantes :

1) *Zones humides ou aquatiques*

- eau profonde (golfe de Gabès)
- eau libre moyennement profonde (codée 1, *figure 6)*
- eau peu profonde (codée 2, *figure 6)*
- zones humides (ou émergées récemment) (codées 4, *figure 6)*

Le critère d'appréciation "profondeur de l'eau", purement arbitraire, a été choisi pour des facilités de description. Il est vraisemblable que les images traduisent beaucoup plus des différences de qualité de l'eau que de profondeur.

2) *Zones de végétation*

Parmi les oasis identifiées sur les documents en noir et blanc (codées 10, 15, à 19, 23, 24 ; *figure 3),* 2 d'entre elles (codées 23 et 24, même figure) présentent une image colorée différente et s'individualisent des autres.

Les deux périmètres irrigués identifiés (codés 11 et 20, *figure 3,* ont une image très proche de celle des oasis de Gabès, Gafsa, Tozeur ; (codées 10, 15 à 19 ; *figure 3).*

Les unités de végétation à Pin d'Alep et Genévrier (codées 12 à 14, *figure 3)* s'individualisent nettement et se différencient parfaitement des autres unités, sur cette composition colorée. La distinction entre les Djebels couverts de végétation et des Djebels du Centre ou du Sud de l'image, à couvert végétal très faible ou inexistant, est très nette.

L'apport essentiel de cette composition colorée réside dans la distinction des *zones cultivées*. On reconnaît de grandes surfaces cultivées (codées de 5 à 11, *figure 6)* ; et plus particulièrement, dans la zone-test de Zougrata, on arrive à différencier les unités cultivées (codées de 1 à 4, *figure 4)* parmi toutes les zones de cultures identifiées sur la même figure.

7.2. Image du 7 février 1973 (Région de Gabès)

7.2.1. *Caractéristiques de l'image*

Malgré un léger décalage géographique vers le Nord, la plus grande partie du territoire déjà étudié est représentée sur cette image. *Seules les zones de Douz, Khebili situées les plus au Sud sont absentes de l'image.*

Comparativement à l'image du 9 Novembre on remarque :

- l'absence totale de couverture nuageuse
- le plus fort contraste général des clichés
- la densité globale plus forte surtout dans le quart Nord-Ouest de l'image.

On tiendra compte de cette différence de densité :

- en travaillant soit à partir des négatifs afin d'obtenir plus de détails dans la partie de l'image la plus sombre, soit à partir des positifs pour la zone la plus claire (zone-test de Zougrata en particulier).
- en modifiant la qualité de l'agrandissement de façon homogène.

7.2.2 *Les documents noir et blanc*

a) Evaluation du pouvoir de discrimination

D'une façon générale toutes les observations faites lors de l'analyse de la première image sont extrapolables à celle-ci. Afin d'éviter un grand nombre de répétitions, *nous nous bornerons à ne développer et souligner que les différences d'observations aussi bien pour les documents noir et blanc que colorés, qu'elles soient positives ou négatives.* Ceci,

afin de parvenir à évaluer l'importance du rôle de la date des prises de vues.

b) Observations générales

Quelques points "forts" de l'image, nouveaux ou d'aspect différent, sont détectables d'une façon instantanée.

1) *zones aquatiques ou "humides"*

On remarque essentiellement :

. les différences de niveau d'eau dans les sebkhet Sidi Mansour et en Noual

. l'importance des zones immergées (codées 5,6 ; *figure 7)*

. les zones apparemment perçues comme plus "humides" (codées 1, *figure 7)*

Par la comparaison des images de Novembre et de Février, on constate donc une *augmentation en surface des zones humides et d'eau libre*. Cependant, on remarque également :

- la disparition des 2 zones identifiées en eau libre (codées 21, 25 ; *figure 3* ; 2, *figures 7 et 8)*
- l'apparition d'une nouvelle zone d'eau libre, à contour géométrique (codée 1, *figure 8)*

2) *zones terrestres dont les caractéristiques de surface ont changé*

Ce sont les zones codées :

3 *(figure 7)* ; zones d'accumulation

4 et 8 *(figure 7)* ; limites très accentuées des glacis

3) *zones de végétation*

Toutes les observations notées dans le paragraphe 7.1.2. sont applicables à cette image. De nombreux contrastes différents sont perceptibles et permettent de conclure soit à l'augmentation du couvert végétal, soit à l'influence de pluies récentes élevant le niveau d'humidité général des sols.

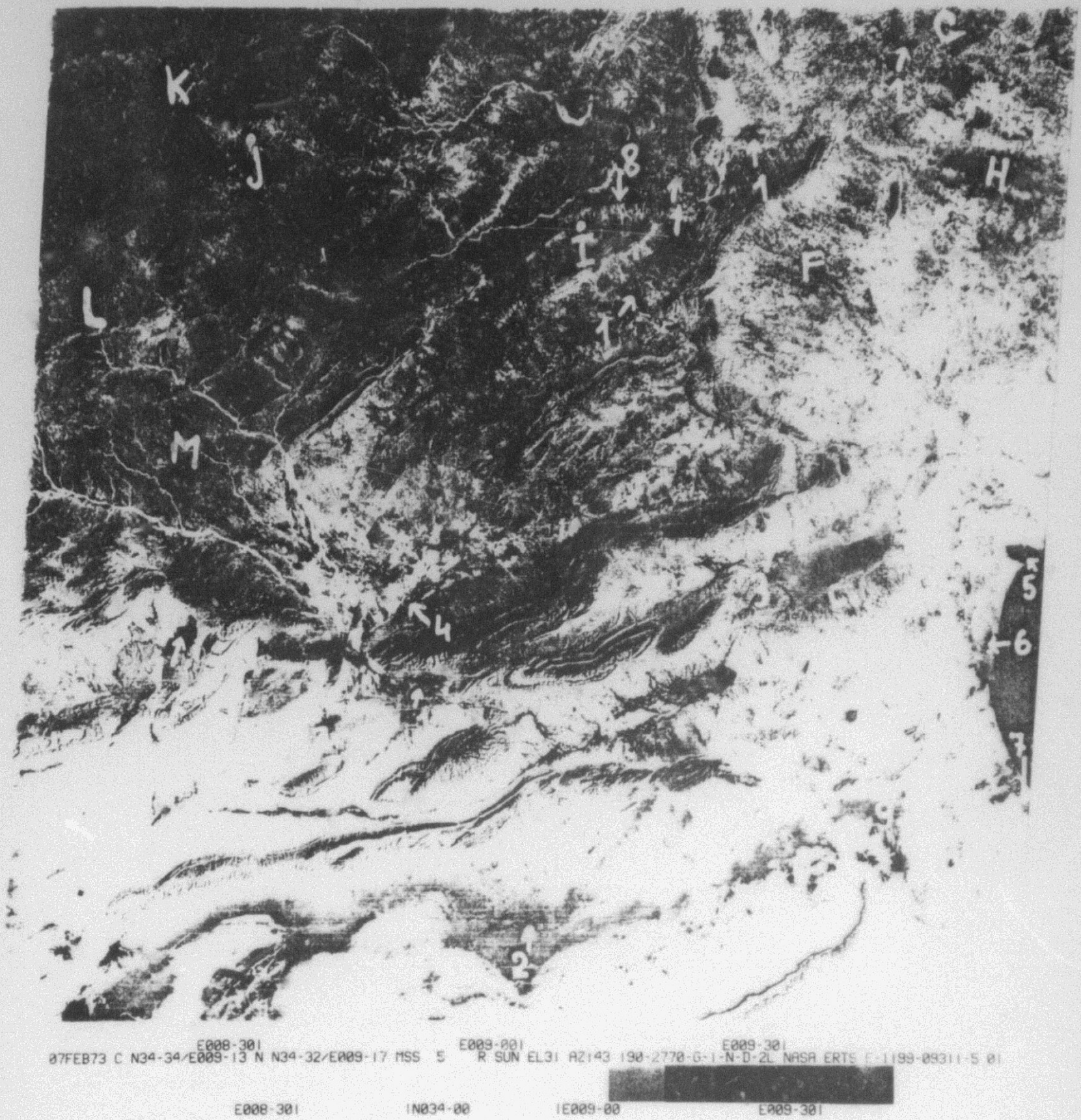


FIGURE 7

Agrandissement au 1/1 000 000 de l'image du 7 février 1973
(canal 5 - Région de Gabès)
Codage des unités identifiées



FIGURE 8

Agrandissement au 1/1 000 000 de l'image du 7 février 1973
(canal 7 - Région de Gabès)
Codage des unités identifiées

L'étude des documents noir et blanc ne permet pas de résoudre le problème dans sa totalité. C'est la comparaison des données des 4 canaux qui est plus fructueuse.

c) Comparaison des canaux

Par rapport aux données du 9 Novembre, on constate une différence beaucoup plus nette entre les images des 4 canaux.

Les couples de canaux (4,5) et (6,7) sont plus fortement corrélés entre eux. Ils fournissent respectivement une information très proche.

Le canal 6, s'il recèle une partie des informations propres au canal 5, est beaucoup plus proche du canal 7 que ne l'avaient montré les observations des images du 9 Novembre.

Les remarques concernant l'utilisation des différents canaux sont également valables ; ce sont toujours les canaux 5 et 7 qui sont les plus contrastés vis-à-vis de la végétation, du sol et de l'eau ; en conséquence, ils seront utilisés préférentiellement.

Quelques observations :

- si on reprend l'exemple de la Sebkha Sidi Mansour ; le canal 7 donne l'image de l'étendue d'eau libre existante (codée 3, *figure 8)* ; dans le canal 5, une partie de cette eau reste perceptible ; dans le canal 4 seul le détail interne de la sebkha est visible.

- la surface d'eau libre nouvelle (codée 1, *figure 8)* n'apparaît qu'à partir du canal 6.

- dans la zone de drainage de la même sebkha ("réticules" convergeant vers la sebkha) on observe dans le canal 5 un réseau très sombre (codé A, *figure 7)* qui disparaît en partie dans le canal 7. On peut impliquer cette variation de réponse spectrale à l'existence d'un couvert végétal qui n'était pas (ou très peu) perceptible sur les images de Novembre.

Un certain nombre d'observations de cette nature peuvent être faites sur l'ensemble de l'image, seulsles plus évidentes ont été exposées. On peut noter que les problèmes d'identification ne sont pas toujours résolus.

L'étude des documents noir et blanc ne permet pas de résoudre le problème dans sa totalité. C'est la comparaison des données des 4 canaux qui est plus fructueuse.

c) Comparaison des canaux

Par rapport aux données du 9 Novembre, on constate une différence beaucoup plus nette entre les images des 4 canaux.

Les couples de canaux (4,5) et (6,7) sont plus fortement corrélés entre eux. Ils fournissent respectivement une information très proche.

Le canal 6, s'il recèle une partie des informations propres au canal 5, est beaucoup plus proche du canal 7 que ne l'avaient montré les observations des images du 9 Novembre.

Les remarques concernant l'utilisation des différents canaux sont également valables ; ce sont toujours les canaux 5 et 7 qui sont les plus contrastés vis-à-vis de la végétation, du sol et de l'eau ; en conséquence, ils seront utilisés préférentiellement.

Quelques observations :

- si on reprend l'exemple de la Sebkha Sidi Mansour ; le canal 7 donne l'image de l'étendue d'eau libre existante (codée 3, *figure 8)* ; dans le canal 5, une partie de cette eau reste perceptible ; dans le canal 4 seul le détail interne de la sebkha est visible.

- la surface d'eau libre nouvelle (codée 1, *figure 8)* n'apparaît qu'à partir du canal 6.

- dans la zone de drainage de la même sebkha ("réticules" convergeant vers la sebkha) on observe dans le canal 5 un réseau très sombre (codé A, *figure 7)* qui disparaît en partie dans le canal 7. On peut impliquer cette variation de réponse spectrale à l'existence d'un couvert végétal qui n'était pas (ou très peu) perceptible sur les images de Novembre.

Un certain nombre d'observations de cette nature peuvent être faites sur l'ensemble de l'image, seulsles plus évidentes ont été exposées. On peut noter que les problèmes d'identification ne sont pas toujours résolus.

7.2.3. *Les équidensités colorées*

Confrontés au même type d'image et aux mêmes structures géographiques, les conclusions sur l'utilisation des équidensités colorées sont identiques et extrapolables à l'image du 7 février *(figure 10)*.

7.2.4. *Les compositions colorées*

La combinaison de l'utilisation des positifs et des négatifs est beaucoup plus fructueuse.

Toutes les observations notées ci-dessous concernent les deux types de documents :

- l'étude du couvert végétal dense et d'une façon générale des zones "sombres" est surtout faite à partir des négatifs (zones nord ouest)
- les positifs sont utilisés essentiellement pour la zone-test de Zougrata et d'une façon générale pour la moitié Sud de l'image.

Les combinaisons colorées *canal 5 (vert ou rouge) + canal 7 (rouge ou vert)* obtenues à partir des positifs et des négatifs sont les plus discriminantes vis-à-vis des thèmes étudiés *(figures 11 et 12)*

a) Zones aquatiques

Toutes les remarques ont été faites lors de l'analyse des documents noir et blanc.

b) Zones de végétation

1) Grâce à cette composition et contrairement à ce qui avait été observé, *les oasis et les périmètres* irrigués (y compris ceux de la région de Sidi Bou-Zid non identifiés auparavant en raison du couveri nuageux) se distinguent par une couleur différente.

2) Parmi les *oasis*, toutes ne présentent pas la même image : les unités siglées en 7 et 9 se séparent des autres par une réponse spectrale différente *(figure 7)*.

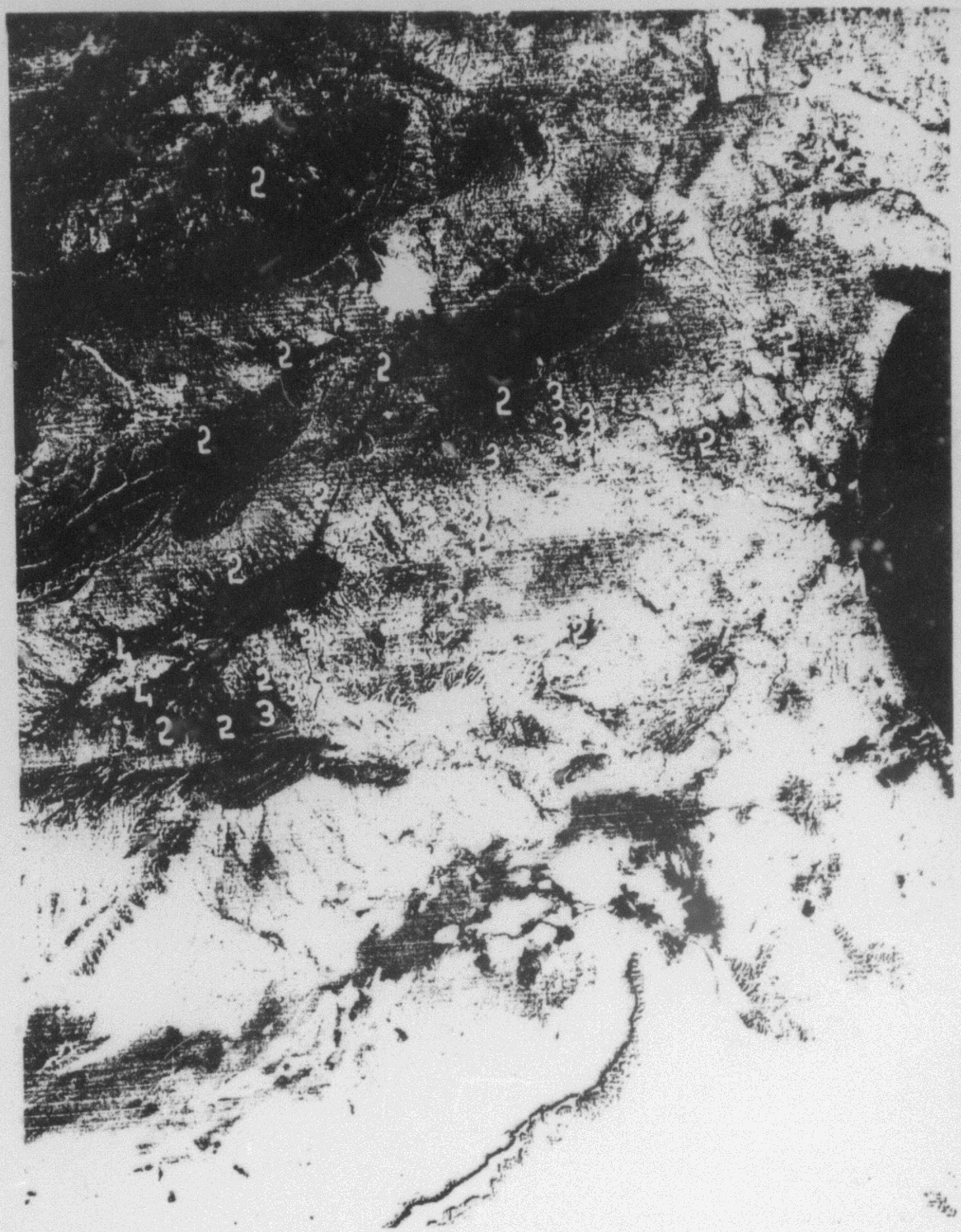


FIGURE 9

Agrandissement au 1/500 000 de l'image du 7 février 1973
(canal 5 - Région de Gabès)
Codage des unités identifiées



Equidensité colorée de l'image du 7 février 1973
(canaux 5 et 7) obtenue grâce au système Diane

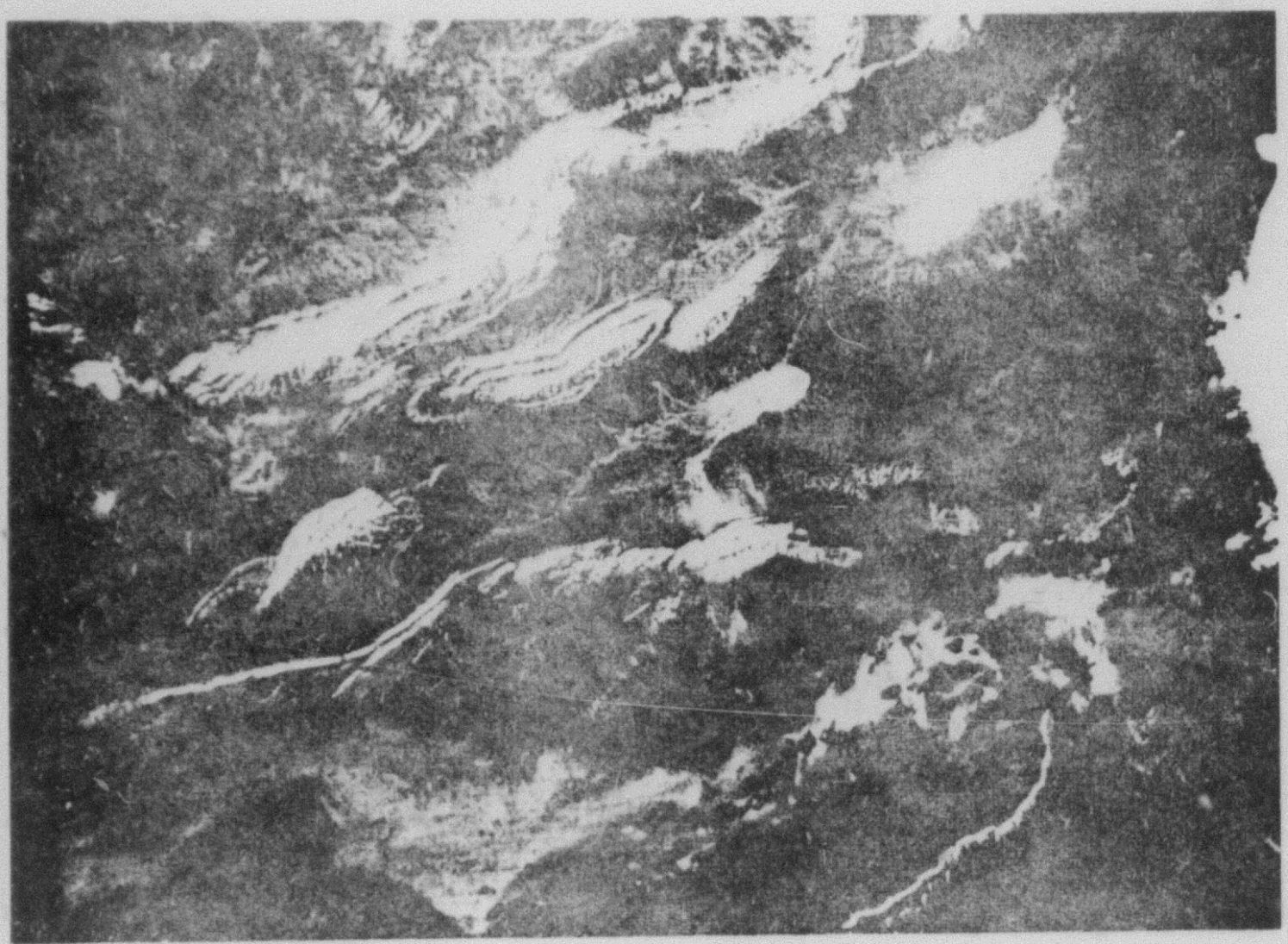


FIGURE 11

Composition colorée de l'image du 7 février 1973
canal 5 (vert) + canal 7 (rouge) - 100 % d'illumination
documents négatifs



Composition colorée de l'image du 7 février 1973
canal 5 (rouge) + canal 7 (vert)
- d'illumination - documents positifs



Composition colorée de l'image du 7 février 1973
canal 5 (rouge) + canal 7 (vert)
- d'illumination - documents positifs

3) Si *les périmètres irrigués* se différencient facilement des oasis, ils présentent cependant la même image que les zones très cultivées ou de végétation "verte" naturelle importante.

Pour la zone-test de Zougrata *(figure 9)*, les compositions colorées permettent l'identification de zones de végétation "verte" (codées 2, 4 *figure 9)* qui n'existaient pas ou n'apparaissaient pas au mois de Novembre.

Malgré cette reconnaissance plus poussée, on remarque qu'aucun critère significatif ne permet de séparer sur cette image et à cette époque de l'année :

- les périmètres irrigués (codés 1, *figure 9*)
- les zones très cultivées (codées 2, *figure 9*)
- les zones de végétation des milieux salés, très actives à ce moment là (zones à *Salsola tetrandra*, codées 4, *figure 9)*

Pour la reconnaissance des périmètres irrigués, le problème est minime puisque leur nombre est peu élevé et, surtout, parce qu'ils présentent généralement un contour géométrique perceptible à cette échelle ; leur reconnaissance est possible.

La plus grande ambiguïté réside en fait dans la confusion des zones très cultivées à base de céréales et la végétation des milieux salés.

Un point important est tout de même résolu, même en tenant compte de cette confusion (marge d'erreur tolérable), par la distinction des zones cultivées (codées 2, *figure 9)* et des zones non cultivées (codées 3, *figure 9)*.

En outre il est beaucoup plus général de trouver la mosaïque : "terrains céréaliers + terains de parcours plus ou moins dégradés" dont l'image présente un faciès caractéristique de "flou" (teinte rosée sur cette composition colorée) observé pour ce type d'unités de cultures, (autres que les zones cultivées des lits d'oueds, les garaet ou les bas fonds).

Etendues à l'ensemble du document, ces observations sont confirmées dans leur totalité, y compris la confusion "cultures denses + végétation des milieux salés" notée dans le périmètre de Sidi Bou Zid.

Il est donc possible de dresser un inventaire succinct (non exhaustif toutefois dans les identifications ponctuelles) des zones cultivées le 7 février 1973 (codées de A à N sur la *figure 7).*

On remarque que la zone codée N est située le plus au Sud de l'image, aucune autre zone cultivée (même très petite) n'a pu être décelée sur cette image.

7.3. Images du 9 Novembre 1972 et du 7 Février 1973 de la région de Bir Soltane

7.3.1. *Caractéristiques des images*

Comme précédemment, ces images présentent un léger décalage géographique l'une par rapport à l'autre. Décalée vers le Nord, l'image du 7 Février, recoupe les images précédentes au niveau du Chott Djerid et du Djebel Tebaga (codés 1 et 2, *figure 14).*

Toutes les images sont de bonne qualité et totalement exploitables malgré la présence de quelques nuages (décelables par leur ombre portée au sol) sur l'image du 9 Novembre (codées 6, 7, 8, *figure 13).*

Pour l'ensemble de cette zone, nous somme en présence de milieux très différents de ceux étudiés précédemment. Aux unités spatialement plus étendues, plus homogènes et à l'absence de couvert végétal dense, correspondent des images relativement homogènes où les variables physiques prépondérantes jouent le rôle principal dans les variations des réponses spectrales.

Pour ces différentes raisons et surtout parce que l'étude de la végétation n'est pas envisageable à cette échelle là dans ces territoires où le couvert végétal est faible (prédominance du sol) :

. *nous nous bornerons seulement à quelques réflexions.*

. *nous regrouperons l'analyse des 2 images.*

7.3.2. *Les documents noir et blanc*

Pour ces ensembles de milieux, ce sont les documents noir et blanc qui, en fait, fournissent le plus de renseignements. Les grandes limites d'unités perceptibles (erg, reg, chott, codés 1, 2, 3, *figure 13*), les types de structures suffisamment différenciés font que l'utilisation des documents noir et blanc est largement suffisante.

Sur les images du canal 4, quelques limites apparaissent plus contrastées que sur les autres canaux :

- limite entre le reg et les sols très salés du bord du Chott Djerid (codés 4 et 5, *figure 13*, image du 9 Novembre)
- limite entre le grand erg et les dunes du bord du Chott Djerid (codés 1 et 2, *figure 14*, image du 7 Février).

Ces limites d'unités, fortes dans le canal 4 des 2 images (respectivement) sont attenuées sur les autres canaux, surtout la limite entre le grand erg et les dunes les plus proches du Chott Djerid, que ce soit sur l'image du 9 Novembre ou sur celle du 7 Février.

C'est la plus grande différence entre les images que nous ayons pu observer.

Pour le couvert végétal, mise à part l'identification des oasis des régions de Douz et Kebili, aucune observation ne permet de conclure à l'identification d'unités de végétation.

7.3.3 *Les équidensités colorées (figure 15)*

Contrairement aux images précédentes l'aide des équidensités est intéressante. Face à des unités simples très étendues et à des documents présentant un contraste assez faible, les équidensités offrent l'augmentation des contrastes favorables à une meilleure interprétation des images.

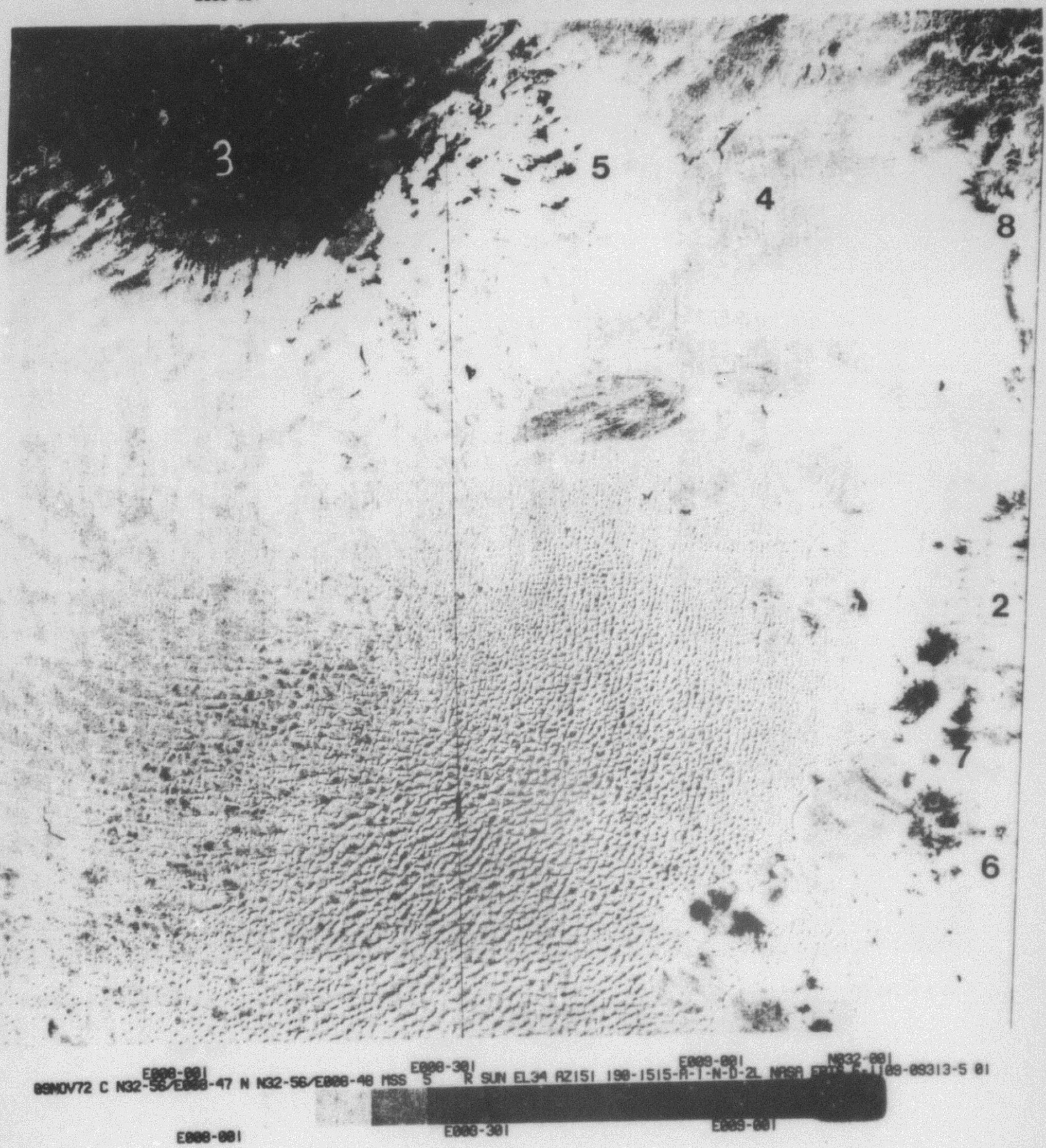


FIGURE 13

Agrandissement au 1/1 000 000 de l'image du 9 novembre 1972
(canal 5 - Région de Bir Soltane)
Codage des unités identifiées

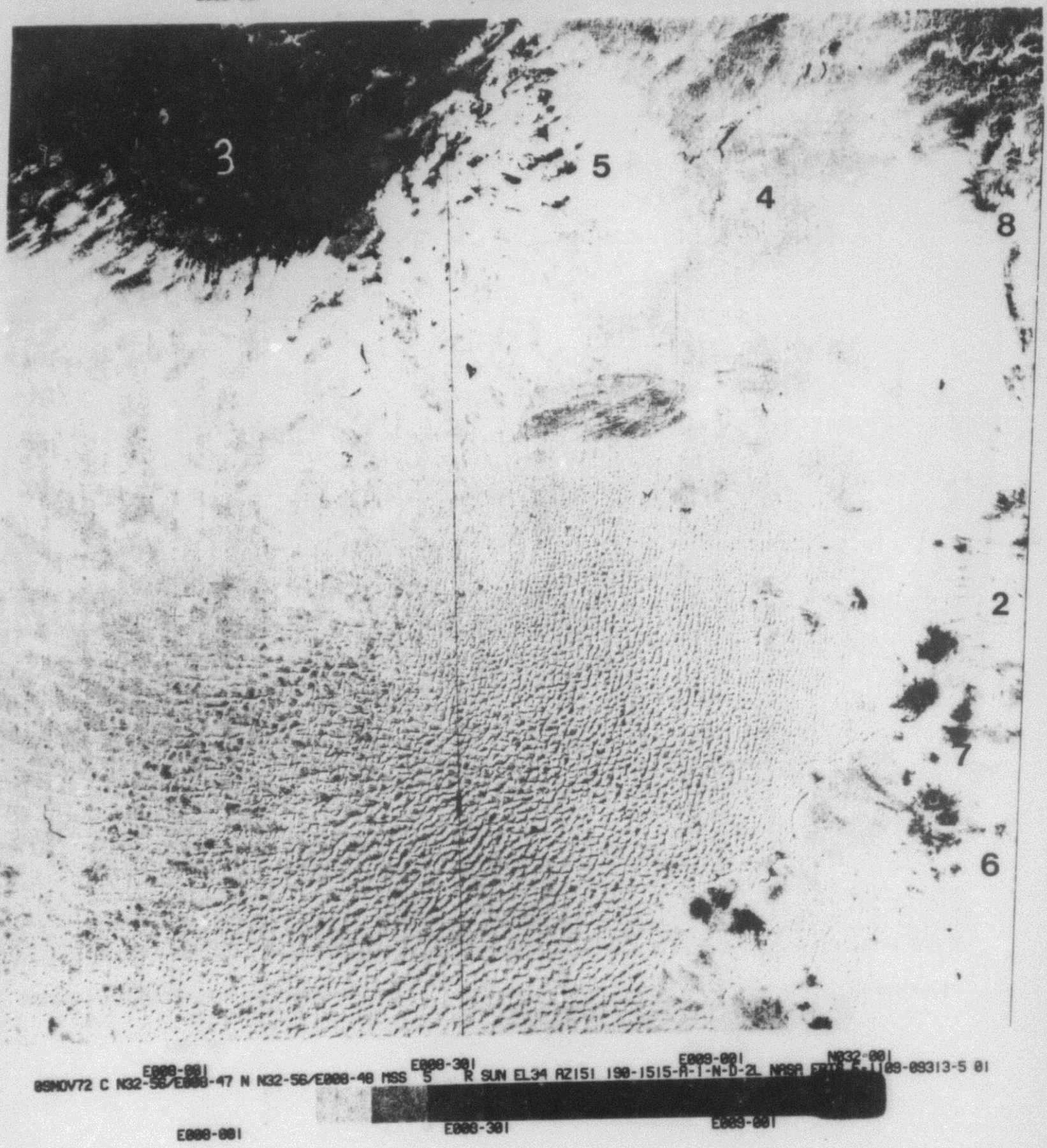


FIGURE 13

Agrandissement au 1/1 000 000 de l'image du 9 novembre 1972
(canal 5 - Région de Bir Soltane)
Codage des unités identifiées

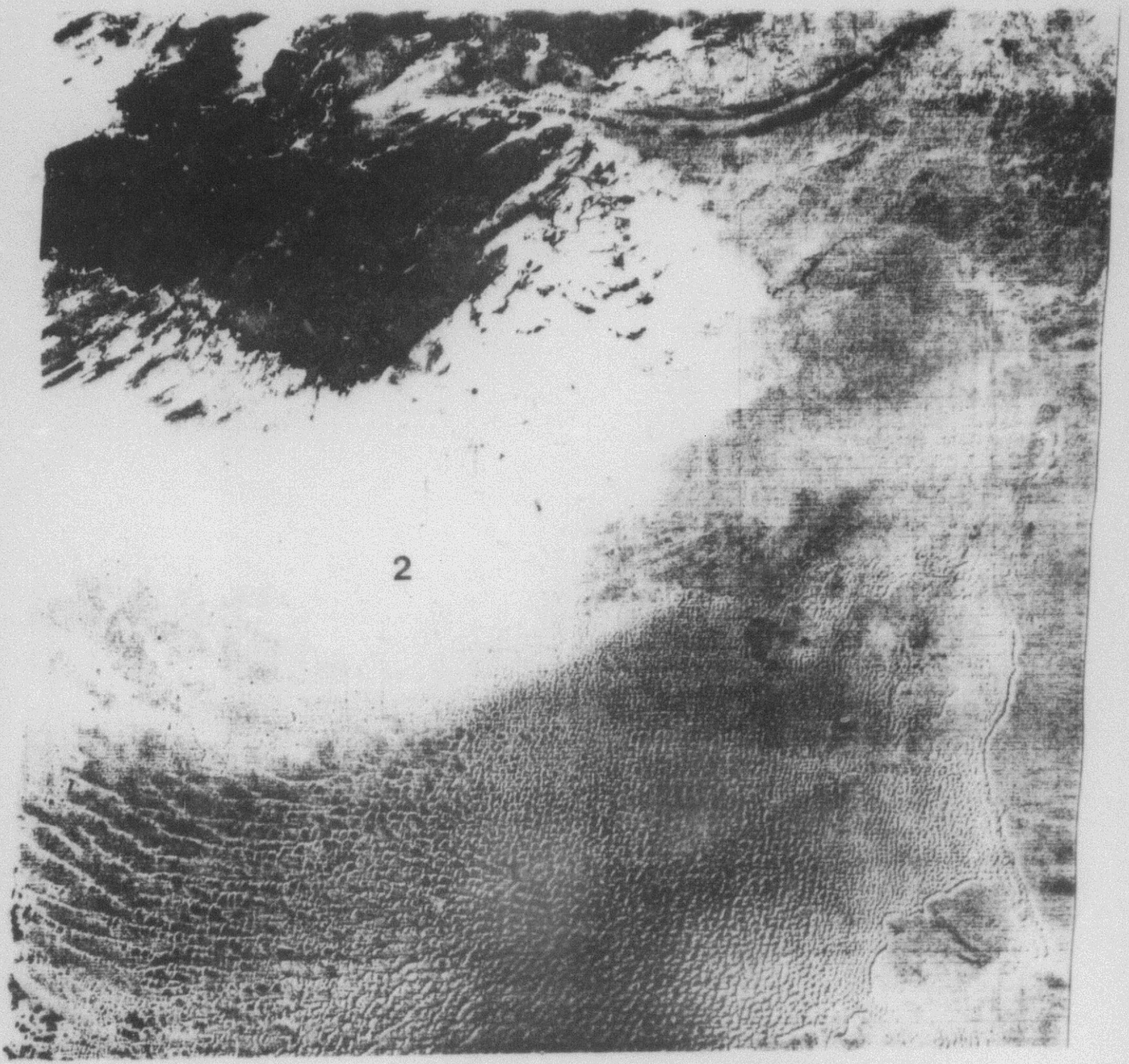


FIGURE 14

Agrandissement au 1/1 000 000 de l'image du 7 février 1973
(canal 4 - Région de Bir Soltane)
Codage des unités identifiées

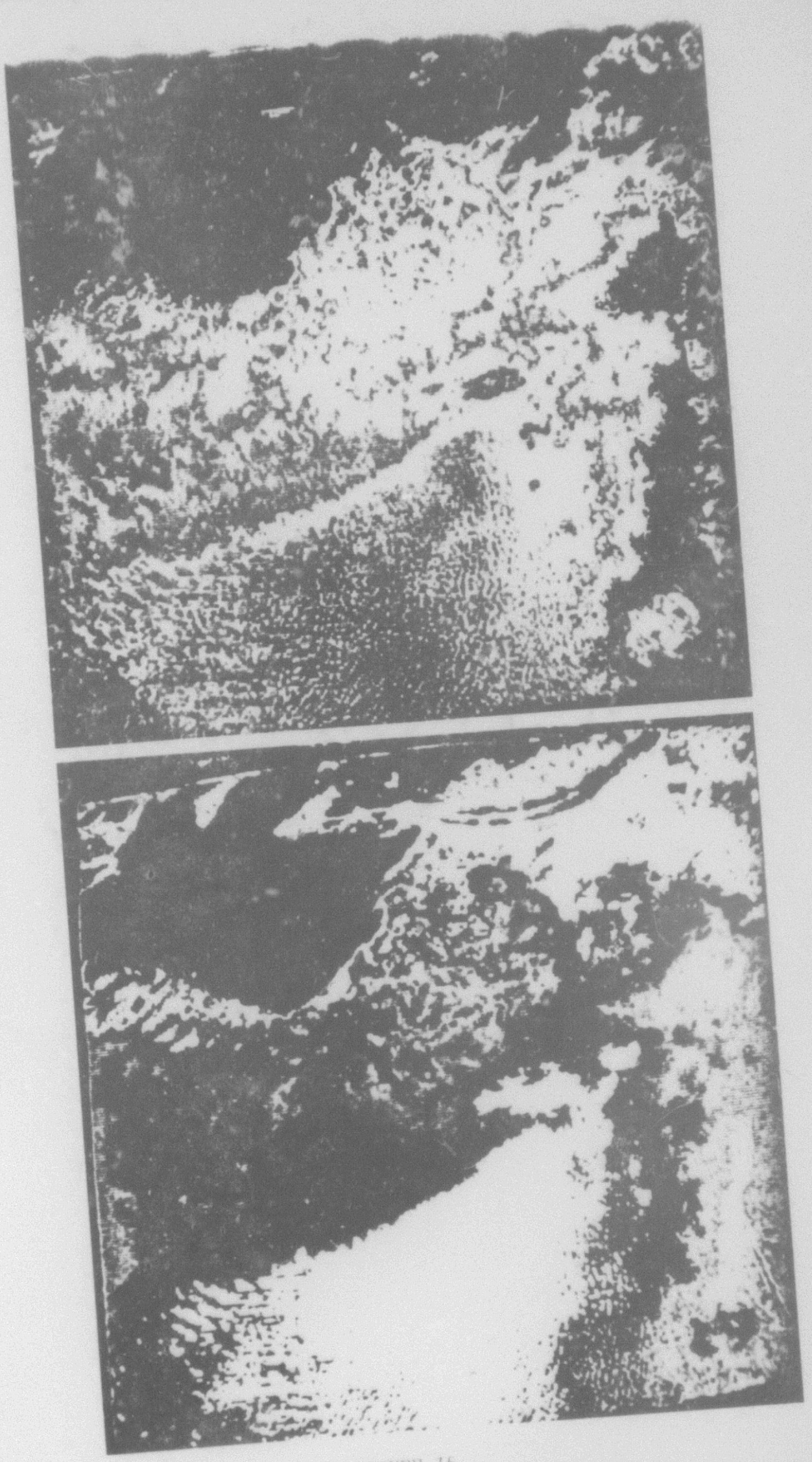


FIGURE 15

Equidensité colorée de l'image du 7 février 1973 (canaux 5 et 7) obtenue grâce au système *DIGICOL*



FIGURE 16

Composition colorée de l'image du 7 février 1973
canal 5 (vert) + canal 7 (rouge)
100 % d'illumination - documents positifs

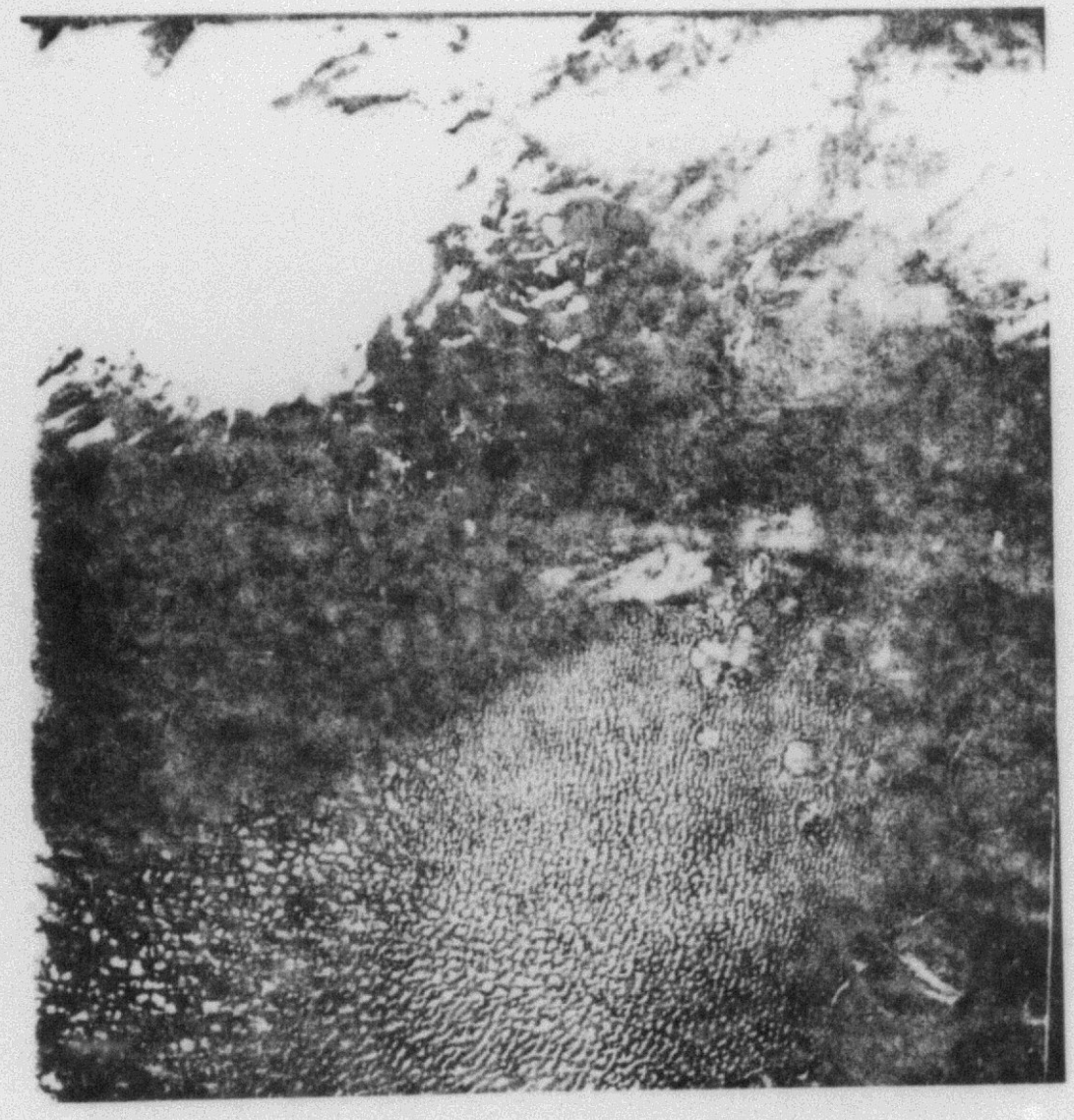


FIGURE 17

Composition colorée de l'image du 7 février 1973
canal 5 (rouge) + canal 7 (vert)
100 % d'illumination - documents négatifs

Le pouvoir de résolution insuffisant du système (au niveau de l'expression visuelle) n'est plus un obstacle, comme cela était la cas face aux unités complexes et fortement imbriquées des images précédentes.

7.3.4. *Les compositions colorées (figures 16 et 17)*

Comme nous l'avons laissé suposer dans le § 7.3.1. les compositions colorées, quelle que soit leur combinaison ne sont d'aucune aide dans l'identification des unités perceptibles. Le maigre avantage de leur utilisation réside dans le fait que les oasis apparaissent différentes du Chott Djerid.

Sans vouloir conclure d'une façon toute négative, nous émettrons la conclusion suivante, que aux époques considérées, et à l'heure des enregistrements, les variations de réponses spectrales analysées par le système des compositions colorées, ne sont pas significatives vis-à-vis de l'identification du couvert végétal et des phénomènes y aférant.

7.4. L'analyse diachronique

Malgré les décalages géographiques entre les différentes images, toutes sont parfaitement superposables, tant les déformations dues à l'enregistrement sont négligeables.

On peut alors combiner la superposition :

- des négatifs *ou* des positifs
- des négatifs *et* des positifs

Des différents canaux, afin d'obtenir le contraste maximum et le plus de différences possibles.

Quelle que soit la combinaison choisie, au contraire des compositions colorées étudiées jusqu'à présent, les variations de couleur ne sont plus représentatives de la diversité des unités perceptibles mais elles sont la visualisation des différences entre les deux images.

Le pouvoir de résolution insuffisant du système (au niveau de l'expression visuelle) n'est plus un obstacle, comme cela était la cas face aux unités complexes et fortement imbriquées des images précédentes.

7.3.4. *Les compositions colorées (figures 16 et 17)*

Comme nous l'avons laissé suposer dans le § 7.3.1. les compositions colorées, quelle que soit leur combinaison ne sont d'aucune aide dans l'identification des unités perceptibles. Le maigre avantage de leur utilisation réside dans le fait que les oasis apparaissent différentes du Chott Djerid.

Sans vouloir conclure d'une façon toute négative, nous émettrons la conclusion suivante, que aux époques considérées, et à l'heure des enregistrements, les variations de réponses spectrales analysées par le système des compositions colorées, ne sont pas significatives vis-à-vis de l'identification du couvert végétal et des phénomènes y aférant.

7.4. L'analyse diachronique

Malgré les décalages géographiques entre les différentes images, toutes sont parfaitement superposables, tant les déformations dues à l'enregistrement sont négligeables.

On peut alors combiner la superposition :

- des négatifs *ou* des positifs
- des négatifs *et* des positifs

Des différents canaux, afin d'obtenir le contraste maximum et le plus de différences possibles.

Quelle que soit la combinaison choisie, au contraire des compositions colorées étudiées jusqu'à présent, les variations de couleur ne sont plus représentatives de la diversité des unités perceptibles mais elles sont la visualisation des différences entre les deux images.

Ces différences résultent :

a) - de l'intégration possible du changement des conditions atmosphériques (aucun coefficient de correction ne peut être introduit à ce niveau)

b) - des changements intervenus

- dans la composition des unités de la surface terrestre (ex : utilisation du sol)

- dans les caractéristiques de leur réponse spectrale (variations saisonnières, fonctionnement).

Pour le cas le plus simple de l'étude de la dynamique d'un thème (eau par exemple) perçu sur un canal, et ne nécessitant l'intervention que de celui-ci, la superposition des deux images correspondantes suffit à l'analyse. La variation des couleurs sera représentative des changements intervenus entre les 2 périodes d'enregistrement.

Dans le cas d'un thème complexe comme nous l'avons vu pour l'étude des zones cultivées, impliquant la distinction entre "les terres cultivées/non cultivées/végétation naturelle" la solution est moins évidente.

La reconnaissance des zones cultivées, accompagnées des confusions déjà expliquées, n'est possible que par la juxtaposition des informations fournies par les canaux 5 et 7.

Supposant l'identification préalable du thème, l'analyse diachronique, dans le cas présent, n'aidera à l'étude de l'évolution des surfaces cultivées que si on arrive à superposer les canaux 5 et 7 des deux périodes considérées.

Test sur la zone de Zougrata

1) Les positifs du canal 5 des images de novembre et de février ont été superposés ; le filtre vert est affecté à l'image de novembre, le filtre rouge à l'image de février *(figure 16)*.
Les différences observées traduites en vert sont imputables à l'image de février et sont codées 1 et 2 sur la *figure 16* (1 : zones plus humides ;

2 cultivées, ou végétation "active en février")
Inversement, les différences imputables à l'image de Novembre sont traduites en rouge et sont codées 3 (zones labourées ou caractéristiques superficielles du sol différentes ; en tout cas : non cultivées).
L'inconvénient de cette méthode est de favoriser les distinctions faites entre zones relativement peu denses au détriment des unités sombres sur les 2 documents (codées 4 sur la même figure).
Par contre son avantage est de donner un aperçu de l'étendue spatiale et de permettre la localisation des changements majeurs intervenus entre les 2 dates de prises de vues.

2) La superposition des canaux 5 et 7 des 2 images soulève un certain nombre de problèmes liés :

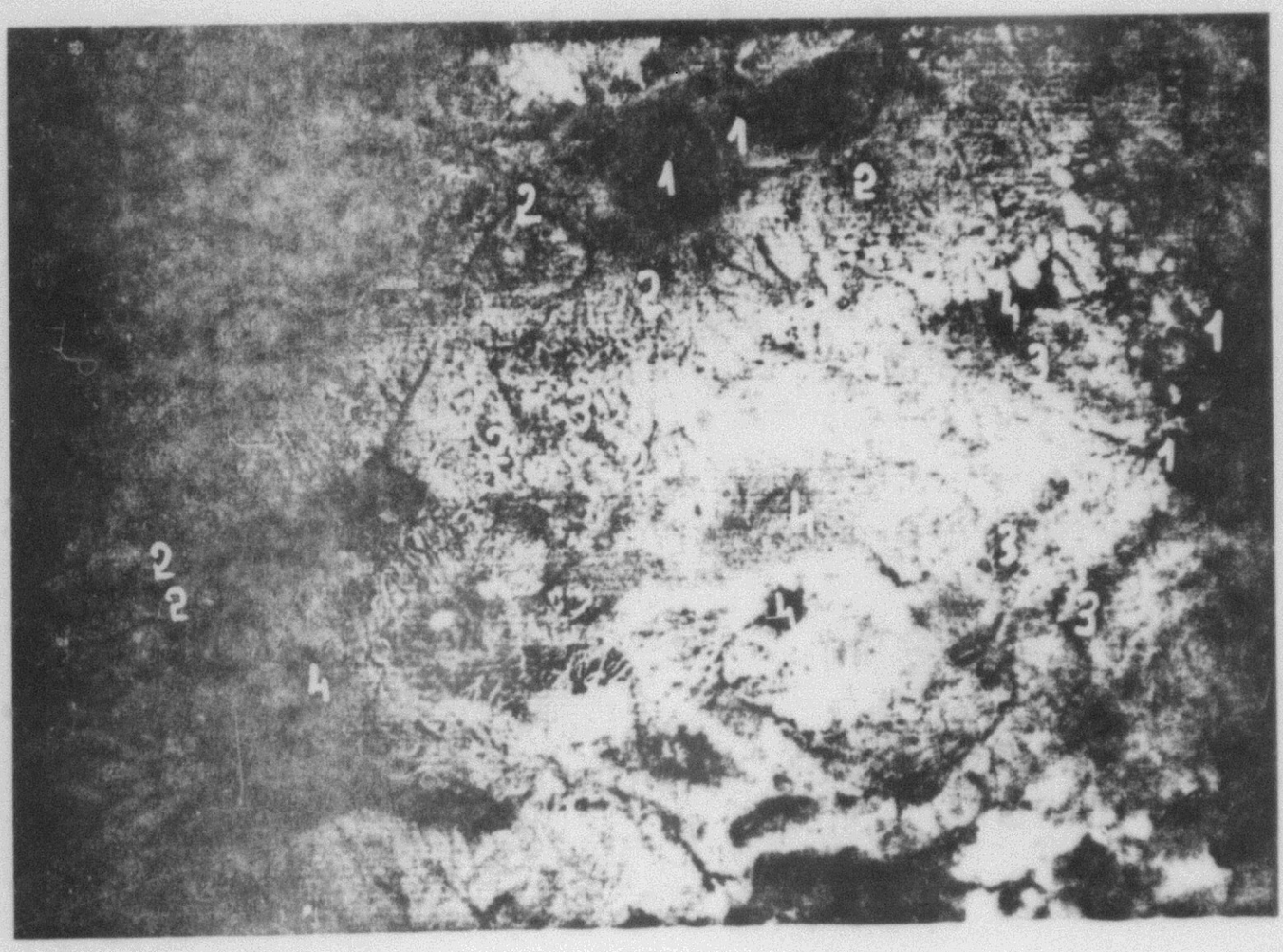
- à l'exploitation de la visualisation résultante
- à l'influence de la densité générale des documents superposés.

En effet, la complexité du document résultant nuit à la compréhension, mais surtout, il suffit que les images de l'un des deux couples présente une transparence générale plus forte pour que, malgré les possibilités de réglage de l'illumination des transparents une grande partie de l'information soit "absorbée" par l'une ou l'autre des images.

L'analyse diachronique est donc d'autant plus instructive que le thème étudié est perceptible sur un seul canal.

*

* *



Analyse diachronique de la zone test de Zougrata
Superposition du canal 5 des images du 9 novembre 1972
(filtre vert) et du 7 février 1973 (filtre rouge)
Codage des unités identifiées

8 - CONCLUSIONS

Lors des tests de photo-identification, nous avons pu à partir des documents bruts ou élaborés cerner le pouvoir de discrimination des images-test LANDSAT sur le Sud de la Tunisie.

Sans revenir sur les possibilités d'identifications, dont l'évaluation a été formulée sous la forme d'hypothéses de travail, lors du commentaire des images, nous soulignerons seulement les points qui nous semblent les plus importants.

1) C'est la combinaison des images des 4 canaux - sous forme de compositions colorées - qui seule, permet l'étude efficace de la végétation et du milieu.

2) Dans le cas d'images concernant des territoires caractérisés par un couvert végétal très faible ou inexistant, l'utilisation des documents noir et blanc, à elle seule, est amplement justifiée ; les compositions colorées n'apportant que des suppléments d'information relativement minimes face à la technique mise en oeuvre.

3) Les méthodes d'exploitation des images par équidensités colorées électroniques sont efficaces pour ce type de territoires (§ 2) car elles permettent l'accentuation des contrastes et la détection des zones homologues à partir des faibles variations de niveaux de densité perceptibles dans ce cas. Par contre, elles se révèlent insuffisantes dans le cas de territoires très diversifiés en raison de leur pouvoir de résolution trop faible par rapport au niveau de précision des documents. Seules les équidensités colorées photographiques pourraient offrir de meilleurs résultats. Il reste à tester leur utilisation pour ce type de documents, et à confronter au bilan "résultats obtenus x technique mise en oeuvre" l'éventail des capacités offertes par les techniques de traitements numériques.

4) C'est la comparaison des deux images-test aux temps t_1 et t_2 (région de Gabès) qui a favorisé la mise en valeur des résultats obtenus à partir de l'analyse de chacune d'elle.

En effet, considérés séparément, les résultats des observations effectuées sur chacune des images ont un caractère restreint ; ils sont limités, en particulier pour l'image de Novembre. Vue sous un angle "dynamique", l'analyse comparée des images a permis de mettre en évidence le rôle de la date des prises de vues pour :

- l'identification du couvert végétal
- l'inventaire des zones cultivées
- l'étude des variables physiques de la surface terrestre par l'intermédiaire des variations de leurs caractéristiques spectrales.

En particulier pour le couvert végétal, les changements d'état physiologique , perceptibles à cette échelle, aident à l'identification de certains types de végétation, et ne sont perceptibles que :

- par la comparaison des images dans la mesure bien entendu où elles correspondent à 2 états du végétal.
- si le document (dans le cas où il est unique) a été pris à une date "optimale" vis-à-vis du ou des végétaux étudiés.

5) On retirera de l'ensemble des observations les enseignements suivants :

- c'est à partir de la comparaison d'images se succédant dans le temps que seront mises à profit les possibilités offertes par la détection multispectrale à partir de satellites ;
- les informations seront d'autant plus riches que l'on aura aidé à l'optimisation du choix des documents par la détermination des dates les plus favorables à l'identification des espèces végétales ; ce qui implique la connaissance au préalable des périodes favorables, au cours de l'année, où les espèces végétales (y compris les cultures) peuvent s'individualiser les unes des autres par des états physiologiques différents.

6) Toutes les observations sont basées sur la perception d'un "état" à un instant déterminé ; elles sont donc, en fait, une image de l'intégration de l'influence des variables du milieu.
Dans l'optique de la généralisation des observations, il conviendra de

En effet, considérés séparément, les résultats des observations effectuées sur chacune des images ont un caractère restreint ; ils sont limités, en particulier pour l'image de Novembre. Vue sous un angle "dynamique", l'analyse comparée des images a permis de mettre en évidence le rôle de la date des prises de vues pour :

- l'identification du couvert végétal
- l'inventaire des zones cultivées
- l'étude des variables physiques de la surface terrestre par l'intermédiaire des variations de leurs caractéristiques spectrales.

En particulier pour le couvert végétal, les changements d'état physiologique , perceptibles à cette échelle, aident à l'identification de certains types de végétation, et ne sont perceptibles que :

- par la comparaison des images dans la mesure bien entendu où elles correspondent à 2 états du végétal.
- si le document (dans le cas où il est unique) a été pris à une date "optimale" vis-à-vis du ou des végétaux étudiés.

5) On retirera de l'ensemble des observations les enseignements suivants :

- c'est à partir de la comparaison d'images se succédant dans le temps que seront mises à profit les possibilités offertes par la détection multispectrale à partir de satellites ;
- les informations seront d'autant plus riches que l'on aura aidé à l'optimisation du choix des documents par la détermination des dates les plus favorables à l'identification des espèces végétales ; ce qui implique la connaissance au préalable des périodes favorables, au cours de l'année, où les espèces végétales (y compris les cultures) peuvent s'individualiser les unes des autres par des états physiologiques différents.

6) Toutes les observations sont basées sur la perception d'un "état" à un instant déterminé ; elles sont donc, en fait, une image de l'intégration de l'influence des variables du milieu.
Dans l'optique de la généralisation des observations, il conviendra de

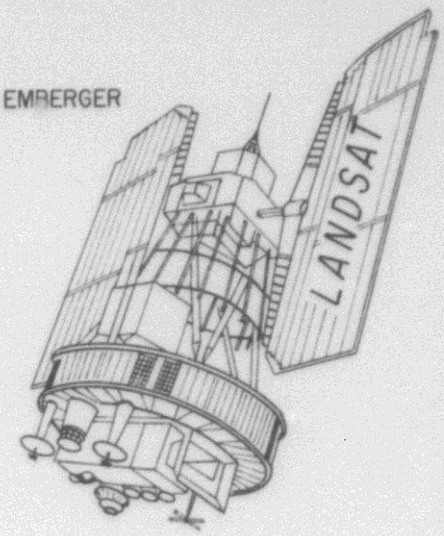
considérer alors les limites imposées à l'extrapolation des résultats par la variabilité spatiale des phénomènes, consécutive à l'hétérogénéité des conditions de milieu.

Les possibilités de généralisation sont liées à la connaissance au préalable des unités écologiques homogènes aux différents niveaux de perception envisagés : régions écologiques, secteurs écologiques.

Vu par le Centre National
de Documentation Agricole
00238

PRINCIPAL INVESTIGATEUR
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE D'ÉTUDES PHYTOSOCIOLOGIQUES ET ÉCOLOGIQUES L.EMBERGER
B.P. - 5051 - 34 033 - Montpellier Cedex

Co - investigateurs
Institut National de la Recherche Agronomique
de Tunisie (I.N.R.A.T.)
Mission C.E.P.E. / C.N.R.S. de Gabès
Office de la Recherche Scientifique d'Outre - Mer
(O.R.S.T.O.M.) - Mission de Gabès
Programme aidé par le Centre National
d'Études Spatiales (C.N.E.S.)



Séminaire de sensibilisation
"TÉLÉDÉTECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"
Tunis, 29 - 30 Octobre 1975

ANALYSE DES DONNÉES NUMÉRIQUES LANDSAT DU SUD DE LA TUNISIE

PREMIERS RÉSULTATS ET PROGRAMMES ENGAGÉS

par

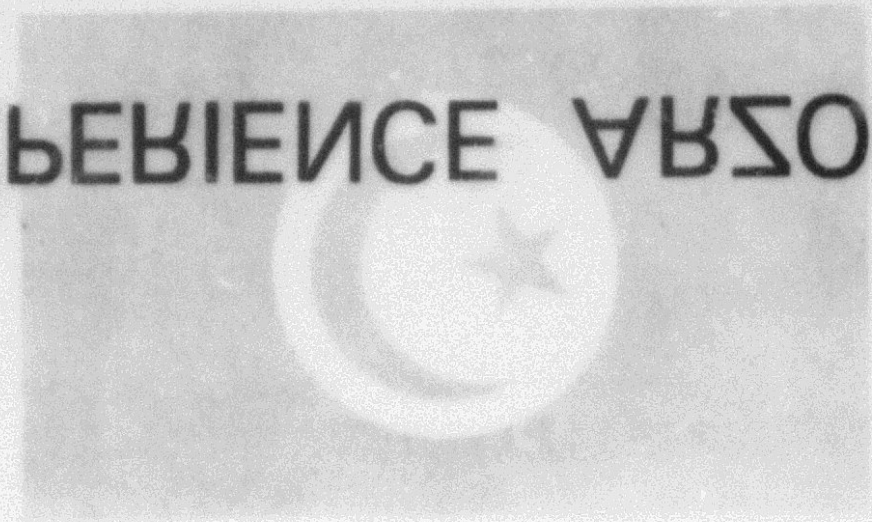
B. LACAZE



EXPERIENCE ARZOTU

Tunis, Montpellier, Octobre 1975
I.N.R.A.T / C.E.P.E

EXPERIENCE ARZOTU



APPLICATION
par

PREMIERS RÉSULTATS ET PROGRAMMES ENGAGÉS

DU SUD DE LA TUNISIE
ANALYSE DES DONNÉES NUMÉRIQUES LANDSAT

TÉLÉDÉTECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

Séminaire de sensibilisation

Tunis, 29 - 30 Octobre 1982

PRINCIPAL INVESTIGATEUR

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

CENTRE D'ETUDES PHYTOSOCIOLOGIQUES ET ÉCOLOGIQUES L.EMBERGER

B.P. - 5051 - 34 033 - Montpellier Cedex

CO - investigateur

Institut National de la Recherche Agronomique

de Tunisie (I.N.R.A.T.)

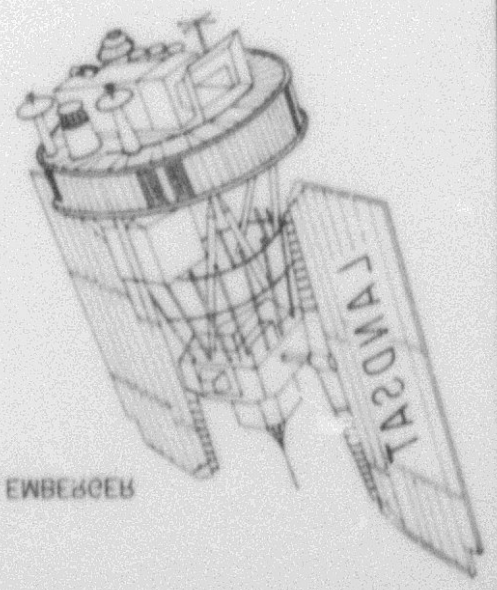
Mission C.E.P.E. \ C.N.R.S. de Dakar

Office de la Recherche Scientifique d'Outre-Mer

(O.R.S.T.O.M.) - Mission de Dakar

Programme aidé par le Centre National

d'Etudes Spatiales (C.N.E.S.)



Séminaire de sensibilisation

"TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"

Tunis, 29-30 octobre 1975

ANALYSE DES DONNEES NUMERIQUES LANDSAT DU SUD DE LA TUNISIE

premier résultats et programmes engagés

par

Bernard LACAZE

Département d'Ecologie Générale

C.E.P.E. Louis Emberger

Montpellier

Montpellier, octobre 1975

d'objets est alors décrite par les fonctions de probabilité conditionnelle des niveaux de luminance dans chaque canal. Si ces fonctions peuvent être assimilées à des courbes gaussiennes, le problème est simplifié en ce sens que les statistiques de premier et de second ordre obtenues sur les écotopes échantillons permettront de caractériser la population d'éléments appartenant à une classe : nous disposons alors d'un *modèle paramétrique*.

Dans le cas de réponses non gaussiennes, pour les classes testées, il nous faut alors développer des *modèles non-paramétriques* d'estimation des fonctions densité de probabilité, et les méthodes de classement seront plus difficiles à mettre en place.

Lorsque le nombre de canaux spectraux est élevé, l'extraction des caractéristiques consiste aussi et surtout en une sélection des meilleurs canaux ou combinaison de canaux. Le critère employé est celui de la *séparabilité des classes* : par exemple, dans le cas de l'hypothèse gaussienne, nous pouvons définir la *divergence* entre deux classes pour une combinaison de canaux donnée et choisir la combinaison qui fournit la plus grande divergence moyenne entre les classes.

Dans le cas des données LANDSAT, ce problème de sélection des canaux ne se pose pas avec une grande acuité, puisqu'il est encore relativement facile de faire une classification dans un espace à 4 dimensions. Tout au plus, peut-on employer la méthode de l'analyse en composantes principales pour réduire la dimensionnalité du problème ; la question de l'adéquation du filtrage structurel ainsi réalisé, au but de la classification, resterait à préciser.

A la fin de cette phase, nous disposons donc d'un modèle statistique et d'une estimation de la difficulté du problème (séparabilité des classes).

2.4. Quatrième phase : classement

La phase de classement doit permettre, pour chaque élément de terrain, de tester la "distance" de sa réponse spectrale à chacune de celles des classes définies dans les phases précédentes. L'élément sera ...

SOMMAIRE

1 - GENERALITES

2 - UN EXEMPLE DE METHODE DE TRAITEMENT DES DONNEES

2.1. Première phase : visualisation des données numériques

2.2. Deuxième phase : apprentissage

2.2.1. Contrôle de la dispersion intra-zone

2.2.2. Contrôle de la dispersion inter-zones

2.3. Troisième phase : extraction des caractéristiques

2.4. Quatrième phase : classement

2.5. Cinquième phase : estimation de la qualité des résultats

3 - CONCLUSION

1 - GENERALITES

Le système de radiométrie multispectrale à balayage (MSS) embarqué sur les satellites LANDSAT 1 et 2 permet l'étude répétitive de la surface terrestre, basée sur l'analyse séquentielle d'unités élémentaires de résolution. Chaque unité élémentaire, d'une surface d'environ 0,6 hectare , est caractérisée par 4 valeurs numériques traduisant sa luminance énergétique dans 4 bandes spectrales :

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

Le but du traitement des données est d'aboutir par voie automatique à un inventaire des ressources terrestres directement liées à l'état du complexe végétation-environnement. A cette fin, nous pouvons mettre en oeuvre différents types d'indicateurs :

- *indicateurs spectraux instantanés*

  pour un élément recensé, ce sont les 4 valeurs de luminance obtenues lors d'un survol, ou bien des combinaisons de ces valeurs

- *indicateurs spectraux diachroniques*

  pour un élément, ce sont des valeurs de luminance, obtenues lors de plusieurs passages du satellite

- *indicateurs spatiaux*

  pour un ensemble d'éléments contigus, ce sont des critères texturaux, analogues à ceux utilisés en photo-interprétation.

Dans le cadre du projet ARZOTU, nous avons voulu tester en premier lieu un système de classification basé essentiellement sur des indicateurs spectraux instantanés. Dans ces conditions, chaque point est analysé indépendamment de son voisinage, et le résultat de la mesure le concernant peut être représenté, dans un espace à 4 dimensions, par un point dont les coordonnées sont les 4 valeurs de luminance enregistrées.

Dès lors, la classification relève du problème général de la reconnaissance des structures dans un espace multidimensionnel. Ces structures n'étant pas données d'avance, il est clair que seule une *procédure d'apprentissage* permettra de passer progressivement d'une ignorance à peu prés complète à une connaissance de plus en plus précise.

Cet apprentissage peut être conçu de deux manières :

- ou bien un auto-apprentissage : en partant des seules données multispectrales, on essaiera de dégager les structures "naturelles" des données ; ce sont les méthodes *d'apprentissage non-dirigé ;*

- ou bien un apprentissage basé sur l'introduction d'informations acquises au sol sur des zones de référence ; ce sont les méthodes *d'apprentissage dirigé.*

Après cette élaboration des structures prototypes, l'étape suivante sera celle du classement proprement dit : un *algorithme de décision* permettra d'affecter chaque élément de terrain testé à l'une des classes-types.

Cependant, la mise en oeuvre d'algorithmes basés sur des critères de distance dans un espace multidimensionnel, peut s'avérer coûteuse en temps de calcul. C'est pourquoi, il est souvent nécessaire de passer par un stade intermédiaire qui consiste en une *extraction des caractéristiques* des données ; par exemple, on opérera une réduction de dimension de l'espace des mesures en sélectionnant les indicateurs spectraux les mieux adaptés au but de la classification.

Finalement, nous pouvons résumer le processus général de la classification, par le schéma de la *figure 1.*

2 - UN EXEMPLE DE METHODE DE TRAITEMENT DES DONNEES :

Nous allons maintenant examiner le détail de la méthode de traitement mise en place pour le projet ARZOTU. Il s'agit d'une méthode basée sur un apprentissage à partir de zones-test : en effet, nous dispo-

Dès lors, la classification relève du problème général de la reconnaissance des structures dans un espace multidimensionnel. Ces structures n'étant pas données d'avance, il est clair que seule une *procédure d'apprentissage* permettra de passer progressivement d'une ignorance à peu prés complète à une connaissance de plus en plus précise.

Cet apprentissage peut être conçu de deux manières :

- ou bien un auto-apprentissage : en partant des seules données multispectrales, on essaiera de dégager les structures "naturelles" des données ; ce sont les méthodes *d'apprentissage non-dirigé ;*

- ou bien un apprentissage basé sur l'introduction d'informations acquises au sol sur des zones de référence ; ce sont les méthodes *d'apprentissage dirigé.*

Après cette élaboration des structures prototypes, l'étape suivante sera celle du classement proprement dit : un *algorithme de décision* permettra d'affecter chaque élément de terrain testé à l'une des classes-types.

Cependant, la mise en oeuvre d'algorithmes basés sur des critères de distance dans un espace multidimensionnel, peut s'avérer coûteuse en temps de calcul. C'est pourquoi, il est souvent nécessaire de passer par un stade intermédiaire qui consiste en une *extraction des caractéristiques* des données ; par exemple, on opérera une réduction de dimension de l'espace des mesures en sélectionnant les indicateurs spectraux les mieux adaptés au but de la classification.

Finalement, nous pouvons résumer le processus général de la classification, par le schéma de la *figure 1.*

2 - UN EXEMPLE DE METHODE DE TRAITEMENT DES DONNEES :

Nous allons maintenant examiner le détail de la méthode de traitement mise en place pour le projet ARZOTU. Il s'agit d'une méthode basée sur un apprentissage à partir de zones-test : en effet, nous dispo-

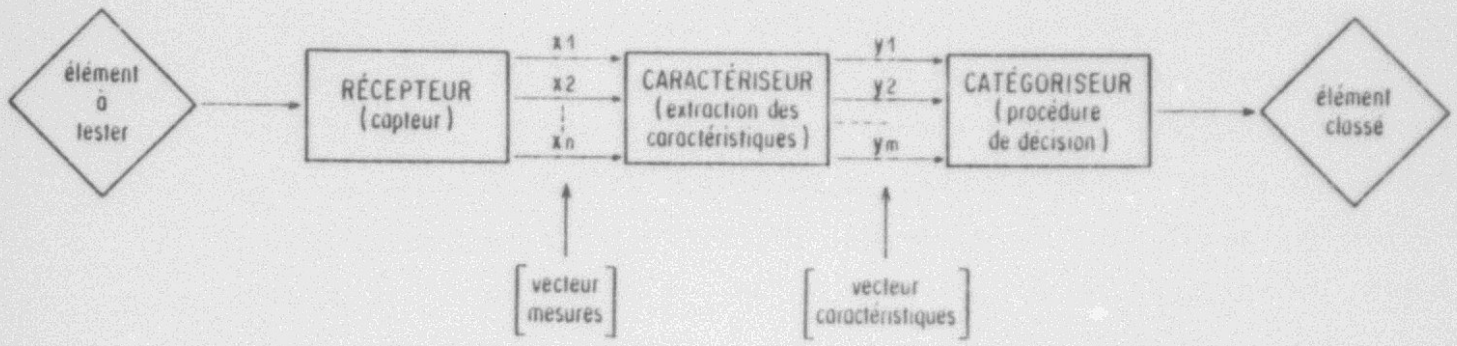


FIGURE 1

Schéma d'un processus de classification

sions pour la Tunisie du Sud d'une base de données terrain recueillies par MM. Ch. FLORET, E. LE FLOCH'et R. PONTANIER, relatives notamment aux zones de ZOUGRATA, OGLAT MERTEBA et BIR SOLTANE.

Le traitement peut être décomposé en plusieurs phases, relativement autonomes sur le plan informatique. A chaque phase, une intervention du thématicien est prévue, pour valider les résultats intermédiaires et initialiser la phase suivante. La *figure 2* présente un schéma synoptique de l'ensemble du traitement.

2.1. Première phase : visualisation des données numériques

Dans les systèmes à orientation numérique, la visualisation est un moyen de contrôle et non une fin en soi. On ne cherchera véritablement à restituer un document de qualité comparable aux images photographiques qu'à la phase ultime de présentation des résultats, encore qu'il soit également possible de présenter ces résultats non sous forme visuelle, mais sous forme de statistiques, qui sont le but de la plupart des inventaires. A tous les stades intermédiaires, les visualisations des données d'un canal spectral ne serviront qu'à identifier des structures spatiales, permettant la corrélation avec les données-terrain.

Techniquement, la visualisation peut s'effectuer à l'aide des moyens suivants : imprimantes d'ordinateur, traceurs digitaux sur film ou sur papier, consoles de visualisation. Dans tous les cas, il s'agit de traduire, pour chaque élément, la valeur de luminance par un symbole approprié (niveau de gris ou couleur). Le nombre de ces symboles devant être limité pour que la perception visuelle reste valable, il faut au préalable sélectionner les classes d'intensité de luminance, à l'aide d'un histogramme des valeurs observées dans la scène à analyser.

La visualisation peut porter sur un canal donné, ou bien sur une combinaison de canaux. Un meilleur repérage des unités décrites sur le terrain est quelquefois possible, grâce à des techniques d'augmentation de contraste (par exemple, celle qui consiste à visualiser les composantes principales de la scène étudiée).

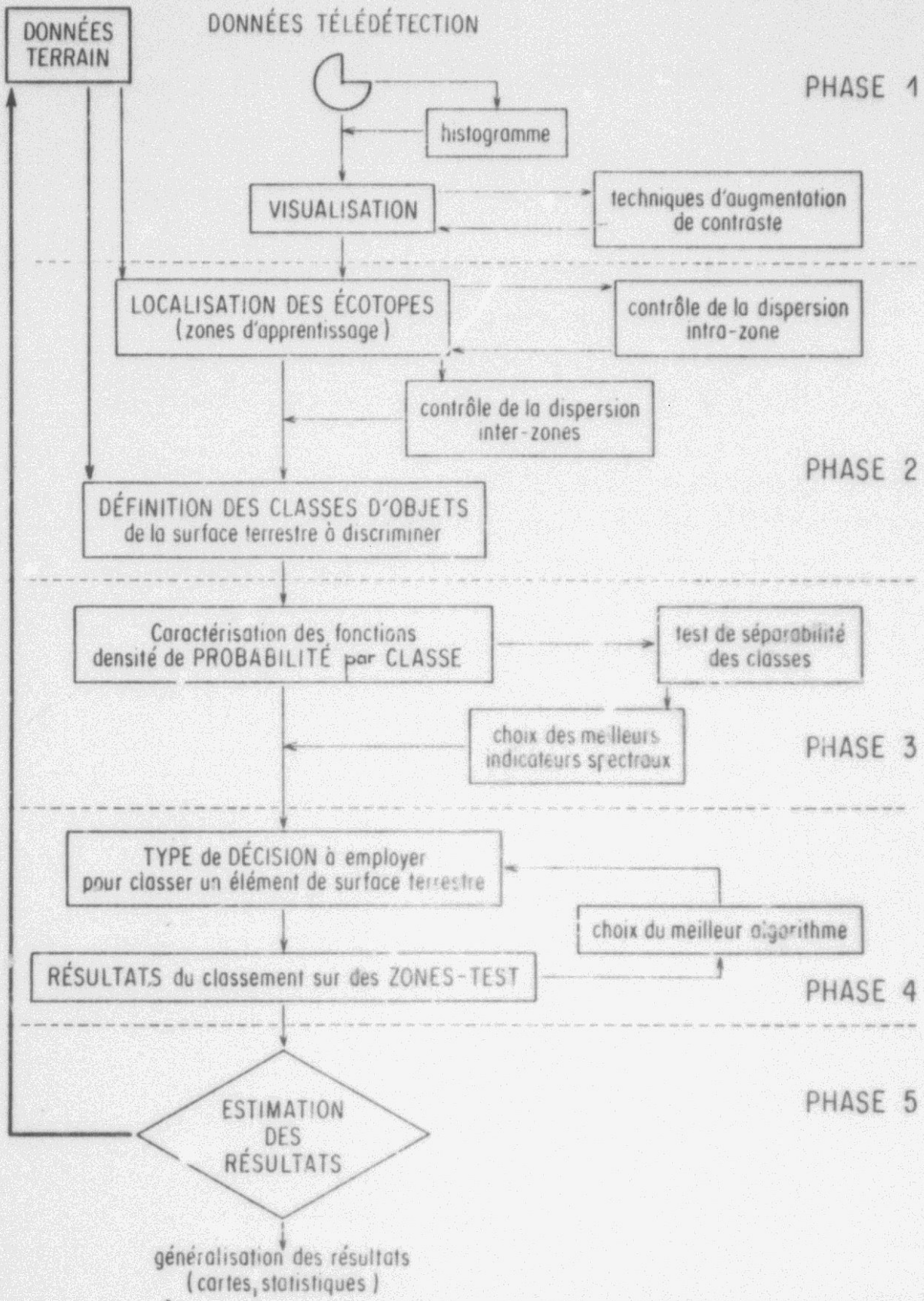


FIGURE 2

Schéma synoptique du traitement des données

numériques LANDSAT

2.2. Deuxième phase : apprentissage

Il s'agit de la phase déterminante du choix des zones de référence qui serviront à étalonner le processus de classement.

Dans certains cas, le thème de l'inventaire que l'on désire réaliser, fixe absolument la nature des classes d'objets à discriminer (par exemple, inventaire des zones cultivées, compatible avec la nomenclature en vigueur dans les organismes chargés de la statistique agricole).

Pour le "projet ARZOTU", nous avons adopté une approche plus globale qui se justifie d'une part, en raison de l'intégration du complexe sol-végétation par les données télédétection (il est difficile de privilégier un thème *a priori*) et, d'autre part, à cause du manque d'expérience pratique concernant les effets des facteurs influençant la réponse spectrale.

Dans ces conditions, nous préconisons une démarche basée sur la définition d'un certain nombre *d'écotopes*. Un écotope est défini comme un échantillon localisé d'unité de milieu ; la taille de l'écotope doit être supérieure à celle de l'unité élémentaire de résolution, afin de permettre une approche statistique de la réponse spectrale. Chaque écotope est spécifié par un certain nombre de caractéristiques :

- recouvrement de la végétation
- nature du faciès de végétation
- nature du substrat
- pente
- orientation

En toute rigueur, la *représentativité des écotopes* devrait être assurée grâce à un échantillonnage stratifié basé sur les critères cités plus haut. En pratique, ce choix peut être opéré plus empiriquement à partir de *l'expérience écologique* acquise ; il doit également tenir compte des conditions d'accessibilité (pour le contrôle répétitif). Cependant, il nous faut bien souligner ici que la représentativité des écotopes ne peut être assurée que si l'on raisonne à partir du *découpage de la biosphère en régions écologiques*. Il ne saurait en effet être question de recher-

cher des réponses spectrales (ou signatures spectrales) universelles. Tout au plus peut-on supposer, qu'il existe, pour une région écologique donnée, une certaine similitude de comportement des unités de végétation et de milieu homologues.

Ce postulat d'homogénéité des réponses spectrales demande donc à être vérifié au niveau local (intra-zone) et au niveau régional (pour les zones appartenant à la même classe).

2.2.1. *Contrôle de la dispersion intra-zone*

En pratique, nous étudirons la dispersion des réponses spectrales des éléments de chaque écotope de référence : ceci peut être effectué en analysant l'histogramme des valeurs de luminance dans chaque canal *(cf. figure 3)* et en complétant cette analyse par une visualisation des discontinuités spatiales (détectées en fixant un critère de similitude des réponses spectrales). Il pourra en découler pour chaque zone :

- *un constat d'homogénéité*

  il s'agit bien sûr d'une homogénéité relative puisqu'elle dépend de la dimension de l'élément de résolution (niveau de perception) et de facteurs instrumentaux (niveau de précision de la mesure) ;

- *un constat de micro-hétérogénéité*

  il s'agit de variations significatives (supérieures au bruit de mesure) de fréquence spatiale voisine de celle du pas d'analyse ; le plus souvent, cette micro-hétérogénéité sera difficile à prendre en compte ; il faudre vérifier s'il s'agit d'un accident local, ou d'une caractéristique commune à plusieurs zones représentant une même classe d'objets ;

- *un constat de macro-hétérogénéité*

  il s'agit en général, soit d'une erreur de localisation (zone comptant en fait plusieurs unités ou éléments distincts), soit d'une hétérogénéité ayant une cause inconnue *a priori* : par exemple, zone "malade" dans une parcelle cultivée ; là encore, il faudra vérifier si cette hétérogénéité est locale ou bien générale. Dans ce dernier cas, une solution consiste alors à scinder la classe initiale en deux sous-classes homogènes.

La condition d'homogénéité ne doit pas servir de base au choix

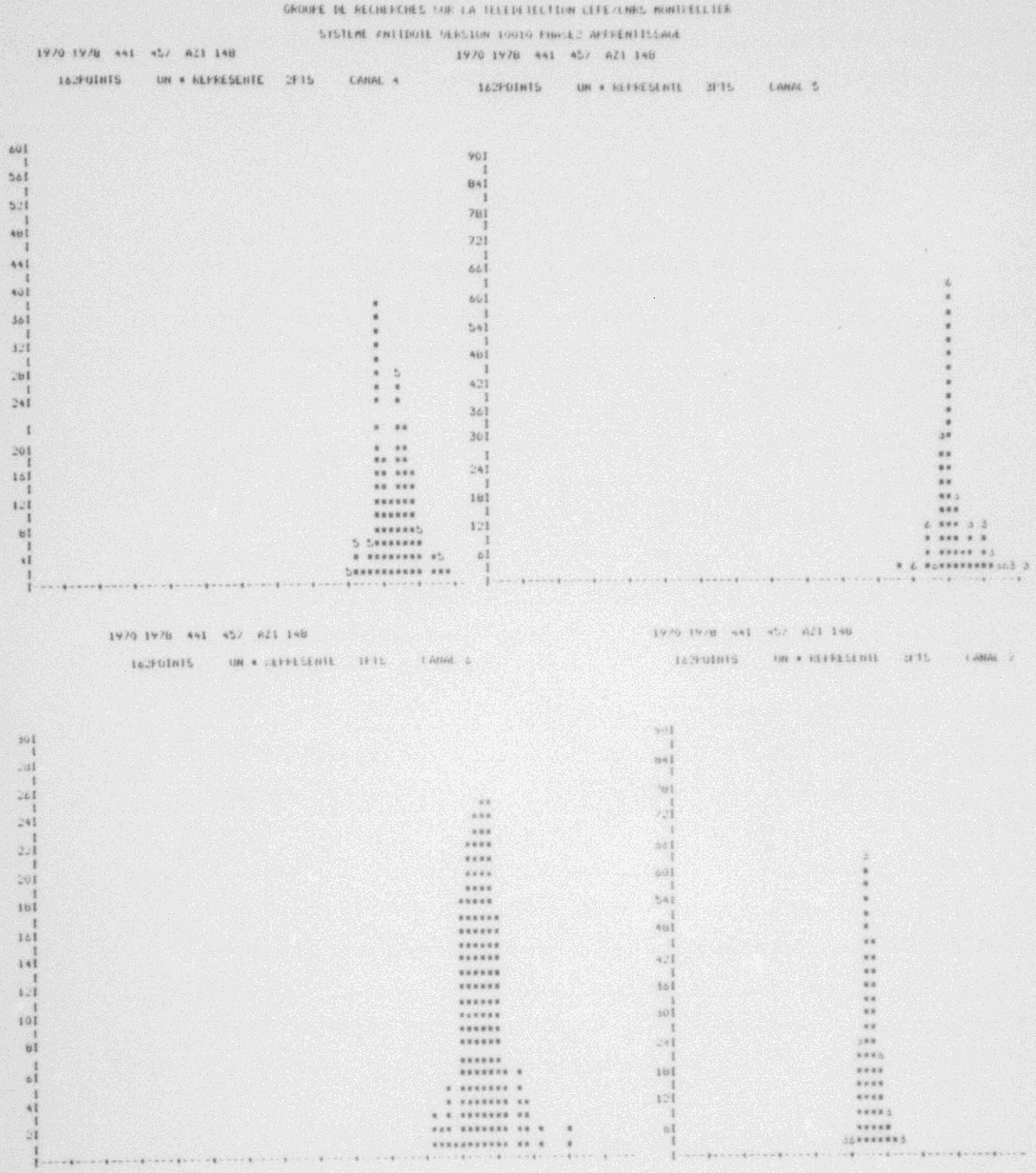


FIGURE 3

Histogramme des valeurs de luminance dans les

4 canaux, pour un écotope

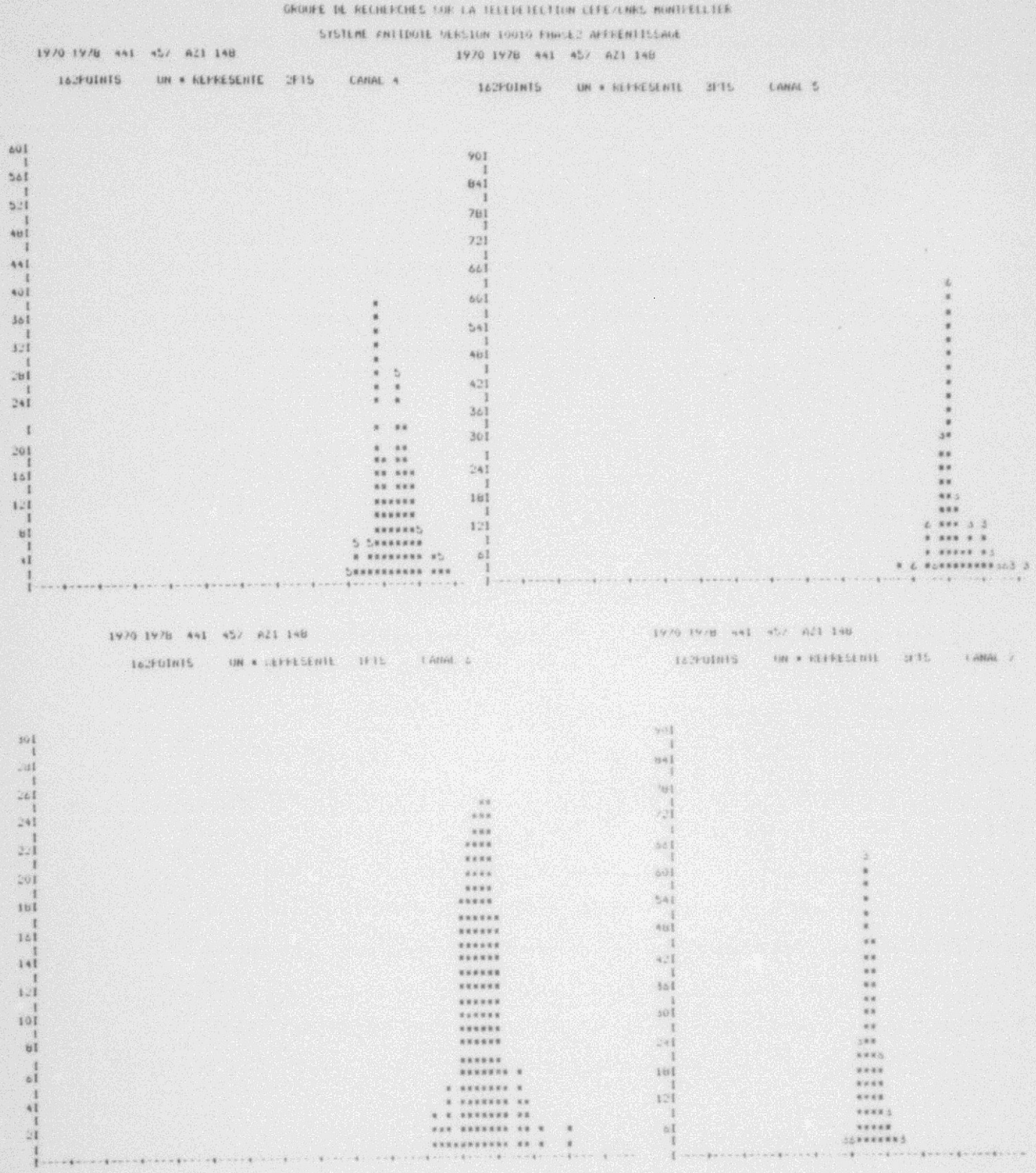


FIGURE 3

Histogramme des valeurs de luminance dans les

4 canaux, pour un écotope

des écotopes ; mais elle doit être testée *a posteriori* car, si elle se trouve validée, les réponses spectrales peuvent en général être assimilées à des courbes gaussiennes, et les calculs ultérieurs s'en trouvent grandement facilités.

Cependant, le succès de la classification dépend en réalité d'un autre critère qui est celui de la *séparabilité des classes d'objets* ; il nous faut donc étudier la dispersion des réponses spectrales de l'ensemble des écotopes pour déterminer si une partition en classes significatives peut être réalisée.

2.2.2. *Contrôle de la dispersion inter-zones*

Dans cette étape, chaque zone pourra être représentée par des paramètres statistiques tels que moyenne et écart-type *(cf. figure 4)* (cas de l'hypothèse gaussienne vérifiée) ou d'autres mieux adaptés à une distribution irrégulière (médiane et intervalle inter-quartiles par exemple).

La dispersion des réponses des différents écotopes pourra être représentée sur un diagramme à deux dimensions représentant les valeurs observées dans 2 canaux (MSS-5 et MSS-7 par exemple) ou bien sur un diagramme résultant d'une analyse en composantes principales, permettant de se faire une idée approchée des similitudes spectrales entre zones. Certains algorithmes permettent même d'aboutir à une classification, d'après les seuls critères spectraux , par regroupements successifs des écotopes. Dans tous les cas, il faudra vérifier que des groupes d'écotopes sont différenciables et que ces groupes sont effectivement représentatifs de classes d'objets *intéressants à reconnaître pour le thématicien*.

A l'issue de cette phase, on est donc capable, après des séparations ou des regroupements appropriés, de définir quels types d'unités il est possible de différencier avec quelques chances de succès, et quelles sont les zones de référence représentatives de cette typologie.

2.3. Troisième phase : extraction des caractéristiques

En fonction des résultats de la phase précédente, chaque classe

des écotopes ; mais elle doit être testée *a posteriori* car, si elle se trouve validée, les réponses spectrales peuvent en général être assimilées à des courbes gaussiennes, et les calculs ultérieurs s'en trouvent grandement facilités.

Cependant, le succès de la classification dépend en réalité d'un autre critère qui est celui de la *séparabilité des classes d'objets* ; il nous faut donc étudier la dispersion des réponses spectrales de l'ensemble des écotopes pour déterminer si une partition en classes significatives peut être réalisée.

2.2.2. *Contrôle de la dispersion inter-zones*

Dans cette étape, chaque zone pourra être représentée par des paramètres statistiques tels que moyenne et écart-type *(cf. figure 4)* (cas de l'hypothèse gaussienne vérifiée) ou d'autres mieux adaptés à une distribution irrégulière (médiane et intervalle inter-quartiles par exemple).

La dispersion des réponses des différents écotopes pourra être représentée sur un diagramme à deux dimensions représentant les valeurs observées dans 2 canaux (MSS-5 et MSS-7 par exemple) ou bien sur un diagramme résultant d'une analyse en composantes principales, permettant de se faire une idée approchée des similitudes spectrales entre zones. Certains algorithmes permettent même d'aboutir à une classification, d'après les seuls critères spectraux , par regroupements successifs des écotopes. Dans tous les cas, il faudra vérifier que des groupes d'écotopes sont différenciables et que ces groupes sont effectivement représentatifs de classes d'objets *intéressants à reconnaître pour le thématicien*.

A l'issue de cette phase, on est donc capable, après des séparations ou des regroupements appropriés, de définir quels types d'unités il est possible de différencier avec quelques chances de succès, et quelles sont les zones de référence représentatives de cette typologie.

2.3. Troisième phase : extraction des caractéristiques

En fonction des résultats de la phase précédente, chaque classe

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

FICHIER 2
1970 1978 441 457 AZ1 148

MOYENNES	51.37	65.56	62.91	27.58						
EC.TYPES	2.69	2.75	3.03	1.23						
	1/1	1/2	2/2	1/3	2/3	3/3	1/4	2/4	3/4	4/4
COVARIANCES	7.25	5.60	7.60	5.40	6.32	9.19	2.23	2.54	2.85	1.51
CORRELATIONS	1.00	.75	1.00	.66	.75	1.00	.67	.74	.76	1.00

FIGURE 4

Caractérisatio statistique de la réponse

spect ale d'un écotope

alors affecté à la classe dont il est le plus proche *(critère du maximum de vraisemblance)*, ou bien sera déclaré inclassable.

Une visualisation des résultats, où chaque élément de terrain est maintenant figuré par un symbole représentant la classe auquel il appartient, permet de tester le bon fonctionnement de l'algorithme employé : on vérifie que les écotopes d'apprentissage sont effectivement correctement classés.

2.5. Cinquième phase : Estimation de la qualité des résultats

Pour estimer la qualité des résultats, il est nécessaire d'opérer la classification sur des zones connues, mais distinctes des écotopes ayant servi à l'apprentissage (si possible un ensemble de zones indépendant de l'ensemble initial).
Sur ce nouvel ensemble, on calculera le pourcentage de reconnaissances exactes et le pourcentage d'éléments incorrectements classés : on obtiendra alors une *matrice de confusion* qui résumera l'efficacité de la classification.

C'est alors qu'une intervention des thématiciens est nécessaire pour essayer d'expliquer les résultats obtenus. Si le taux d'erreur est élevé, il faudra se pencher à nouveau sur les données de départ, *car le choix des zones de référence est souvent plus déterminant dans le résultat global que la spécification d'un algorithme de classement.*
Si le pourcentage de reconnaissances exactes est satisfaisant, on pourra alors passer à la généralisation des résultats au *niveau de la région écologique.*

:: :: ::

3 - CONCLUSION

Nous avons présenté ci-dessus une méthode qui a été largement employée aux Etats-Unis pour des problèmes d'inventaire culturaux. Son application, dans le contexte tunisien, et avec des objectifs plus globaux, ne manque pas de soulever des difficultés nouvelles. Nous espérons surtout, à travers le projet ARZOTU, essayer de déterminer jusqu'à quel niveau de précision il est possible d'aller avec les indicateurs spectraux disponibles.

Il est encore trop tôt pour tirer des conclusions définitives ; nous voulons cependant insister sur les points suivants, qui semblent importants, au vu de l'exploitation des données LANDSAT concernant le Languedoc, et des premiers résultats relatifs au Sud de la Tunisie :

- la réalisation de tout inventaire nécessite une approche écologique globale permettant de hiérarchiser les discontinuités spatiales aux différents niveaux de perception évoqués (de la parcelle, ou la station, à la région) ;

- l'approche par apprentissage dirigé nous semble la plus adaptée pour aborder les problèmes d'inventaire avec les meilleures chances de succès ; dans ce sens un recours aux moyens conventionnels de prospection et aux analyses des images (cf. exposé de M^{me} DEBUSSCHE) s'avère indispensable ;

- l'intervention fréquente et compétente du thématicien pour valider tous les résultats mathématiques intermédiaires est primordiale : en ce sens, des outils *conversationnels* permettant cette interactivité doivent être absolument disponibles ;

- la télédétection du type de celle proposée par les satellites de la famille LANDSAT ne prendra sa véritable signification qu'au moment où l'on sera capable d'exploiter à la fois les indicateurs spatiaux et spectraux, sur une base répétitive ; ceci pose encore d'importants problèmes de traitement ;

- l'une des solutions informatiques qui parait la plus convenable est celle basée sur un mini-ordinateur local(avec console de visualisation), relié à un ordinateur plus puissant pour les traitements lourds.

La période à venir devrait nous permettre de mettre au point de tels systèmes, et de tester leur utilité réelle, en comparant les résultats obtenus avec ceux acquis à l'aide des moyens plus conventionnels d'inventaire des ressources terrestres.

Vu par le Centre National
de Documentation Agricole
00239

Séminaire de sensibilisation
LA TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

—

TUNIS - 29-30 Octobre 1975

APPLICATIONS GÉNÉRALES DE LA TÉLÉDÉTECTION ET, EN PARTICULIER DE LA THERMOGRAPHIE, AUX ÉTUDES GÉOLOGIQUES, HYDROGÉOLOGIQUES, OCÉANOGRAPHIQUES, POTAMOLOGIQUES ET DE GÉNIE CIVIL.

—

J. AVIAS

G.R.T.M. - C.E.R.G.H.
U.S.T.L. - MONTPELLIER

—

TUNIS - MONTPELLIER
Convention INRAT-CNRS/CEPE
Octobre 1975

—

Séminaire de sensibilisation
LA TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

—

TUNIS - 29-30 Octobre 1975

APPLICATIONS GÉNÉRALES DE LA TÉLÉDÉTECTION ET, EN PARTICULIER DE LA THERMOGRAPHIE, AUX ÉTUDES GÉOLOGIQUES, HYDROGÉOLOGIQUES, OCÉANOGRAPHIQUES, POTAMOLOGIQUES ET DE GÉNIE CIVIL.

—

J. AVIAS

G.R.T.M. - C.E.R.G.H.
U.S.T.L. - MONTPELLIER

—

TUNIS - MONTPELLIER
Convention INRAT-CNRS/CEPE
Octobre 1975

—

APPLICATIONS GENERALES DE LA TELEDETECTION ET, EN PARTICULIER DE LA THERMOGRAPHIE, AUX ETUDES GEOLOGIQUES, HYDROGEOLOGIQUES, OCEANOGRAPHIQUES, POTAMOLOGIQUES ET DE GENIE CIVIL.

Par J.V. AVIAS

(G.R.T.M. - C.E.R.G.H.) Directeur de
l'U.E.R. Ressources Naturelles et Aménagement
à l'Université de Montpellier

I - INTRODUCTION

Notre planète est constituée d'un noyau à propriétés de solide, la Barysphère (formée essentiellement de nickel et de fer) entouré d'une épaisse couche de silicates plastiques ou fluides limités eux-mêmes par une croûte solidifiée, la Lithosphère (épaisseur voisine de 100 km), elle-même recouverte, sur environ 70 % de sa surface, d'une couche plus ou moins continue d'eau condensée, l'Hydrosphère, elle-même, enfin, surmontée d'une couche gazeuse, l'Atmosphère. Principalement aux interfaces, Lithosphère-Hydrosphère-Atmosphère se développent par ailleurs des composés carbonés et azotés hydratés fixes ou mobiles structurés en cellules et le plus souvent en organes et organismes doués de propriétés spéciales (autoreproduction, etc.) constituant la Biosphère.

L'objet des présentes conférences est l'examen des applications de la Télédétection à l'étude des fluides naturels terrestres, à la géologie pure et appliquée notamment dans le domaine du génie civil, ainsi qu'à l'hydrologie au sens large (masses d'eaux océaniques, eaux des fleuves et rivières, eaux souterraines).

Il s'agira donc de caractériser, à distance, la nature et l'état des roches et des eaux par les procédés de la Télédétection. Cette dernière qui se fera presque exclusivement à partir de véhicules porteurs évoluant dans l'atmosphère terrestre ou dans l'espace extraterrestre

permettra alors par l'ampleur de son champ d'observation simultanée et par les possibilités de pouvoir caractériser l'état de ces roches ou de ces eaux dans les différentes conditions de l'évolution de leur environnement. Certaines différences se manifesteront alors au cours de ces évolutions et dans le cas des fluides on pourra atteindre à la connaissance des cycles qui les affectent. Cycles dont la connaissance est fondamentale pour de nombreux problèmes de prévision d'exploitation ou de protection des ressources naturelles et de l'environnement.

Si l'on considère l'énergie de rayonnement disponible Q pour le globe terrestre, on peut écrire le bilan d'utilisation de cette énergie, à la surface du globe terrestre comme suit :

$$Q = T_{(S)} + T_{(a)} + T_{(v)} + T_{(g)} + T_{(P)} + T_{(f)} + T_{(b)}$$

Q = Energie de rayonnement disponible, les réémissions de rayonnement vers l'espace étant supposées soustraites aux énergies de rayonnement solaire incidente et de rayonnement terrestre propre.

$T_{(S)}$ = Energie consommée par transport de chaleur dans le sol ou dans la mer (--- courants marins p.p.).

$T_{(a)}$ = Energie consommée par le réchauffement direct de l'air (chaleur sensible) (--- vents).

$T_{(v)}$ = Energie consommée par les phénomènes d'évaporation (transformation d'eau liquide en vapeur) (--- formation des nuages).

$T_{(g)}$ = Energie consommée pour fondre la glace et la neige terrestre.

$T_{(P)}$ = Energie consommée pour le réchauffement des précipitations lorsqu'elles tombent.

$T_{(f)}$ = Energie consommée par le frottement de l'air en mouvement (vent) sur le sol.

$T_{(b)}$ = Energie consommée dans les processus biologiques (notamment dans la fonction chlorophyllienne et dans les processus métaboliques).

Par ailleurs, on peut rappeler que la puissance rayonnée B par unité de fréquence, à partir d'un mètre carré de radiateur parfait (c'est-à-dire de "corps noir") dans un angle solide d'1 stéréoradian, fonction de λ et de T est donné par la formule :

$$B(\lambda, T) = \frac{2hC}{\lambda^3} \left| \exp\left(\frac{hc}{\lambda}\right) - 1 \right|^{-1} \text{ watts m}^{-2}. \text{ Sterrad.}^{-1}.\text{Hz}^{-1}$$

λ : longueur d'onde
T : température (°K)
h : constante de Planck : $6{,}623.10^{-34}$ joules/seconde
K : constante de Boltzmann : $1{,}38.10^{-23}$ joules/degré Kelvin
C : vitesse de la lumière dans le vide : 3.10^{8} mètres/seconde

Pratiquement l'énergie électro-magnétique émise par un corps dépendra donc entièrement de sa température, elle n'est nulle que si celle-ci est égale au zéro absolu. Elle dépendra aussi d'une part du rayonnement électro-magnétique que ce corps reçoit, d'autre part des actions physiques que ce corps pourra subir ayant pour résultat de modifier notamment sa température (exemple : variations de pression, frottements, etc.).

Les roches et fluides terrestres naturels ont tous une température supérieure au zéro absolu et donc émettent des radiations électro-magnétiques ; cependant, ils n'atteignent, sauf exception (laves des volcans) généralement pas, naturellement, des températures suffisantes pour émettre des rayonnements de courte longueur d'onde analogues à ceux émis par le soleil. Il en résulte qu'étant mis à part les rayonnements thermiques dont une partie plus ou moins importante peut provenir du globe terrestre les rayonnements E.M. émis par les roches et les eaux correspondent le plus souvent à ceux qu'ils émettent en conséquence de l' "insolation" à laquelle ils sont soumis que les rayonnements émis soient d'ordre thermique, lumineux (c'est-à-dire sensibles à l'oeil humain) ou non.

L'insolation de la surface terrestre par le soleil : S est fonction de la hauteur de ce dernier (h) ou ce qui revient au même de sa distance zénithale (Z). L'insolation So, comptée perpendiculaire à la direction d'arrivée du rayonnement, est, à la limite supérieure de l'atmosphère, de 1,4 kilowatt par mètre carré, c'est-à-dire approximativement de 2 calories par cm^2 et par minute. S au sol est alors tel que :

$$S = So \sin h = So \cos Z \quad (Z = 90° - h)$$

Par ailleurs - d'une part, la section de la terre recevant la radiation étant égale à πr^2 (r = rayon terrestre), - d'autre la rotation de la terre entraînant qu'en une journée défilera devant la radiation incidente la surface totale du globe ($4\pi r^2$), il en résulte que finalement chaque cm^2 de la surface terrestre reçoit en moyenne environ 0,5 calorie par minute, c'est-à-dire 1/2 Langley (1 langley = par définition 1 calorie/cm^2. Il en résulte aussi qu'à un instant donné S sera fonction de la latitude et de cet instant t (c'est-à-dire de la saison, du jour et de l'heure).

D'une manière générale, un corps quelconque, solide, fluide ou gaz, frappé par un rayonnement de longueur d'onde donnée λ peut alors :

1) transmettre (phénomène de transparence) le rayonnement, sa direction pouvant être plus ou moins modifiée (phénomène de réfraction) et son énergie, pouvant être plus ou moins absorbée (phénomène d'absorption).

2) Réfléchir par sa surface, en totalité ou partie ce rayonnement, dans une seule direction dépendant de l'incidence (phénomène de réflexion spéculaire) ou dans n directions (phénomène de diffusion) (fig. 1).

3) Induire une émission E.M. de polarisation ou de longueur d'onde différente.

Les phénomènes d'absorption, de réfraction, de réflexion, de diffusion, d'émission dépendront alors, outre des λ incidentes et de l'angle d'incidence, de la nature chimique et physique (structure atomique et moléculaire) du corps et de la géométrie de sa surface (plus ou moins rugueuse).

La télédétection permettra alors de caractériser en nature et intensité, les radiations réémises ces dernières variant avec les corps et leur état physique (notamment leur température). On pourra alors différencier par contraste ou par établissement de rapports d'intensités d'absorption, d'émissions, etc. les différents corps entre eux, et si l'on connait les caractéristiques individuelles des émissions dans la condition des observations (dites "signatures spectrales"), on pourra, grâce à ces dernières, les identifier et éventuellement caractériser leur état (thermique, par exemple).

Si l'on considère alors la composition de la radiation solaire, il a été vu dans d'autres exposés qu'elle comprend des rayonnements dont les λ sont essentiellement concentrées entre quelques centaines d'Angstroms (10^{-8}cm) (rayons gamma) et une trentaine de microns infrarouge, et dont le rayonnement correspond, à son arrivée dans l'atmosphère terrestre. Approximativement , à celui d'un corps noir à 5900°K.

On constate alors qu'un certain nombre de λ sont plus ou moins arrêtées par certains gaz contenus dans l'atmosphère, à savoir, essentiellement par l'ozone, par la vapeur d'eau, par le gaz carbonique de sorte qu'en fait ne subsistent que des "fenêtres", notamment dans l'infrarouge (cf. fig. 2).

Au-dessus de λ = 2 cm, l'atmosphère est pratiquement transparente aux rayonnements E.M. Par ailleurs, on a également diffraction par les molécules et par les particules de dimensions voisines de celles des longueurs d'onde (vapeurs et aérosols) ou de grande taille (poussières, gouttelettes d'eau des nuages, cristaux de glace, etc.) par rapport à ces dernières.

L'absorption et la diffusion qui sont particulièrement importantes pour certaines suspensions de gouttelettes liquides (brumes et brouillards) ou solides (fumées), se mesurent par la "densité optique" du milieu traversé ($D = \log I/I_o$) I_o étant l'intensité radiative incidente, I, l'intensité transmise après un trajet de 1 km.

Perturbations apportées aux R.E.M. par l'atmosphère.

L'atmosphère apportera alors d'importantes perturbations à la transmission des rayonnements électro-magnétiques qu'ils soient d'origine solaire ou d'origine terrestre (émission plus ou moins infrarouge, approximativement équivalente à celle d'un corps noir à 27°C) (fig. 2).

Lors de leur traversée de l'atmosphère, les radiations électromagnétiques que l'on peut caractériser par la propagation d'un double champ électrique et magnétique, vont interférer avec les composants du champ électrique lié aux particules, aux molécules, aux atomes ou aux électrons libres présents dans cette atmosphère, une partie de l'énergie étant diffusée dans des directions différentes. Il s'ensuivra en général par absorption et diffusion une diminution de l'onde transmise que l'on caractérisera par un certain "coefficient d'extinction" K totalisant le coefficient d'absorption K_a et le coefficient de diffusion K_s et tel que $I = I_o e^{-Kx}$

I_o : intensité de rayon incident
I^o : intensité du rayon après un trajet x dans le milieu

Il est cependant à remarquer que le caractère exponentiel de la loi d'absorption n'est valable que si l'on considère une seule longueur d'onde car le coefficient K_a varie avec la longueur d'onde, le coefficient de diffusion variant également mais plus lentement avec la longueur d'onde. Il en résulte que l'absorption de l'atmosphère sera spectralement sélective (cf. fig. 6). Des modèles mathématiques (modèle statistique de Mayer-Goody, modèle stochastique d'Elsasser, etc.) ont été élaborés pour calculer l'absorption des différentes bandes au cours de leur traversée d'une tranche d'atmosphère de composition et de caractéristiques connues et ont servi, par exemple, à calculer la transmittance de l'atmosphère dont on doit tenir compte quand on mesure à partir de l'espace, la température superficielle de la mer (Anding et alii, 1971).

En ce qui concerne la diffusion, elle dépend des relations entre les longueurs d'ondes considérées et la taille des particules. On dit qu'on a une "diffusion de Rayleigh" lors λ est plus grande que le diamètre de la particule diffusante.

L'intensité de la radiation diffusée est alors donnée par la formule :

$$I = \alpha\lambda^{-4} (1 + \cos^2 \theta)$$

θ étant l'angle entre la direction de la λ incidente et celle de la diffusée.

C'est à cette diffusion de Rayleigh due à l'action des molécules gazeuses qu'est due la couleur bleue du ciel et la couleur rouge du soleil couchant. On dit qu'on a une "diffusion de Mie" quand λ est du même ordre de grandeur que la taille de la particule diffusante, ce qui est le cas pour la plupart des aérosols de l'atmosphère. Les théories développées par Mie pour le calcul de ces diffusions sont malheureusement difficilement utilisables vu la complexité des équations appliquées et vu la nécessité de connaître non seulement la distribution des tailles et des concentrations des particules, mais aussi la forme et l'indice de réfraction de ces dernières.

En ce qui concerne la transmission atmosphérique verticale, elle dépend du gradient de pression, du gradient de température, du gradient de densité de l'air le long du trajet considéré et des études restent à faire pour la formuler avec précision. De nombreuses mesures de transmissions horizontales pour différentes conditions atmosphériques ont été faites, notamment par Yates et Taylor qui ont mesuré la "transmission sélective" définie, pour une fenêtre donnée, par le rapport entre l'énergie qui traverse l'atmosphère dans l'intervalle de longueur d'ondes de la fenêtre et l'énergie qui passerait en l'absence de tout milieu absorbant. Ils ont notamment mesuré ces "transmissions sélectives" en fonction de la vapeur d'eau précipitable le long du trajet.

Des données ont été également recueillies par Arnulf et alii (1959) sur la transmission des radiations i.r. à travers la brume et le brouillard. Il n'en reste pas moins qu'actuellement (et compte tenu du nombre des paramètres intervenant) aucun modèle satisfaisant pour le transfert radiatif n'a encore été mis au point ; seuls quelques modèles simplifiés ont été utilisés, tel celui mis au point par le Willow Run Laboratory d'Ann Arbor (Michigan).

A noter que l'on peut, dans la pratique, arriver à éliminer l'effet de l'atmosphère en faisant des mesures simumtanées dans plusieurs longueurs d'ondes. C'est ainsi qu'Anding et alii (ibid) ont pu ainsi mesurer la température de la surface de la mer en opérant simultanément avec 3 bandes i.r. (4,9 µm, 9,1 µm et 11 µm), l'i.r. ayant de plus l'avantage de ne provoquer que de faibles effets de diffusion.

II - ETUDE DES FLUIDES NATUKELS LIQUIDES

Etant mises à part les émissions de laves et celles d'hydrocarbures, aisément détectables par des méthodes variées, les fluides naturels liquides se ramènent essentiellement à l'eau de l'hydrosphère (eaux océaniques, eaux continentales, de lacs, de cours d'eaux - eaux côtières intermédiaires (étangs, lagunes) ou de la lithosphère (eaux souterraines).

II - 1. Rappels sur les caractéristiques des eaux naturelles

a) Matières dissoutes et propriétés électriques de l'eau.

L'eau de mer contient en solution un certain nombre d'éléments majeurs représentant 99,99 % des éléments en solution, les autres éléments contenus (pratiquement tous les éléments connus) ne représentant que 0,01 %.

A partir de ces éléments, on définit la salinité, la chlorinité et le rapport de conductivité d'un échantillon d'eau de mer à une certaine température et à une certaine pression. Les chiffres correspondants donnent une idée de la minéralisation globale, mais doivent être connus avec une très grande précision si on vent les utiliser dans les calculs.

Leur connaissance est nécessaire pour définir l'état électrique de l'eau considérée, état conditionnant lui-même l'interaction avec certains rayonnements électromagnétiques (micro-ondes et ondes radar notamment, mais pas exclusivement). Leur connaissance est donc indirectement nécessaire pour pouvoir interpréter certaines opérations de télédétection (voir plus loin). Ce, d'autant plus que la conductivité des eaux varie non seulement avec la chlorinité, mais aussi avec la température.

A noter que l'eau de mer contient aussi des gaz et notamment du CO^2 dont la libération ou l'absorption peut modifier les conditions de la couche atmosphérique limitante et donc les réactions à la télédétection.

La pollution étant traitée par ailleurs, je n'aborderai pas le problème des diverses substances polluantes (détergents, hydrocarbures, sels, composés hydrocarbonés divers, etc.) pouvant être mélangées avec ou recouvrir d'un film mono ou polymoléculaire, l'eau.

b) Matières en suspension et turbidité de l'eau

Les eaux de l'hydrosphère, qu'elles soient marines, continentales ou souterraines, contiennent toutes en quantité variable des matières en suspension(fig. 8), de tailles et de formes variées, minérales ou organiques, vivantes ou détritiques, de nature biogénique (bactéries, phytoplankton, zooplankton, etc. ou terrigène

SUITE EN

F 4

MICROFICHE N°

00230

République Tunisienne

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

CENTRE NATIONAL DE

DOCUMENTATION AGRICOLE

TUNIS

الجمهورية التونسية

وزارة الفلاحة

المركز القومي
للتوثيق الفلاحي

تونس

F 4

(apports fluviaux, produits d'érosion des côtes, détritus de l'activité humaine) ou éolienne (particules transportées par le vent : pollens, poussières minérales, etc.) ou cosmiques (météorites).

La portance de l'eau étant très supérieure à celle de l'air, leur masse pourra être beaucoup plus grande et l'importance de ces matières qu'en océanographie, on désigne du nom de seston par opposition aux êtres vivants dans l'eau mais doués d'une mobilité propre et auxquels on donne le nom de necton (crustacés, poissons, etc.) est très importante car à la base des chaînes trophiques fondamentales et commandant indirectement la répartition des bancs de poissons et car matérialisant souvent les courants qui les transportent.

La télédétection doit alors en tenir compte :

- d'une part, comme faisant partie des ressources naturelles, à reconnaître, inventorier, contrôler,

- d'autre part, comme faisant partie des matières expliquant certaines propriétés des enregistrements photographiques ou radiométriques utilisés en télédétection.

Il faut noter que des transitions existent entre ces matières en suspension et les matières en solution, les ordres de grandeur correspondants sont les suivants :

	Ordre de grandeur	Instrument de détection
- m. en suspension	de > 0,1 µm	Microscope et loupe
- m. colloïdales	0,001 µm < a < 0,01µm	Ultramicroscope
- m. en solution	d < 0,001 µm	Microscope électronique

D'où l'intérêt de la connaissance de ces matières commandant certains phénomènes de réflexion, diffusion, absorption, de certains rayonnements électromagnétiques et qui sont précisément abondants dans les zones superficielles océaniques et plus particulièrement dans les zones côtières (où rentrent dans cette catégorie de nombreux polluants (boues industrielles, etc.)).

Statistiquement, la composition de ces matières en suspension comporte :

10 % de matière vivante.

90 % de matière inerte { matière organique non vivante / matière minérale

Au total souvant 20 à 40 % de carbone organique.

Cette matière en suspension est encore mal connue dans le détail et les études approfondies à son sujet ne font que commencer (Iwanof, 1972, p. 194). A noter que la turbidité de l'eau est liée à la nature et à la quantité des matières en suspension. Elle est due à l'occultation et à la diffraction des rayonnements électromagnétiques par les particules en suspension. Cette diffraction est proportionnelle à λ^4 pour les petites particules et indépendante de λ pour les grosses particules.

La figure 1 donne un exemple de répartition verticale des teneurs des eaux de mer en matière en suspension.

c) Densité des eaux

Une des caractéristiques principales de l'eau est la densité (liée à la température et à la quantité de substances dissoutes) ; densité, qui, avec la considération des énergies : - thermique solaire, énergie pouvant s'exercer dans certains cas par l'intermédiaire de déplacements de l'air atmosphérique (vents) pouvant entraîner l'eau de surface ; - gravifiques, de rotation de la terre et cosmique, explique l'hydrodynamique des masses d'eaux naturelles qu'elles soient océaniques ou continentales, superficielles ou souterraines.

La connaissance des densités de l'eau étant très importante, il importe que celle-ci soit mesurée si possible avec 5 décimales.

Des tables ont été faites donnant cette densité en fonction de la salinité ou de la chlorinité et de la température (cf. tables de l'hydrographic Office de Washington, 1952). Pratiquement, la densité des eaux varie entre 0,996 (eaux douches chaudes T 30°) et 1,028 (eaux de salinité de l'ordre de 40 ‰, de température inférieure à 22°C).

Des tables ont été établies permettant de déduire la densité de la salinité, de la température et de la pression (exprimée en bars, sachant qu'un mètre de profondeur d'eau correspond sensiblement à 1 décibar).

On peut aussi mesurer la densité in situ. Un appareillage récent très prometteur (cf. K. Kremling, pp 377-383 dans Deep Sea Research, vol. 19, 1972) donnant une précision de $\pm$ 1,5.10^{-6} est fondé sur la mesure électronique de la fréquence de résonance d'un corps oscillant dans lequel est introduit l'échantillon étudié (0,6 cm^3).

Pour plus de facilité d'expression, on exprime les résultats non en densité mais en (densité - 1) x 1.000 = σ_t.

Pratiquement, les variations de densité, exception faite de certaines eaux côtières pour lesquelles existent de forts gradients de salinité sont dictées surtout par celles de la température.

La densité des eaux profondes est sensiblement la même à toutes les latitudes ($27{,}5 < \sigma_t < 28$). Par contre, celle des eaux de surface est minimale à l'équateur ($\sigma_t < 23$) là où la température superficielle est maximale (de l'ordre de 28°C) ; elle augmente progressivement avec la latitude.

Si la densité des eaux de surface devient, par diminution de la température ou par augmentation de la salinité, supérieure à celle des eaux sousjacentes des mouvements de convection "thermohaline" prennent naissance, les eaux de surface coulant jusqu'aux surfaces "isopycnes" correspondant à leur densité. On a alors naissance de courants qui se combinent avec ceux induits par le vent ou près des côtes par la marée.

A remarquer que les eaux superficielles peuvent "couler" en profondeur par un autre mécanisme (par entraînement dans les zones de convergence des courants de surface).

On donne le nom d'eau type à un volume important d'eau de température et de salinité uniformes. On peut alors discuter le problème des mélanges d'eaux types en écrivant la conversation des masses, celle des quantités de chaleur et celle des quantités de sel.

Les mélanges d'eaux types E_1 et E_2 se décèlent facilement en dressant un diagramme, I, S, si celui-ci se présente sous forme d'une droite E_1 E_2.

Parmi les mouvements de masses d'eaux particulièrement importants dans la conjoncture actuelle, figurent les effluents naturels (de cours d'eaux pérennes ou temporaires) ou artificiels (rejets d'eaux d'égouts "émissaires" d'eaux de stations de traitement des eaux ou d'eaux industrielles) dans les rivières ou dans la mer.

Leur connaissance est fondamentale pour tous les problèmes de pollution de l'environnement et d'évaluation des "charges polluantes" déversées dans les milieux naturels. Par leur température, leurs matières en suspension, leur salinité, etc., ces effluents se prêtent particulièrement bien comme nous le verrons plus loin, aux études par télédétection.

d) Température de l'eau

La température est avec la salinité la caractéristique la plus importante de l'eau. Etant mise à part la zone superficielle où peuvent se produire des échanges de chaleur avec l'atmosphère, elle est conservative.

Sa mesure s'effectue soit avec des thermomètres à renversement (précision 0,01°C, inertie : 20'), soit avec des bathytyermographes (sensibilité 0,001°C), soit avec des sondes thermométriques à quartz (principe : variation avec T de la fréquence de résonance d'une lame de quartz)(sensibilité 0,0002°C).

La température superficielle des eaux est fonction de l'éclairement (variant avec les saisons et l'heure) et des phénomènes de mélange des eaux superficielles et des eaux sous-jacentes.

En moyenne, moins de 10 % de l'énergie incidente est réfléchie ; 90 % est absorbé par la couche superficielle dès les premiers mètres d'eau.

Les échanges thermiques entre océans et atmosphère se font par :

- échanges par rayonnement i.r.,

- échanges par évaporation (importante sous les latitudes < 40°),

- échanges par convection atmosphérique (température de la surface océans > température air en moyenne) (5 à 10 fois moins important que les échanges précédents).

Dans l'océan lui-même on a échange grâce aux courants (créant des divergences et des convergences où montent ou descendent les eaux) liés aux différences de densité créées par les différences

de température ou de salinité, à l'énergie rotationnelle de la terre et aux vents.

Les variations diurnes de la température superficielle des océans suivent celles de l'éclairement solaire (donc elles diminuent par temps couvert) et dépendent de l'état de turbulence des eaux commandant l'épaisseur d'eau dans laquelle se trouve répartie l'énergie solaire (elle sont donc moindres par mer agitée).

Au total, elles sont généralement faibles : de l'ordre de 0,2 à 0,4°C.

Les variations de densité de l'eau et autres causes de courant créent des brassages d'eau, c'est ainsi que les eaux superficielles froides et denses des régions polaires coulent et se répandent sur le fond des océans (même jusque dans les zones tropicales) ; c'est ainsi que des courants très importants animent les eaux des grands océans commandant à la répartition des températures des zones côtières adjacentes.

Aux latitudes < à 50°, 3 couches se distinguent

- une mince couche superficielle d'épaisseur inférieure à 100 m et qui est sous l'effet direct de l'éclairement solaire et des brassages d'eau. Plus ou moins homogène en mer, elle est le siège en été de la thermocline saisonnière.

- une couche de transition dans laquelle T la température décroît rapidement de plus de 20° à moins de 5°C ; c'est la thermocline permanente.

Vers la latitude de 50°, la thermocline permanente remonte à la surface pour constituer les "fronts polaires océaniques".

- Les eaux profondes froides dont la température décroît de 5° à moins de 2° constituant la majeure partie de la masse totale des océans, si bien que la température moyenne de ceux-ci est de 3,8°C (= sensiblement la température de maximum de densité). Fort heureusement, la densité de la glace est inférieure à celle de l'eau (sinon les océans seraient remplis de glace dont seule la partie superficielle fondrait l'été ; ce qui amènerait un refroidissement considérable de la surface du globe et une diminution considérable de la biomasse).

En ce qui concerne les eaux côtières et continentales, les phénomènes sont analogues mais avec beaucoup moins d'inertie. Les résurgences sous-marines ou sous-aquatiques se décèlent toujours très bien par la différence de température de leurs eaux avec celle de leur environnement.

Les figures 1 à 3 donnent les diagrammes de variation avec les stations et avec la profondeur des eaux de quelques océans.

e) Perturbations apportées par les masses d'eaux liquides aux rayonnements électromagnétiques qui les frappent.

Ces perturbations seront liées d'une part à la pénétration et à

l'absorption d'une partie des radiations électromagnétiques dans l'eau, d'autre part, aux phénomènes de réflection et de diffusion qui affectent ces dernières à l'interface eau-air.

Elles dépendent de la nature de l'eau, de sa profondeur, des matières en solution ou en suspension qu'elle peut contenir, y compris les biomasses chlorophylliennes ou non.

La rétrodiffusion provenant de la masse d'eau traversée prédomine généralement sur les phénomènes de réflection et de diffusion qui se produisent en surface. Si la surface de l'eau est calme, on aura surtout réflection spéculaire, sinon on pourra arriver jusqu'à une diffusion quasi totale (fig. 1).

La partie du rayonnement qui pénètre dans l'eau est progressivement absorbée ou diffusée par les particules en suspension (y compris les algues et également pour les molécules d'eau elles-mêmes. Une partie peut être également rétrodiffusée par le fond et ce jusqu'à une profondeur voisine de 100 m.

Pour les eaux océaniques les plus claires, la λ de maximum de transmission dans l'eau est $\lambda = 0{,}475$ et le coefficient de transmission (par mètre d'eau traversée) est de 98,1 %. Pour les eaux côtières, la de maximum de transmission monte à $\lambda = 0{,}55$ et le coefficient de transmission tombe à 72,4 % en moyenne.

La couleur des eaux océaniques est fonction de facteurs précédents. Le phytoplankton en suspension joue un rôle particulièrement important par sa chlorophylle qui absorbe fortement les radiateurs bleus du spectre, ce qui fait que la réflectance augmente dans les régions jaune-vert du spectre (la concentration en chlorophylle peut atteindre jusqu'à 15 mg/m^2). Si la stratification thermique des eaux est perturbée (par exemple par des courants) les eaux amenées en surface se réchauffent et sont le jeu d'une activité photosynthétique croissante, phénomènes qui peuvent permettre de déterminer les zones d'eaux ascendantes des océans. Bien entendu les "polluants" dissous (ex. : sels) en suspension ou en films superficiels modifient également les propriétés de l'eau de mer vis-à-vis de rayonnements électromagnétiques (voir plus loin) (fig. 18).

i) Emissivité de l'eau

L'émissivité de l'eau a été étudiée notamment en U.R.S.S. (MIKHAYLOV et ZOLOTAREV, 1970) qui ont donné des tables d'émissivité pour l'eau pure entre $\lambda = 1$ cm et $\lambda = 1$ mm à 25 degrés centigrades et dans une direction normale par rapport à la surface. L'émissivité de l'eau de mer est sensiblement la même sauf dans les bandes d'absorption. Dans la région spectrale comprise entre $\lambda = 3{,}5$ et $\lambda = 4{,}5$ µ elle est voisine de 0,97. Dans la région spectrale comprise entre $\lambda = 9{,}8$ µm et $\lambda = 10{,}0$ µm l'émissivité est > 0,99, ce qui correspond au pic d'émissivité d'un corps noir à 300° Kelvis. L'atténuation atmosphérique des λ de la bande 8-14 µm étant minimum autour de 10,5 µm fait que les radiomètres travaillant entre 9,5 µm et 11 µm sont les plus sensibles pour la télédétection de l'eau de mer. Comme l'eau est opaque à une épaisseur de0,02 mm aux λ de 10 µm (λ d'émission maximum) c'est donc une couche d'épaisseur inférieure à 0,02 mm qui est responsable de l'émission thermique de la surface des eaux. Ceci est très important pour l'interprétation des "thermographies", en télédétection.

II.2. - APPLICATIONS DE LA TELEDETECTION A L'ETUDE DES FLUIDES NATURELS

a/ Généralités sur la mise en oeuvre des différentes techniques de la télédétection pour l'étude des fluides terrestres naturels.

Cette mise en oeuvre est loin d'être aussi simple que certains pourraient le penser, même si l'on suppose résolus les problèmes de capteurs et de porteurs.

Le problème fondamental est en effet d'isoler dans les variations d'émission électromagnétique qu'enregistre un capteur, celles qui correspondent aux caractéristiques de l'objet étudié par rapport à celles qui sont dues à d'autres associés ou non et au "fond" (background") local.

La photographie aérienne combinée à l'examen oculaire et à l'interprétation cérébrale a été et reste un instrument de premier choix surtout depuis que la technologie avancée des appareillages, des émulsions et des filtres a permis de mettre à la disposition des utilisateurs la possibilité de prises de vues simultanées avec plusieurs émulsions et avec un choix étendu de filtres (prises de vue "multispectrales"). Nous citerons, par exemple : les montages à 4 caméras Hasselblads synchronisées utilisant simultanément des émulsions noir et blanc panchromatique, noir et blanc Infrarouge, Couleur et Fausse couleur ; - les caméras émulsion Noir et Blanc (donc économiquement) 4 vues simultanées avec des filtres chromatiques choisis permettant ultérieurement de reconstituer (par retour, inverse de la lumière), dans une visionneuse spéciale la couleur par superposition des 4 enregistrements.

Grâce à elle, de nombreux phénomènes sont visualisés avec précision.

- l'utilisation récente de M.S.S.S. ("Multi Spectral Scanning Systems") permet d'enregistrer simultanément et de façon sélective un nombre beaucoup plus important d'images caractéristiques chacune d'une certaine bande spectrale (actuellement jusqu'à 24) et d'utiliser la méthode des rapports d'intensités émissives dans diverses bandes pour détecter ou reconnaître certains objets et d'une façon plus générale pour déterminer ou reconnaître des "signatures spectrales" spécifiques.

Aux premiers radiomètres linéaires ont été substitués de façon très générale, les radiomètres à balayage qui permettant de visualiser dans deux directions, c'est-à-dire en plan, les émissions électromagnétiques, ce qui donne le contour des objets et permet immédiatement de déceler les intensités émises par ces objets par contraste avec celles émises par les objets voisins, la mesure pouvant devenir

quantitative si l'on dispose de corps noirs de référence.

- les senseurs radiométriques à infrarouge, linéaires ou à balayage permettent d'apprécier les températures apparentes de surface des étendues d'eau, de différencier les décharges et les mélanges d'eaux douces, saumâtres ou marines d'origines différentes, de préciser l'hydrodynamique marine et côtière et certaines pollutions. Il faut cependant noter que l'interprétation reste souvent très délicate et exige notamment de l'interprétateur une connaissance approfondie de tout l'environnement, des mécanismes qui s'y déroulent, des conditions exactes de prise de vue (angle d'incidence, etc.), des limites techniques des appareillages, etc. Certains contrastes peuvent par exemple, être dus au seul jeu du "contrôleur automatique de gain" qui est souvent installé sur les radiomètres et modifie automatiquement la réponse en intensité de ces derniers en fonction des intensités émissives du champ adjacent, dans le but d'améliorer les contrastes et la visualisation, d'autres contrastes n'ont rien de thermique et risquent pourtant d'être interprétés comme tels.

Par ailleurs, le filtrage des données peut permettre d'isoler telle ou telle émission caractérisant tel ou tel objet. Il faut avoir conscience de la réalité et de la complexité des phénomènes, notamment lors du passage à travers les basses couches de l'atmosphère qui peuvent avoir des teneurs en vapeur d'eau, en CO_2, en aérosols ou gouttelettes (brumes) modifiant souvent considérablement les émissions radiatives apparentes de la surface de l'eau ou du sol.

Suivant le cas seront utilisés des porteurs terrestres (échaffaudages et plateformes fixes ou mobiles) aériens, fusées) ou spatiaux (fusées, satellites, vaisseaux spatiaux). A signaler ici une utilisation indirecte (possibilités de télédétection) des satellites pour faire le relevé périodique des données hydrométriques mesurées par des bouées ou des stations de mesure, sur l'eau ou sur terre, dans des positions souvent difficiles d'accès. Le satellite peut en effet à chaque passage, périodiquement, recueillir les signaux émis par ces bouées ou ces stations.

A signaler aussi les possibilités de traitements des données digitalisées ou non ; premier exemple : méthode de présentation par équidensités des images permettant des présentations cartographiques améliorées multicanaux ; deuxième exemple : méthode des dérivées permettant de renforcer la densité des limites,etc.

Il faut enfin insister sur la nécessité trop souvent oubliée de prévoir, en liaison avec les opérations de télédétection aéroportée ou spatiale, des opérations de vérité terrain ("ground truth") pour l'étalonnage et l'interprétation.

Si l'on considère alors les radiations électromagnétiques de grande longueur d'onde utilisables en télédétection (techniques de télédétection active ou passive) elles comprennent essentiellement :

- les micro-ondes (ondes millimétriques et centimétriques)
- les ondes radars.

En télédétection active, ce qu'on enregistre alors est un écho plus ou moins modifié par la substance atteinte et les milieux traversés.

Ces ondes, à mise en oeuvre techniquement et économiquement onéreuse, sont plus ou moins absorbées par les gouttelettes d'eau des précipitations et des nuages dont les dimensions sont harmoniques des longueurs d'ondes, et également plus ou moins absorbées et diffusées par la surface de l'eau de mer selon l'état géométrique de cette surface (voir plus loin).

Quant aux ondes radar leur puissance de pénétration notamment des nuages et des couverts végétaux leur permet de télédétecter dans des conditions rédhibitoires pour les autres longueurs d'ondes (notamment par ciel couvert). Bien que la technologie ne soit pas toujours actuellement au point, il n'en reste pas moins que les techniques de télédétection ont fait et font chaque jour des progrés considérables et que la télédétection, par son pouvoir d'intégration à large échelle et par ses possibilités de répétitivité chronoséquentielle exceptionnelle constitue certainement une des méthodes qui doivent révolutionner à plus ou moins court terme les études d'inventaire, de contrôle et d'aménagement des ressources naturelles et de l'environnement.

Nous allons ci-après récapituler les possibilités actuelles et donner quelques exemples des applications les plus prometteuses en ce qui concerne les naturelles.

b/ Applications de la télédétection à l'étude des eaux naturelles ; principe et exemples.

La télédétection permet, très aisément, de détecter les émissions aériennes ou subaériennes de laves volcaniques et de suivre les variations de leur température superficielle, à distance. Les possibilités de télédétection infrarouge des champs thermiques de la surface du sol au un dixième de degré centigrade près, permet également à la télédétection de contribuer à l'étude de l'évolution et de la prédiction des manifestations volcaniques et à l'étude des champs géothermiques.

La télédétection permet également de détecter les films d'huiles provenant des bancs de poissons (avec ce que cela peut entrainer comme applications pour la pêche et - espér ons-le - pour la protection de l'ichtyofaune).

En ce qui concerne les eaux superficielles (océaniques, côtières, continentales), les mouvements desdifférentes masses d'eau, présentent un très grand intérêt car elles constituent un chaînon important du cycle de l'eau, expliquant nombre de phénomènes climatiques, biogéographiques, écologiques d'un très grand intérêt non seulement pour la navigation mais aussi pour les problèmes d'inventaire, d'exploitation (aquaculture par exemple) de protection, d'aménagement des ressources naturelles hydriques (ressources piscicoles ou touristiques, par exemple). Les trajets des masses d'eaux polluées des émissaires d'égouts ou des stations d'épuration des agglomérations humaines ou industrielles peuvent être décelés et surveillés de façon répétitive avec une exceptionnelle facilité et rentabilité. La dispersion des rejets industriels pollués physiques (réchauffés) chimiquement (par exemple par les hydrocarbures) ou bactériologiquement (par les égouts) peut être suivie de façon particulièrement aisée et avec les échelles qui conviennent aux problèmes correspondants.

Nous donnerons ici les principales applications possibles et quelques exemples, tirés notamment des études poursuivies à l'Université de Montpellier dans ce domaine, par la Fondation C.E.R.G.A. et le C.E.R.G.H. pour son propre compte ou pour le compte du C.N.E.S. et de divers Ministères ou Collectivités. Nous nous référerons notamment aux travaux de notre collaborateur Christian ARMANGAU et de son équipe (R. BURKHALTER, F. LAVENU, C. REQUIRAND) sur les étangs côtiers du Languedoc-Roussillon ou sur le Littoral provençal.

En ce qui concerne l'utilisation des R.E.M. relevant du visible et de l'infrarouge, les deux méthodes de choix seront :

- d'une part, la photographie aérienne (U.V., visible et I.R.) mono, multi ou polyspectrale,
- d'autre part, la radiométrie infrarouge à balayage.

La conjugaison des deux méthodes jointe à des contrôles in situ ("ground thruth") peuvent donner comme nous allons le montrer d'excellents résultats : le seul cas où l'utilisation d'autres longueurs d'ondes notamment des micro-ondes ou d'ondes radars, peut être préférable est le cas où des renseignements sont nécessaires alors qu'une couverture nuageuse empêche la mise en oeuvre des deux premières techniques ou alors que la dimension des objets provoque des phénomènes plus caractéristiques dans le domaine de ces longueurs d'ondes.

Les différentes masses d'eau et par conséquent leurs mouvements relatifs peuvent être caractérisés par :

- leurs qualités physiques (température)
- leurs qualités chimiques naturelles (salinité) ou non (pollution).
- les matières en suspension d'origine minérale
- la matière organique (vivante ou non) présente (algues, diatomées, etc.) sur le substratum, en suspension, ou en surface.

Il est très rare que deux masses d'eaux différentes aient la même température d'où comme méthode de choix l'utilisation des radiomètres infrarouges (de préférence à balayage) qui permettent d'identifier des contrastes de température pouvant descendre jusqu'à 1 ou 2 dixièmes de degrés. Exemples d'appareillages opérationnels :

. Radiomètres Barnès, Bendix, S.A.T., DAEDALUS, Fenêtres utilisées : -8-14 µm de préférence pour la thermographie pure (I.R.émis). Ex. : Supercyclope de la S.A.T.;
- 3-5 µm pour la thermographie mixte (I.R.émis + I.R. réfléchi). Ex.: Cyclope de la S.A.T.

Ces appareillages peuvent opérer de jour comme de nuit, mais de nuit l'interférence de la réflexion à partir de la radiation solaire est éliminée par ailleurs l'influence indirecte de cette dernière est minimum en fin de nuit.

Le moment de prise de vue doit être choisi en fonction des objectifs à atteindre. Par exemple l'hiver, une partie de l'action thermique de la végétation est supprimée et n'interfère donc pas.

Nous donnerons comme exemples, d'une part :

- l'étude thermographique nocturne de la dynamique des eaux effectuée par le C.E.R.G.H. avec le concours du C.N.E.S., des étangs côtiers voisins de Palavas sur la côte Languedocienne (à 10 km au Sud de Montpellier).

d'autre part, l'exemple de la détection des sources sous marines.

A noter que si les contrastes sont entièrement dus aux différences de température, il en est cependant également qui sont dus à des différences d'autres caractéristiques par exemple de salinité.

La photographie sous ses différentes formes, dans le visible, l'ultraviolet et le proche infrarouge, et avec toutes ses possibilités par changements de nature

Les différentes masses d'eau et par conséquent leurs mouvements relatifs peuvent être caractérisés par :

- leurs qualités physiques (température)
- leurs qualités chimiques naturelles (salinité) ou non (pollution).
- les matières en suspension d'origine minérale
- la matière organique (vivante ou non) présente (algues, diatomées, etc.) sur le substratum, en suspension, ou en surface.

Il est très rare que deux masses d'eaux différentes aient la même température d'où comme méthode de choix l'utilisation des radiomètres infrarouges (de préférence à balayage) qui permettent d'identifier des contrastes de température pouvant descendre jusqu'à 1 ou 2 dixièmes de degrés. Exemples d'appareillages opérationnels :

. Radiomètres Barnès, Bendix, S.A.T., DAEDALUS, Fenêtres utilisées : -8-14 µm de préférence pour la thermographie pure (I.R.émis). Ex. : Supercyclope de la S.A.T.;
- 3-5 µm pour la thermographie mixte (I.R.émis + I.R. réfléchi). Ex.: Cyclope de la S.A.T.

Ces appareillages peuvent opérer de jour comme de nuit, mais de nuit l'interférence de la réflexion à partir de la radiation solaire est éliminée par ailleurs l'influence indirecte de cette dernière est minimum en fin de nuit.

Le moment de prise de vue doit être choisi en fonction des objectifs à atteindre. Par exemple l'hiver, une partie de l'action thermique de la végétation est supprimée et n'interfère donc pas.

Nous donnerons comme exemples, d'une part :

- l'étude thermographique nocturne de la dynamique des eaux effectuée par le C.E.R.G.H. avec le concours du C.N.E.S., des étangs côtiers voisins de Palavas sur la côte Languedocienne (à 10 km au Sud de Montpellier).

d'autre part, l'exemple de la détection des sources sous marines.

A noter que si les contrastes sont entièrement dus aux différences de température, il en est cependant également qui sont dus à des différences d'autres caractéristiques par exemple de salinité.

La photographie sous ses différentes formes, dans le visible, l'ultraviolet et le proche infrarouge, et avec toutes ses possibilités par changements de nature

des émulsions ou par l'utilisation de filtres permet l'obtention d'une gamme d'enregistrements que peut analyser avec une très grande précision l'oeil humain précisément sensibilisé également à l'essentiel de la gamme spectrale utilisée (c'est à dire de la gamme des réflexions permises à partir de la radiation solaire).

Sur les eaux l'angle de direction de prise de vue peut avoir un rôle déterminant pour qu'apparaissent ou non certaines informations, vu l'importance de cet angle dans le phénomène de réflexion.

Enfin, comme l'a montré par exemple C. ARMANGAU, en jouant sur le développement on peut faire apparaître des informations cachées dans le développement classique. A noter l'influence du vent et l'existence de couches superficielles d'eaux se déplaçant parfois en sens inverse par rapport aux couches sous-jacentes (mues par exemple par les marées (Cf. C. ARMANGAU, 1973).

En ce qui concerne toutes ces possibilités et les contraintes opérationnelles nous renvoyons aux tableaux I et II ci-annexés.

Utilisation des R.E.M. relevant des ondes millimétriques et centimétriques.

L'utilisation de ces ondes, soit naturelles ("passive microwaves radiations" : P.M.R.), soit artificiellement émises présente un intérêt particulier. Les P.M.R. correspondant à une échelle allant de 10^9 Hz à 10^{11} Hz correspondent à des intervalles de longueur d'ondes allant de 3 dcm à 3 mm.

Aux températures d'observation (autour de 300°K, les puissances émises sont 4 à 7 fois plus faibles que celles du spectre I.R. Il faut donc des capteurs très sensibles. L'épaisseur d'eau intervenant dans l'émission est voisine de 0,3 cm, la rugosité perturbe le phénomène et l'émission est également fonction de la température et de la salinité. L'écume ou les films superficiels modifient les températures de brillance. Pour la glace l'émissivité est voisine de 1, d'où un important contraste utilisable: glace - eau, pour les océans polaires.

La transmission dans l'atmosphère se fait avec atténuation due notamment à l'oxygène (corrélative de la résonnance de O_2 à 60 GHz) et à la vapeur d'eau (autour de 22 GHz).

L'influence des nuages est par contre négligeable jusqu'à 15 G Hz. Il est, en conséquence, préférable de choisir des fréquences d'autant plus basses que les observations se font à plus haute altitude.

Pratiquement, les micro-ondes permettent de très bien distinguer les limites eau-terre-glace à travers les couvertures nuageuses. Elles permettent aussi d'avoir une idée de l'agitation superficielle de la mer et de l'épaisseur des glaces flottantes (notamment en radiométrie multifréquentielle). D'où des utilisations très prometteuses pour les régions polaires et parapolaires.

En ce qui concerne les mesures thermiques, les micro-ondes permettent actuellement de déceler 0,2°K bien que la technique soit encore difficile à mettre en oeuvre, notamment en cas d'agitation de l'eau.

En ce qui concerne les mesures de salinité les micro-ondes constituent les ondes de choix à utiliser. Une précision de ± 2 °/°° semble possible mais requiert des mesures simultanées de température à partir de bouées.

La résolution actuellement possible avec les appareillages utilisés entraine que la méthode n'est actuellement intéressante que pour de grandes surfaces avec des variations importantes de salinité (cas de bordures de courants océaniques et d'estuaires surtout).

Les radiométries à micro-ondes permettent aussi d'apprécier l'état de la mer et corrélativement de déterminer la direction des vagues et des houles. Enfin des résultats encourageants ont été obtenus pour la détection des pollutions par les produits pétroliers.

Le tableau IX résume les principales contraintes opérationnelles des opérations de télédétection par micro-ondes.

Utilisation des grandes longueurs d'ondes (Radar) ("Side Looking Radar") (S.L.R. par exemple).

Comme pour le cas de certaines micro-ondes, on a affaire à une télédétection active par émission d'ondes électromagnétiques dont on enregistre l'écho plus ou moins modifié par la substance atteinte ou traversée.

Les gaz et en particulier l'eau sous forme de vapeur ne sont pas détectables par les ondes mais ces dernières peuvent permettre d'identifier l'eau liquide ou solide et surtout pénètrent dans l'eau : de 5 à 10 mm dans l'eau pure, et quelques centimètres dans l'eau de mer. Elles peuvent donc renseigner sur les caractéristiques des couches d'eaux plus profondes plus que ne le peuvent les radiations visibles et infrarouges ($e < 0{,}02$ mm).

Les phénomènes physiques en jeu dépendent de l'état diélectrique des corps atteints (souvent lié à la teneur en eau) des phénomènes de polarisation et diffusion dus à la rugosité des surfaces (par exemple liée aux vagues).

Les ondes radar à courte longueur d'onde, traversent les nuages, la pluie et les chutes de neige, sans modification, tant que les gouttes ou les flocons ne dépassent pas 5 mm de diamètre, mais donnent des échos sur les plus grosses gouttes et sur les grêlons, ce qui permet de déterminer notamment les zones d'orage à cumulonimbus particulièrement importantes pour la navigation et dans la prévision des trajectoires des cyclones.

Par ailleurs, le radar permet de détecter avec précision toutes les nappes d'eau libres pérennes ou momentanées (inondations) vu leur pouvoir réflecteur spéculaire élevé, et les surfaces enneigées, en distinguant les neiges fraiches des neiges anciennes et des glaciers, ce, même à travers les nuages, ce qui leur donne un intérêt particulier notamment pour la cartographie de reconnaissance dans les zones climatiques à couverture nuageuse fréquente (exemple d'applications effectuées : en Nouvelle Guinée, au Brésil - RADAM project à Panama, etc.).

En ce qui concerne la qualité des eaux le radar ne permet guère de la différencier sauf si elle influe sur les propriétés de surface (cas des développements alguaires, des nappes d'huile ou d'hydrocarbures) mais nous avons vu que des moyens moins onéraux permettent de déceler ces anomalies.

Les variations de salinité naturelles (de 10 à 37 °/oo dans les cas extrêmes) sont trop faibles pour pouvoir être étudiées au radar.

En Océanographie, la seule application intéressante du radar est la détection de l'état de mer, d'après les mouvements et les déformations de sa surface (vagues, houles, courants, etc..) ; ce, de jour comme de nuit et par tous les temps (même à travers les nuages) ; la connaissance de cet état pouvant évidemment donner aussi indirectement des indications sur la direction des vents.

L'U.S. Naval Research Laboratory a développé un radar latéral multispectral (4 FR) émettant dans 4 longueurs d'onde (34, 67, 245 et 700 mm), monté sur un avion Superconstellation, précisément pour les problèmes de détection par tous les temps, de l'état de la mer et des vents marins. De leur côté la N.A.S.A. et l'Université du Kansas développent actuellement un système baptisé par elles RADSCAT qui permettra également de déceler la vitesse des vents en mer à partir des phénomènes de rétrodiffusion issus de la surface de la mer, phénomènes qui s'avèrant très réduits

par les films d'huile ou d'hydrocarbures ("oil slicks") pourront être utilisés également- à la détection des pollutions marines correspondantes, à la condition cependant que la mer ne soit pas trop agitée.

La surveillance du cheminement des glaces flottantes et icebergs d'un grand intérêt pour la navigation dans les mers nordiques, par exemple dans la Baltique, peut également être suivie efficacement (par tous les temps) par radar. Il n'en reste pas moins que la technologie Radar doit être encore étudiée et perfectionnée, d'autant plus qu'il s'agit d'un instrument coûteux encombrant et consommant une énergie importante.

Eaux souterraines :

Les eaux souterraines ne pourront évidemment être détectées par télédétection E.M. que si leur présence peut se traduire par une modification du sous-sol et du sol telle que l'énergie E.M. émise et captée soit différenciable des autres énergies E.M. émises liées à la nature des roches, de la végétation, etc.

La photographie aérienne, c'est à dire la télédétection du visible et du proche I.R. est très utile en Hydrogéologie mais surtout indirectement- parcequ'elle visualise très précisément les caractères des roches des structures, des associations végétales pouvant être liées à la présence d'eau. La photographie I.R. (limitée à l'I.R. de 1,2 um) permet de bien différencier les zones humides (zones d'extension de crues, zones de drainage etc.).

La radiométrie I.R. (surtout 8-14 u m) permet de localiser les décharges d'eau douce (sous forme de sources sous aquatiques, ou de décharges en nappes) avec une grande aisance (Cf. Pl. III). Les techniques photographiques spéciales permettant parfois d'arriver à des résultats analogues.

Les senseurs à ondes millimétriques et centimétriques (micro ondes et radars) permettent grâce à la pénétration de ces ondes d'apprécier l'humidité des sols, les structures drainantes des sols et dans certaines conditions (rares) les nappes phréatiques. Connaissant l'indice de réfraction des sols secs et de l'eau on peut d'ailleurs apprécier grossièrement l'humidité d'après le noircissement du sol.

Dans les sols désertiques sableux secs, la pénétration des ondes radar est particulièrement profonde (elle peut dépasser 10 m) et on peut alors déceler les surfaces piézométriques de nappes aquifères, si elles existent. Malheureusement, dans les autres types de sols

la pénétration est très inférieure et ne permet généralement pas de déceler les nappes.

Enfin, il faut signaler que par télédétection, peuvent être également déterminées les caractéristiques de certaines roches à rôle hydrogéologique important (marnes, argiles, calcaires, dolomies) ainsi que certains traits structuraux ou hydrogéologiques (drains aquifères) cachés, s'ils entrainent une modification de la circulation des eaux ou des conditions thermiques du sol.

Nous citerons en particulier les localisations d'aquifères karstiques que nous avons ainsi pu effectuer, dans certaines conditions dans les régions karstiques nord-montpelliéraines ou caussenardes (les zones fissurées communiquant avec un aquifère présentant des contrastes d'émission thermique pouvant d'ailleurs s'inverser avec les saisons).

Nous citerons pour finir l'intérêt de la télédétection en Géologie appliquée pour la surveillance des sites de barrages (les fuites se traduisant souvent par des variations d'humidité ou de température).

Il n'en reste pas moins que pour les problèmes hydrogéologiques la radiométrie Infrarouge à balayage semble la plus intéressante, car susceptible de déterter toutes les variations de température (au !/10è) de la surface du sol pouvant être liée à des variations de teneur en eau, dd circulation d'eau, de vitesse d'infiltration d'eau, etc. que les roches soient à porosité d'interstice ou à porosité de fissures. La grande chaleur spécifique de l'eau expliquant la sensibilité de la méthode. Mais il est évident qu'il faut s'affranchir des perturbations dues à l'insolation diurne et à la physiologie des végétaux (évapotranspiration notamment) et qu'on a donc intérêt à opérer l'hiver (quand la végétation est arrêtée et la nuit (en fin de nuit de préférence) pour éliminer autant que possible l'action des radiations solaires.

ETAT ACTUEL ET PERSPECTIVES DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE DANS LES APPLICATIONS DE LA TELEDETECTION A L'ETUDE DES EAUX NATURELLES - CONCLUSIONS

Des progrés considérables ont eu lieu ces 10 dernières années dans le domaine de la télédétection. Réalisés d'abord aux U.S.A. et en U.R.S.S. ils se poursuivent désormais dans de nombreux autres pays.

1. La télédétection des caractéristiques de mouvement et d'échange énergétique entre le sol, les eaux superficielles et la basse atmosphère (nécessitant entre autres une télédétection précise des températures réelles) (ce, en liaison avec les organismes s'occupant de la poilution de l'air).

2. La télédétection approfondie à l'évolution thermique et cinétique des masses d'eaux, des courants et des convergences océaniques et tout particulièrement au voisinage des interfaces mer-air et mer-continent, en liaison avec des moyens (principalement bouées de mesures) permettant de compléter la mesure des paramètres superficiels (seuls accessibles directement par la télédétection) par celle des paramètres de subsurface et de profondeur et également simultanément par celle des paramètres atmosphériques à l'aplomb des zones étudiées (ce, en liaison, avec les centres de recherches sur la pollution de l'eau).

3. La télédétection approfondie des matières en suspension dans les eaux qu'elles soient minérales ou orgniques (plankton chlorophyllien). Etude des mécanismes de leur développement ou de leur transport, ce, en liaison avec les organismes de recherches de biologie marine ou sur les pêches, l'aquaculture ou l'aménagement régional (érosion et protection contre l'érosion des côtes, etc.).

4. La télédétection approfondie des champs thermiques continentaux et de leur liaison avec l'humidité superficielle des sols d'une part, avec la présence d'aquifères souterrains d'autre part, avec aussi la présence éventuelle d'eaux chaudes (champs géothermiques) d'intérêt énergétiques, afin de permettre un inventaire et un contrôle réel des paramètres commandant les ressources en eaux des différentes catégories de sols et de terrain.

L'expérience nous a montré que les 4 domaines que nous venons de citer, ont avantate à être pour une partie importante des études regroupés mais à la condition que soient également regroupés les spécialistes compétents de diverses disciplines intéressées et du matériel utilisé.

III - ETUDES GEOLOGIQUES ET DE GENIE CIVIL.

III- 1 - Introduction :

La télédétection est depuis longtemps (1922) utilisée notamment sous la forme de prises de photographies aériennes pour l'établissement de cartes géologiques dans des délais extremement courts et avec une précision qui notamment dans les terrains plus ou moins désertiques était jusqu'alors inégalée.

Dans les photographies aériennes, les télédétections des différentes formations rocheuses et des accidents qui les affectent se font soit directement par les différences de ton et de teinte des différentes roches ou différents sols provenant de l'altération de ces roches, soit indirectement par les végétations spécifiques qui s'installent sur les différentes catégories de roches ou de sols.

Des possibilités nouvelles ont été introduites par la mise en oeuvre, d'une part des prises de vue multispectrales (utilisant une gamme choisie de longueurs d'ondes dans des clichés pris simultanément) ; d'autre part des radiométries infrarouges - surtout dans la bande 7-15 microns (infrarouge thermique) ; enfin par l'utilisation dans certains cas des ondes millimètriques et centimètriques (radar).

L'utilisation de satellites (tel ERTS I et II) a par ailleurs permis d'augmenter le champ de prise de vue par rapport aux enregistrements effectués à partir d'aéronefs et de compenser les effets d'échelle.

Comme dans le cas des eaux, l'utilisation des variations d'émission avec l'heure ou la saison sera souvent d'un grand intérêt. Par ailleurs l'utilisation d'enregistrements multispectraux, permettra de procéder à des rapports d'intensité d'émissions dans des longueurs d'ondes différentes qui permettront souvent de différencier beaucoup plus nettement certaines roches ou certaines formations (cf. études A.K. Vincent).

Enfin les techniques d'analyse des données (utilisation des dérivées des intensités notamment) permettent en modifiant les visualisations - par exemple en augmentant certains contrastes - de rendre plus sensibles les méthode de télédétection.

III - 2. Propriétés spectrales des matériaux solides de l'écorce terrestre (roches et sols).

La plupart des minéraux des roches terrestres présentent des raies d'absorption dans la bande des 7-12 microns, ce seront donc surtout les radiométries thermiques infrarouges qui pourront être utilisées, encore que le visible puisse également l'être notamment lorsque des couleurs différentes caractérisent des roches différentes.

III - ETUDES GEOLOGIQUES ET DE GENIE CIVIL.

III- 1 - Introduction :

La télédétection est depuis longtemps (1922) utilisée notamment sous la forme de prises de photographies aériennes pour l'établissement de cartes géologiques dans des délais extremement courts et avec une précision qui notamment dans les terrains plus ou moins désertiques était jusqu'alors inégalée.

Dans les photographies aériennes, les télédétections des différentes formations rocheuses et des accidents qui les affectent se font soit directement par les différences de ton et de teinte des différentes roches ou différents sols provenant de l'altération de ces roches, soit indirectement par les végétations spécifiques qui s'installent sur les différentes catégories de roches ou de sols.

Des possibilités nouvelles ont été introduites par la mise en oeuvre, d'une part des prises de vue multispectrales (utilisant une gamme choisie de longueurs d'ondes dans des clichés pris simultanément) ; d'autre part des radiométries infrarouges - surtout dans la bande 7-15 microns (infrarouge thermique) ; enfin par l'utilisation dans certains cas des ondes millimètriques et centimètriques (radar).

L'utilisation de satellites (tel ERTS I et II) a par ailleurs permis d'augmenter le champ de prise de vue par rapport aux enregistrements effectués à partir d'aéronefs et de compenser les effets d'échelle.

Comme dans le cas des eaux, l'utilisation des variations d'émission avec l'heure ou la saison sera souvent d'un grand intérêt. Par ailleurs l'utilisation d'enregistrements multispectraux, permettra de procéder à des rapports d'intensité d'émissions dans des longueurs d'ondes différentes qui permettront souvent de différencier beaucoup plus nettement certaines roches ou certaines formations (cf. études A.K. Vincent).

Enfin les techniques d'analyse des données (utilisation des dérivées des intensités notamment) permettent en modifiant les visualisations - par exemple en augmentant certains contrastes - de rendre plus sensibles les méthode de télédétection.

III - 2. Propriétés spectrales des matériaux solides de l'écorce terrestre (roches et sols).

La plupart des minéraux des roches terrestres présentent des raies d'absorption dans la bande des 7-12 microns, ce seront donc surtout les radiométries thermiques infrarouges qui pourront être utilisées, encore que le visible puisse également l'être notamment lorsque des couleurs différentes caractérisent des roches différentes.

L'établissement des "signatures spectrales" des différentes roches sera donc l'un des premiers problèmes à résoudre. Dans la figure 6 sont donnés les spectres d'absorption des principaux anions inorganiques d'aprés Lyon (1964 Eval. I.R. Spectr.). En ce qui concerne les silicates Hunt et Salisbury (1970 Silic.Min)ont donné les courbes de réflectance spectrale dans la bande 0,3 à 2,5 microns de 40 silicates différents et dans quatre états granulométriques distincts.

La présence dans les structures d'ions hydroxylés se manifeste particulièrement bien à 1,4 microns, ce qui permet de distinguer les pyroxènes des amphiboles, les premiers ne contenant pas d'hydroxyles, contrairement aux seconds.

Quand l'ion fer est présent il se manifeste par des bandes larges de réflectance minimum dans la bande 1,0 à 1,1 microns.

En ce qui concerne les carbonates on a des bandes caractéristiques entre 1,8 et 2,5 microns et la présence de fer ou d'eau, y induit également des bandes caractéristiques. Dans la dolomite, les bandes sont beaucoup moins intenses que dans les calcites.

La granulométrie joue aussi un grand rôle dans l'intensité de l'émission infrarouge, (cf. figure 7).

L'émissivité d'une roche dépend également de sa teneur en silice. Dans la figure 8, sont données les courbes d'émissivité des roches,des plus acides jusqu'aux roches utrabasiques. On constate que le minimum d'émissivité se déplace vers les hautes longueurs d'ondes.

La rugosité de la surface émettrice joue également un rôle (figure 9).

Enfin la variation des facteurs externes entraîne des variations des émissions I.R. qui sont d'un trés grand intérêt en télédétection, les variations induites variant avec les différentes roches.
Ces facteurs externes sont fondamentalement : la température (variations diurnes et saisonnières) et la teneur en eau (variations en fonction des précipitations et de l'ensoleillement). Le coefficient thermique varie en effet considérablement avec la teneur en eau des différentes roches : de 1,0 pour l'eau il est de 0,19 pour le granite, de 0,19 pour le sable sec, de 0,34 pour le sable humide avec une humidité contenue de 22%, de 0,33 pour l'argile humide etc...

Il en résulte que les courbes journalières ou saisonnières d'émistivité permettent de différencier la plupart des roches. (cf. figure 10) et de caracriser telle ou telle surface naturelle d'émission (cf. figure 11).

III - 3. Indépendamment de la nature des roches et de leur teneur en eau, la télédétection permettra dans la véritable cartographie au 1/10 de degré prés des surfaces qu'elle permet, de détecter les accidents affectant ces roches, accidents dont certains n'apparaîssent pas dans les autres méthodes d'observation (cf. linéations globotectoniques mises en évidence sur les clichés pris par les satellites ERTS) (figure 12). Un effet d'échelle jusque là non accessible étant par ailleurs atteint.

III - 4. Certaines roches de densité différente pourront être reconnues (le coefficient thermique étant lié à la densité). Les changements de faciès seront également le plus souvent reconnaissables par télédétection qui est d'un grand intérêt en Hydrogéologie dans la géologie du pétrole et en Génie Civil.

En Hydrogéologie nous avons déjà vu que le fort coefficient thermique de l'eau peut permettre dans de nombreux cas de déceler les zones aquifères, les zones de drainage, de circulation, d'infiltration des eaux souterraines etc.

III - 5. En ce qui concerne les gîtes minéraux, outre les remarques précédentes on peut signaler que les chapeaux oxydés des gîtes à sulfures engendrent un dégagement de chaleur qui peut faire augmenter la température de l'affleurement minéralisé de 0,1 à 0,5 degrés par rapport aux roches encaissantes, ce qui peut être détecté aisément la nuit (le jour les variations dues à l'ensoleillement camouflent le plus souvent le phénomène).

III - 6. En ce qui concerne la Géologie appliquée au Génie Civil, la télédétection pourra permettre une meilleure recherche des matériaux de construction, des zones sèches et des zones humides, des accidents tectoniques, de l'épaisseur et de la nature des sols ; le cas échéant, de cavités souterraines (à la condition qu'elles soient trés proches de la surface du sol etc..).

III - 7. En ce qui concerne la surveillance de l'activité des volcans et la recherche des anomalies géothermiques la termographie infrarouge est d'évidence une méthode de choix. Des découvertes récentes en Ethyopie, de sources potentielles d'énergie géothermique par la télédétection en sont un bon exemple.

IV - CONCLUSIONS.

En conclusion la Télédétection : avec les perfectionnements qu'elle a conduit à apporter dans les techniques de la photographie aérienne ; avec la mise en oeuvre des techniques nouvelles utilisant des enregistrements multispectraux ; avec la mise en oeuvre des radiomètres à balayage dans l'infrarouge

avec la mise en oeuvre des techniques nouvelles basées sur l'utilisation des propriétés spéciales des ondes millimétriques et centimétriques ; avec le perfectionnement des techniques de radiométrie et de dépouillement des données apporte un champ nouveau de possibilités d'études intégrées, rapides et économiques des phénomènes géologiques et hydrologiques. Ce, à la condition que la mise en oeuvre de cette télédétection soit pluridisciplinaire, concertée et accompagnée chaque fois que cela sera utile des contrôles de "verité terrain" permettant de tester les données recueillies.

BIBLIOGRAPHIE

Pour la bibliographie nous renvoyons à celle des ouvrages spécialisés suivants :

- R. Tessier, A. Allouges et alii 1969. Principes de la télédétection à distance et application à l'étude des ressources terrestres. C.N.E.S. et Université du Michigan. Paris.

- C.N.E.S. La télédétection des ressources naturelles. C.R. des journées d'études. Paris 26-27 Octobre 1971.

- ESRO 1973 : Bibliography in "Multispectral scanning systems and their potential applications to earth resources survey.

- C.N.E.S. - O.N.U 1973. Ecole d'Eté. La télédétection des ressources terrestres. (C.N.E.S. Département des affaires universitaires 18, Avenue Edouard Belin 31055 Toulouse Cedex France).

Tabl 1 PRINCIPALES APPLICATIONS DE LA TELEDETECTION EN OCEANOGRAPHIE

Phénomène observable (paramètre à mesurer)	Appareillage de télédétection à utiliser	objet étudié (objectif)	Applications
1) Δ Intensité (de réflexion (de polarisation	- Laser - Diffractomètre - Caméra photographique (N et B)	- Hauteur des vagues - Etat de la mer - Limites des masses d'eau et des courants	- Routes de navigation - Trajet des courants - Cartographie courantologique
2) Δ des caractéristiques spectrales	- Caméra photographique (films couleurs - Spectromètres - Scanners multispectraux - Radars multifréquentiels	- Couleurs de l'eau - Pollution - Répartition des algues - Répartition des sédiments (dans certains cas) - Cartographie de certains fonds	- Contrôle de la pollution - Contrôle des chaines alimentaires - Processus côtiers
3) Températures	- Radiomètres i.r. avec baie de restitution - Radiomètres à microsondes	- T superficielle de la mer - Distribution des courants	- Détermination du bilan d'énergie - Prédiction du temps - Localisation des bancs de poissons
4) Δ avec le temps (évolution temporelle) a) des intensités b) des spectres c) des températures	Tous appareils précédents utilisés de façon répétitive	- Evolution de l'état de la mer - Mesure de la vitesse du vent et des courants - Evolution de la courbe de température de l'eau - Evolution de la sédimentation et des fonds - Déplacement des fronts océaniques	- Inventaire et contrôle des effluents côtiers naturels ou artificiels et de leur pollution - Délimitation des enneigements et des glaciers - Contrôle et prévision en navigation - Productivité biologique (évolution des biomasses marines - Déplacement des bancs de poissons - Etude de la genèse et de l'évolution des ouragans - Sédimentogénèse - Evolution des courants - Dispersion des produits apportés par les effluents côtiers naturels ou artificiels (polluants)
5) Δ t entre des	- Lasers (sondes)	- Profondeur d'eau	- Cartes hydrographiques, navigation - Evolution des côtes
6) Absorption	- Spectromètres simples ou différentiels - Senseurs géochimiques	- Détection des émissions de gaz	- Etude quantitative des biomasses planktoniques - Mesure des productivités - Pêche
7) Bioluminescience provoquée	- Appareil de T.V. pour faibles intensités lumineuses	- Migration et localisation des bancs dappoissons. - Déplacement des masses planktoniques	- Industrie de la pêche - Ecologie marine

Tabl 2 CONTRAINTES OPERATIONNELLES DE LA TELEDETECTION EN OCEANOGRAPHIE. (Visible et Infrarouge)

Objectif	Paramètre à mesurer	Précision	Résolution spatiale	Fréquence de la mesure	Région du spectre utilisée	Largeur des bandes à utiliser
T superficielle de la mer					Thermique (t)	Large (L)
1) Fronts thermiques	Gradients de T (g)	0, 2° C/km	100 m		t	L
2) Divergences et convergences		1° C	100 m à 10 km	mensuelle	t	L
3) Localisation bancs de poissons	Contours thermiques	0, 5° C	100 m		t	
4) Etude des effluents côtiers	" "	0, 1° C	10 m	4 fois par jour	t	
5) Echanges de chaleur air-eau	t à travers 2 plans horizontaux près de la surface	0, 03° C	10 km	Horaire	t	e
Hydrographie côtière						
1) Profondeurs de l'eau	Réflexion sur le fond	± 0,5 m	2 m	0,5 - t	0,6 µm	e
2) Cartographie de la ligne de côte	Interface eau-terre	± 10 m	10 m			L
Sédimentologie						
1) Teneur en sédiment	Réflectance absolue	± 20 mg/l	300 m		Visible et thermique	e
2) Type de sédiment	Signature spectrale		300 m		Thermique	e
Biomasse						
1) Teneur en chlorophylle	Réflectance	0, 1 mg. m3	300 m	Mensuelle	0, 45-0, 60 µm	e
Glace				"		
1) Cartographie	Limites des banquises	± 100 m	100 m	Mensuelle	t	L
2) Recherche	Epaisseur et topographie		10 m		Visuelle et thermique	e
Taches d'hydrocarbures						
1) Détection	Contraste thermique	50 m		Fréquent	I. r. proche et lointain	Moyenne
2) Quantification et identification	Signature spectrale	300 m			Visible et thermique	e

(d'après Dt ESRO - 1973)

Tabl 3 UTILISATION DES RADIOMETRES MILLIMETRIQUES ET CENTIMETRIQUES EN OCEANOGRAPHIE ET HYDROLOGIE

- CONTRAINTES OPERATIONNELLES -

	Résolution spatiale nécessaire	Précision des mesures de température	Fréquence des observations nécessaires
1) Contrôle de la température			
- A l'échelle océanique (ensemble)	150 km	1° K	Bimensuelle
- A l'échelle océanique zonale	20 km	1° K	Hebdomadaire
- Zones côtières et grands lacs	5 km	1° K	A la demande
- Gradient de température dans l'océan	150 km	*	Mensuelle
2) Humidité du sol			
- Teneur en eau	200 m	5° K +	Journellement à mensuellement
- Gradient d'humidité	200 m	*	
- Distribution horizontale de l'humidité	200 m	5° K +	A la demande
3) Etat de la mer	150 km	5° K +	4 fois/jour à journellement
4) Détection des films d'hydrocarbures :	100 m	10° K +	A la demande
5) Subdivision en grandes catégories des eaux superficielles.	1 km	10° K +	Journellement à hebdomadairement
6) Limites glace-eau	200 m	20° K +	Hebdomadairement
7) Neige :		*	Hebdomadairement
- Equivalent eau de la couverture neigeuse	200 m	5° K +	"
- Limites entre neige et terre		1° K +	"
- Limites neige-glace	100 m	1° K	A la demande
- Température de la neige	100 m	1° K +	Journellement
- Humidité de la neige			

+ D'après les données théoriques ou expérimentales.

* Aucune technique satisfaisante existante actuellement.

(D'après E. OHLSSON - 1973)

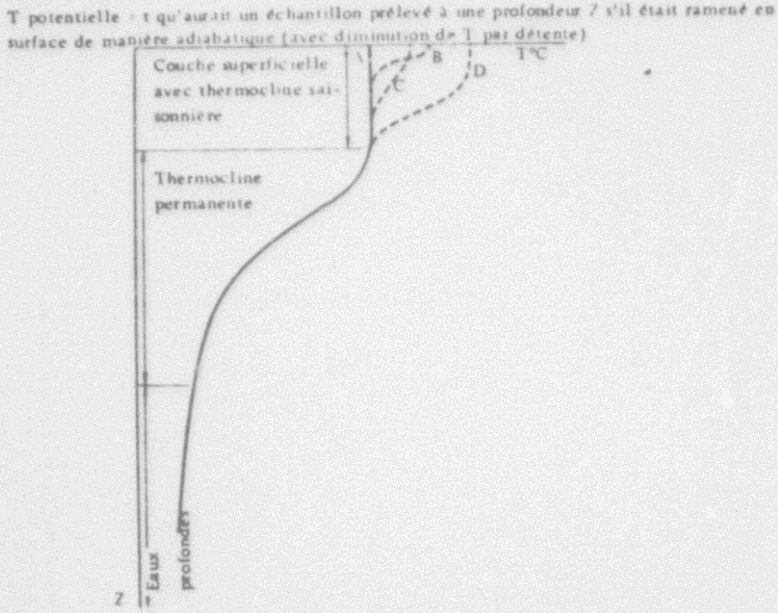


Fig. 2 REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES VARIATIONS DE LA REPARTITION VERTICALE DES TEMPERATURES AVEC LA SAISON - D'après IVANOFF (1972)

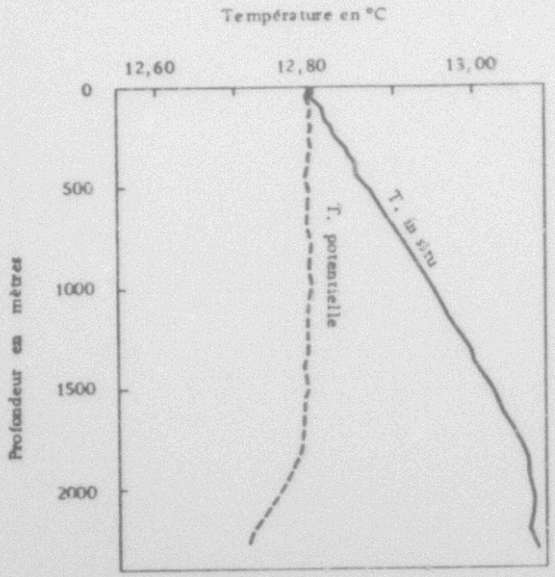


Fig. 3 REPARTITION VERTICALE DE LA TEMPERATURE DANS LE GOLFE DU LION (41°55' N, 4°39' E) - (Station 6967 du Jean Charcot le 20/2/69)
D'après IVANOFF (1972)

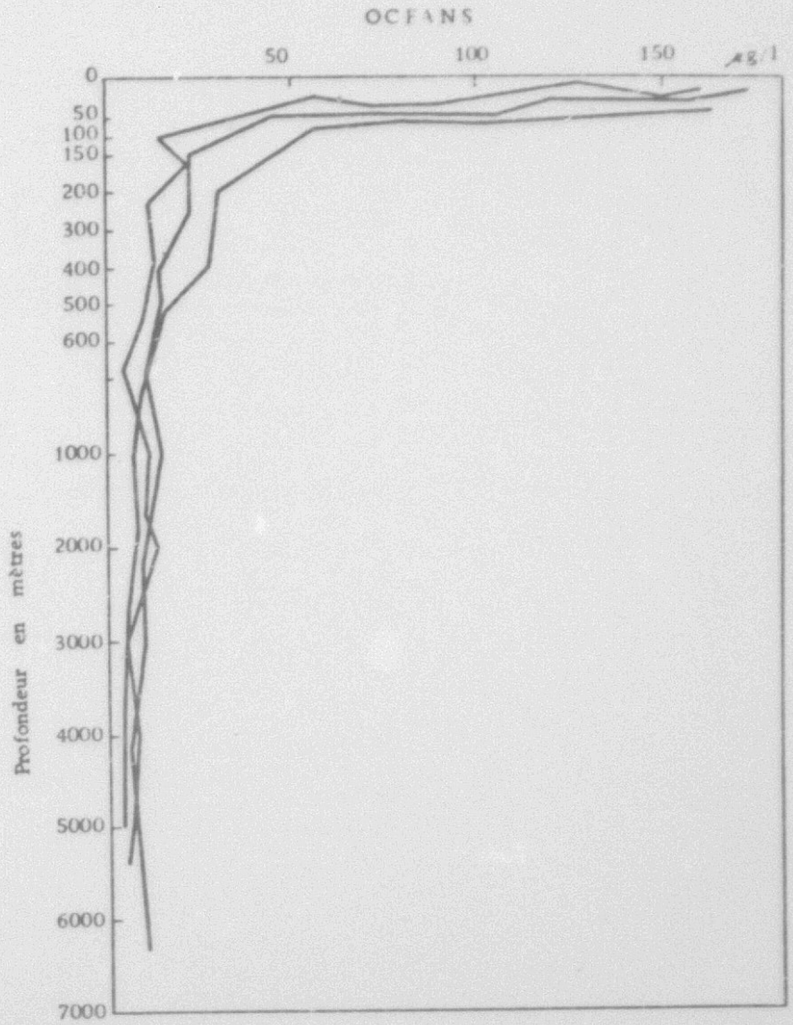


Fig. 1 EXEMPLE DE LA REPARTITION VERTICALE DE LA TENEUR DES EAUX DE MER EN MATIERES EN SUSPENSION.
(Atlantique au large de Dakar et d'Abdijan).
d'après Ivanoff, 1972.

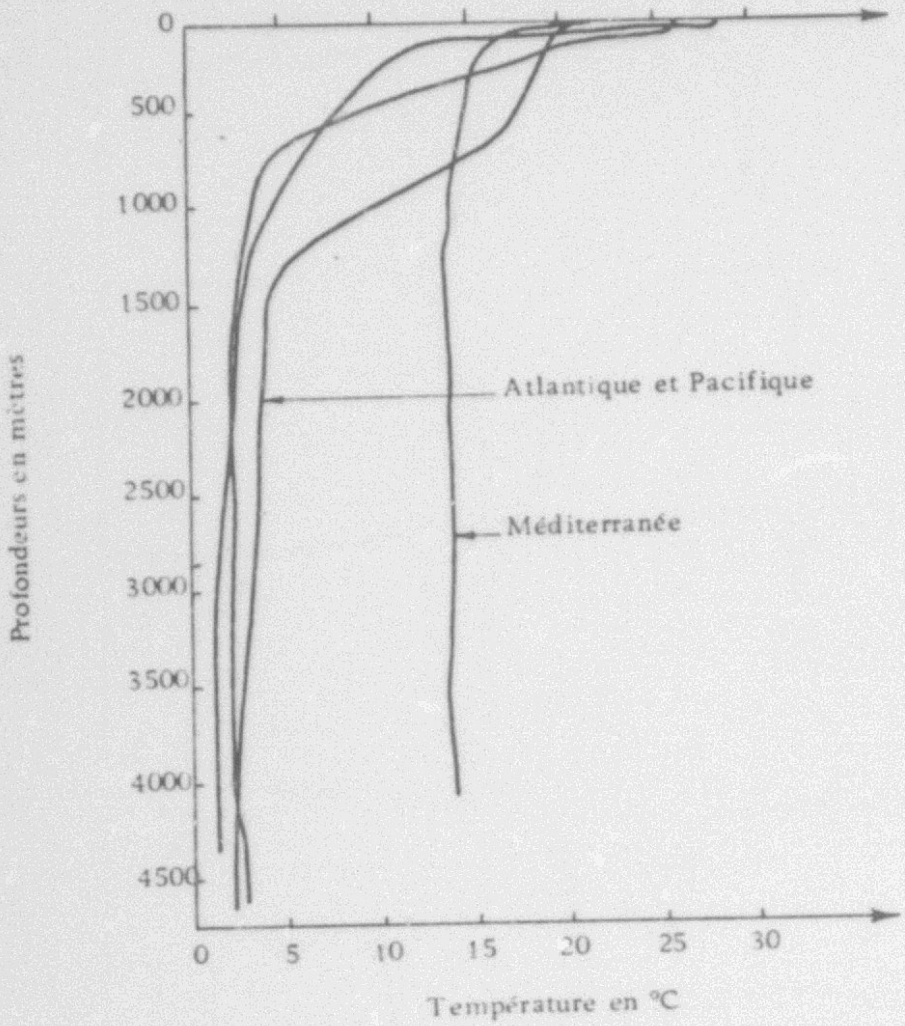


Fig. 4 EXEMPLES DE REPARTITIONS VERTICALES DE QUELQUES TEMPERATURES
D'après H. et Mac LELLAN et IVANOFF (1972)

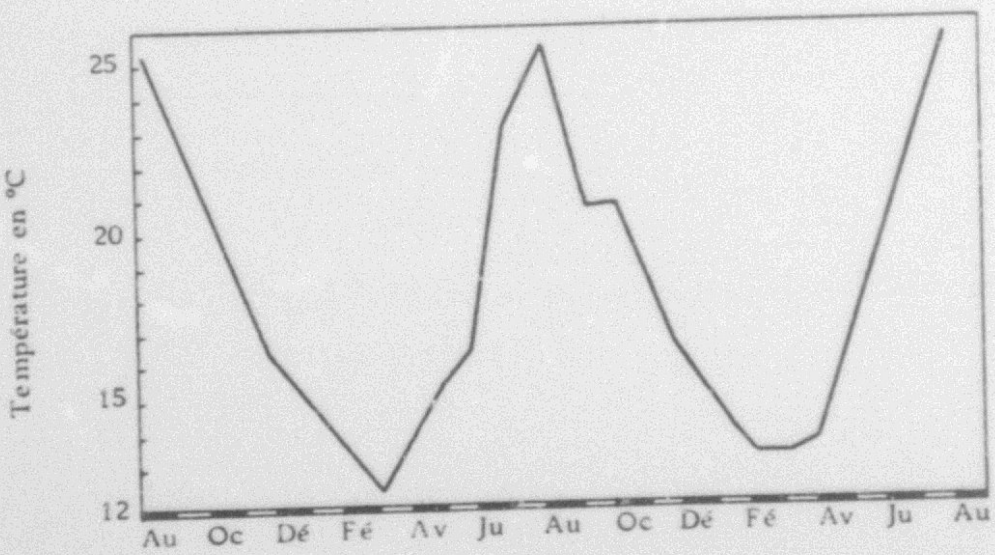


Fig. 5 - VARIATION DE LA TEMPERATURE SUPERFICIELLE DE L'EAU D'AOUT 1962 A AOUT 1964 ENTRE NICE ET LA CORSE - D'après J. GOSTAN (1968)

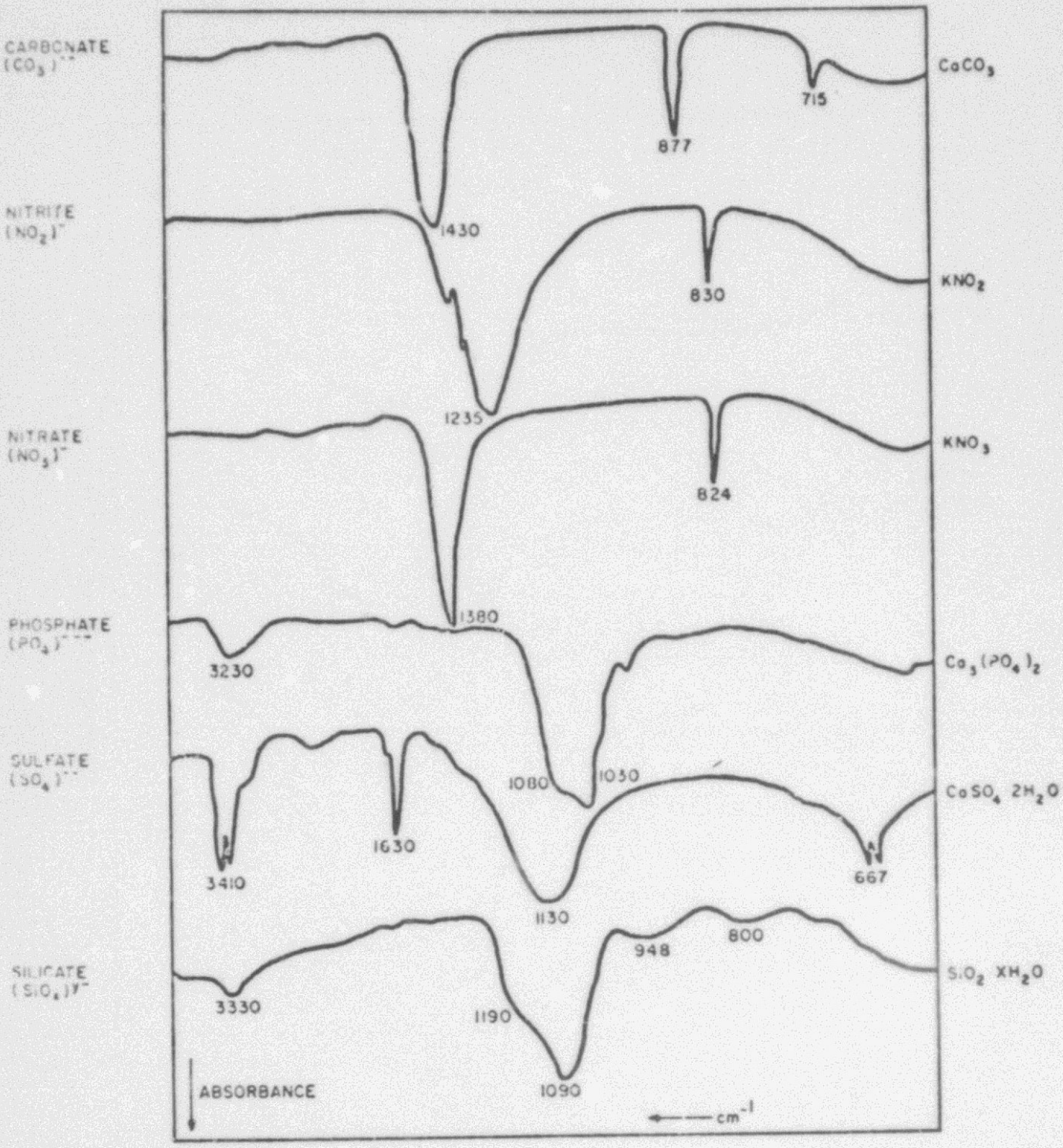


Fig. 6 : Spectres d'absorption des principaux anions inorganiques
(d'après LYON)

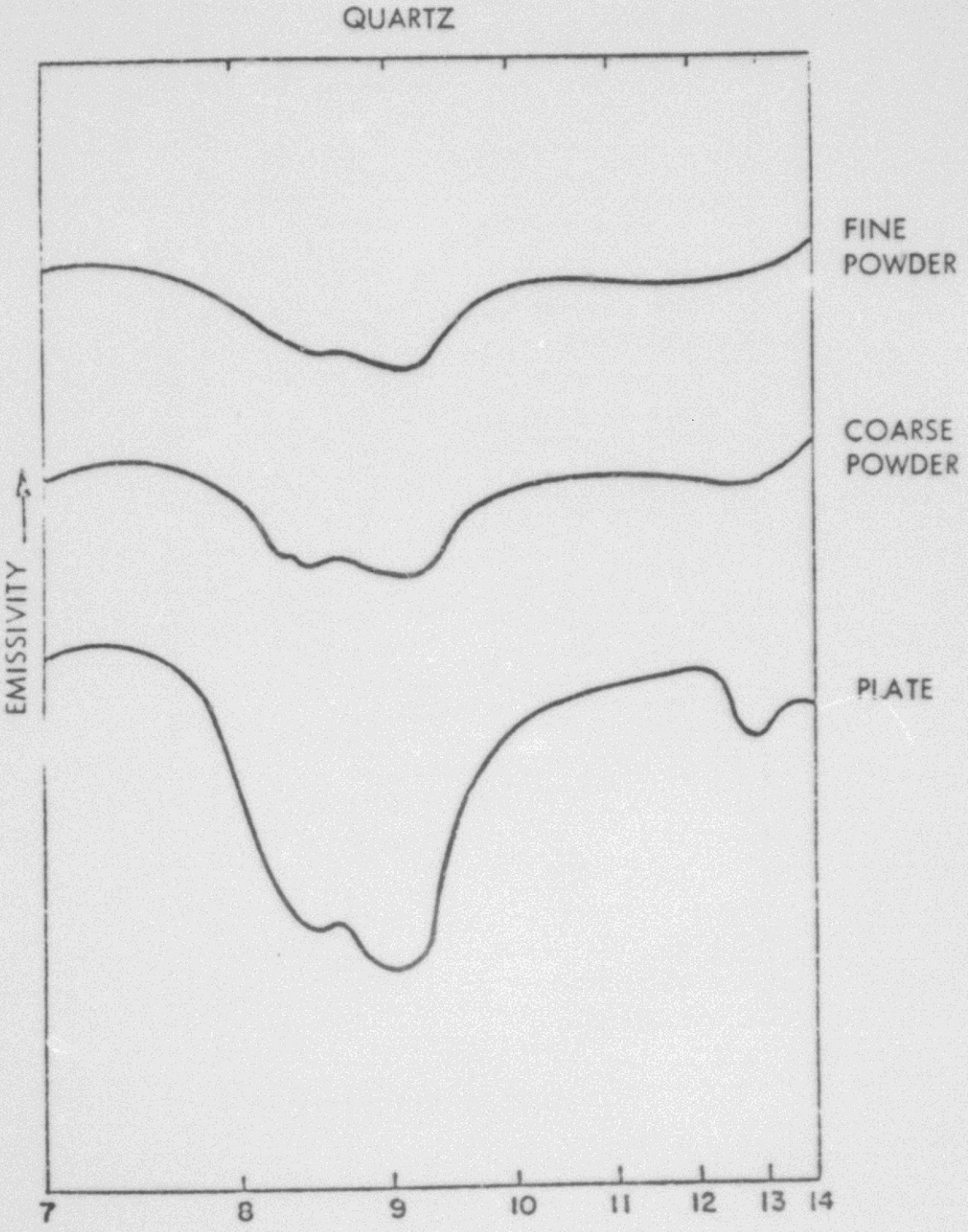


Fig. 7 : Emission spectrale apparente de quarts en fragments (plate), en poudre à gros grain (coarse), en poudre fine (fine).
(d'après SALISBURY et HUNT)

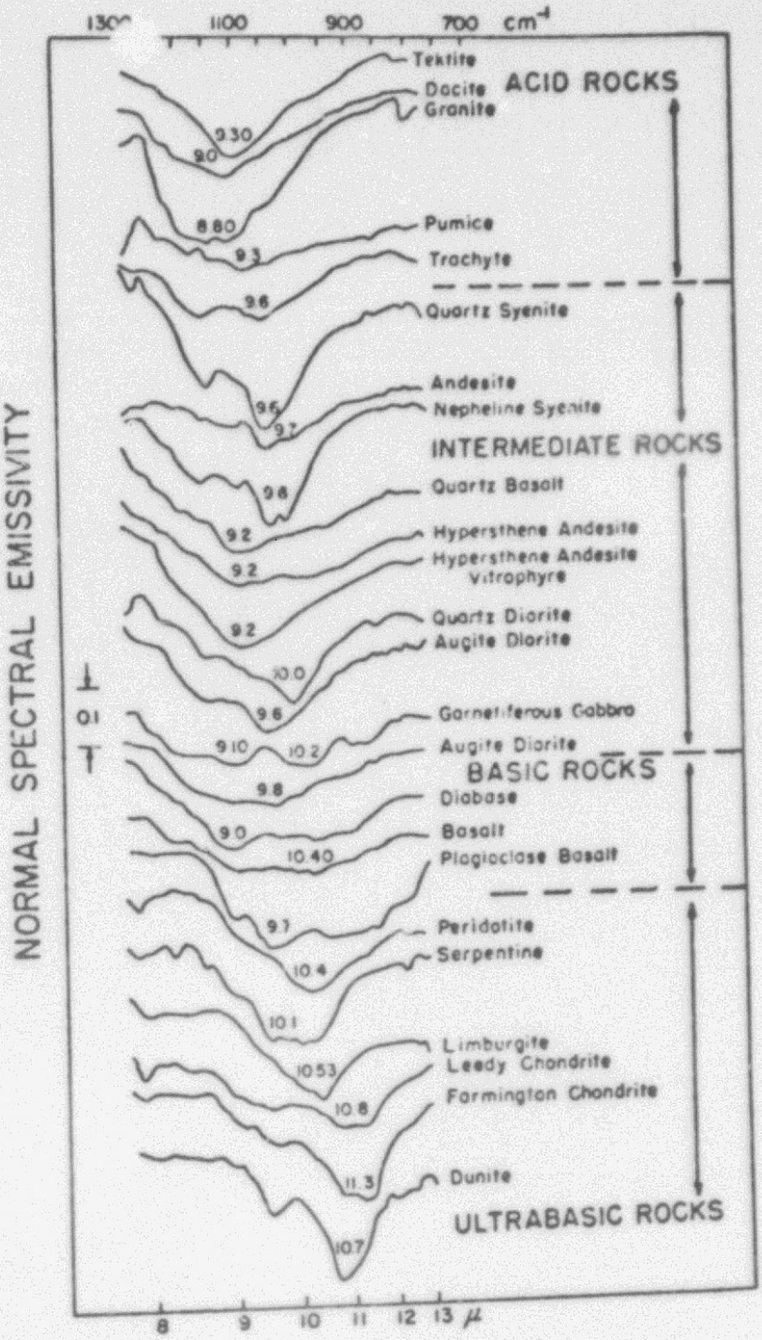


Fig. 8 : Emissivités des principales roches terrestre (entre 8 et 13 microns), mesurés au laboratoire, et rangés en fonction de la teneur en SiO_2 (d'après LYON).

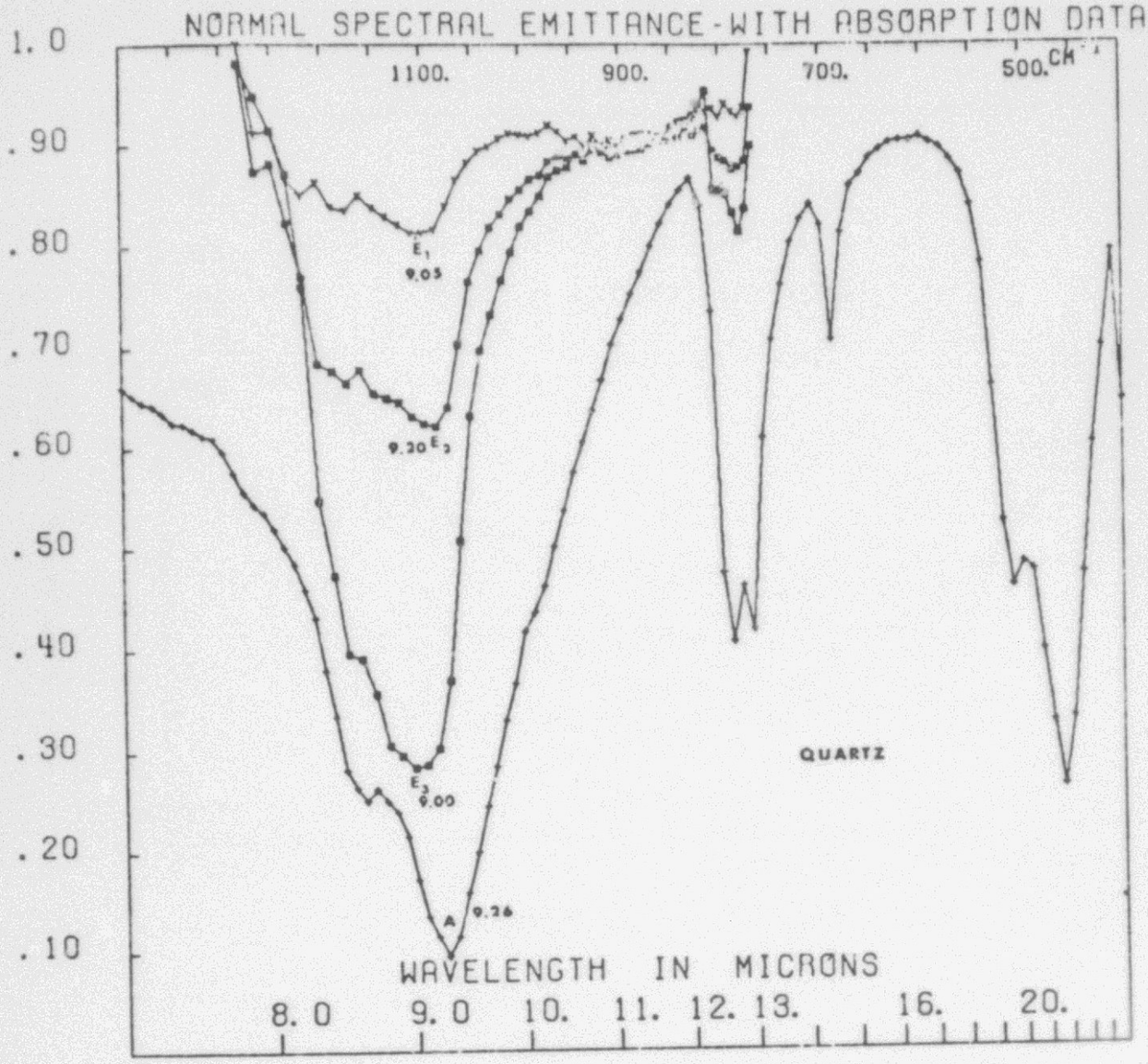


Fig. 9 : Emissivité du quartz pour différentes rugosités (E_3 : cas de quartz poli, E_2 quartz rugueux, E_1 quartz en poudre.)

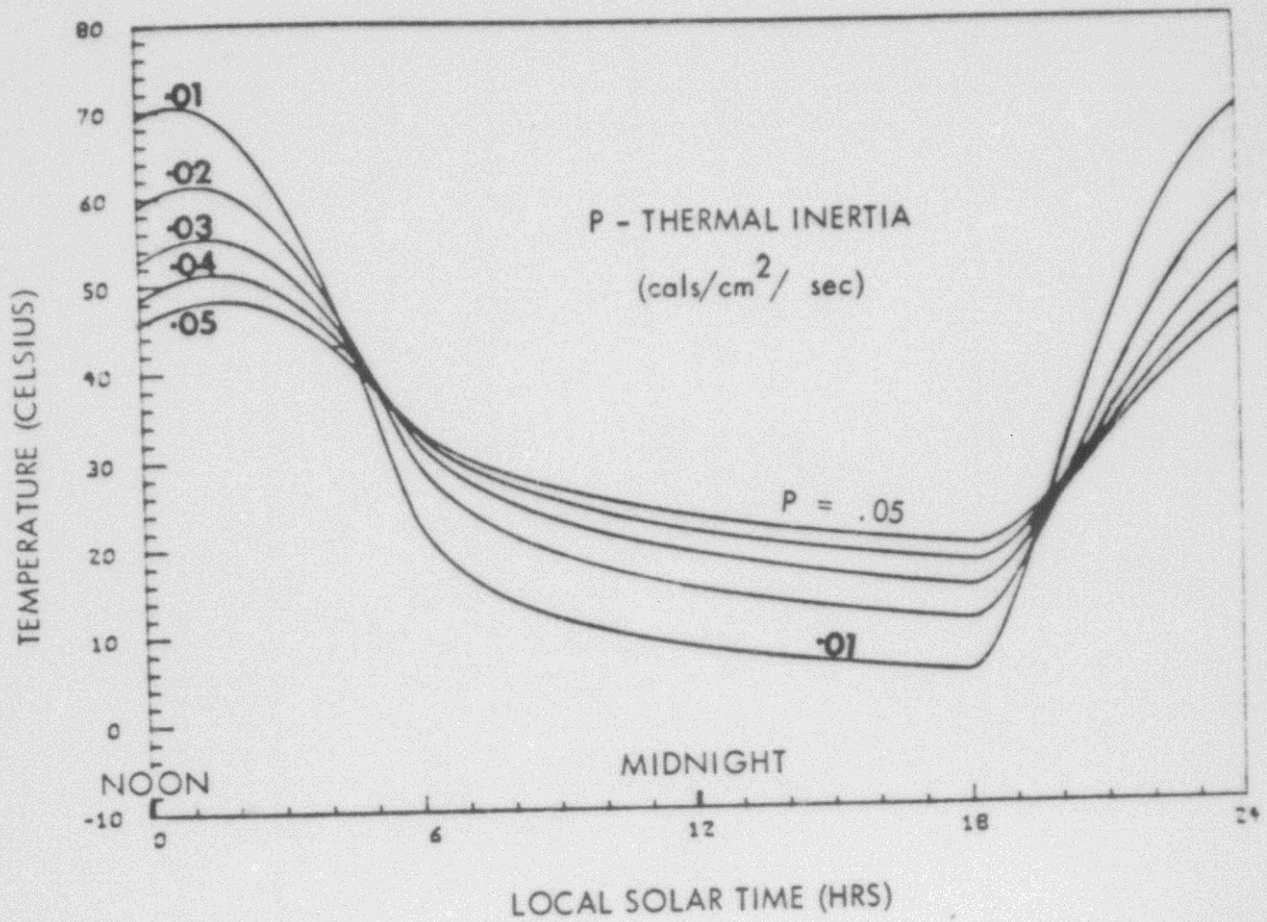


Fig. 10 : Variations diurnes de la température de différents matériaux solides, fonction de leurs différents coefficients thermiques (d'après POHN et Alii)

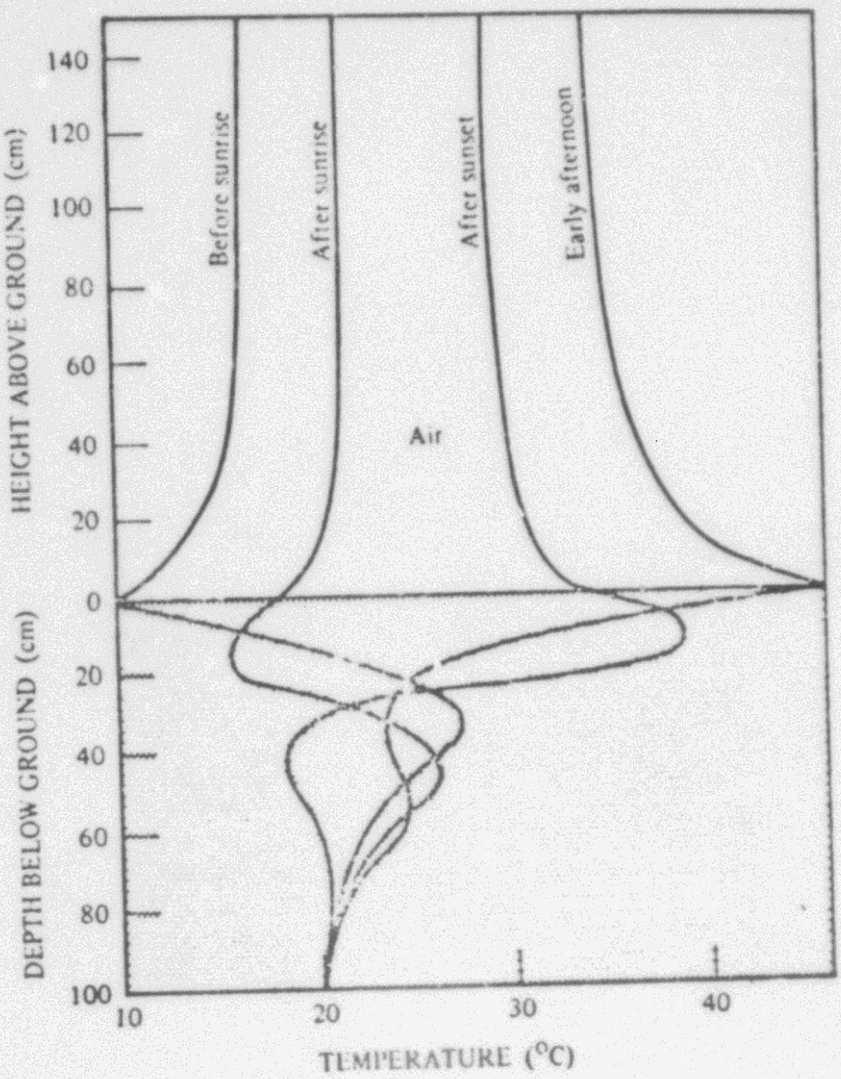
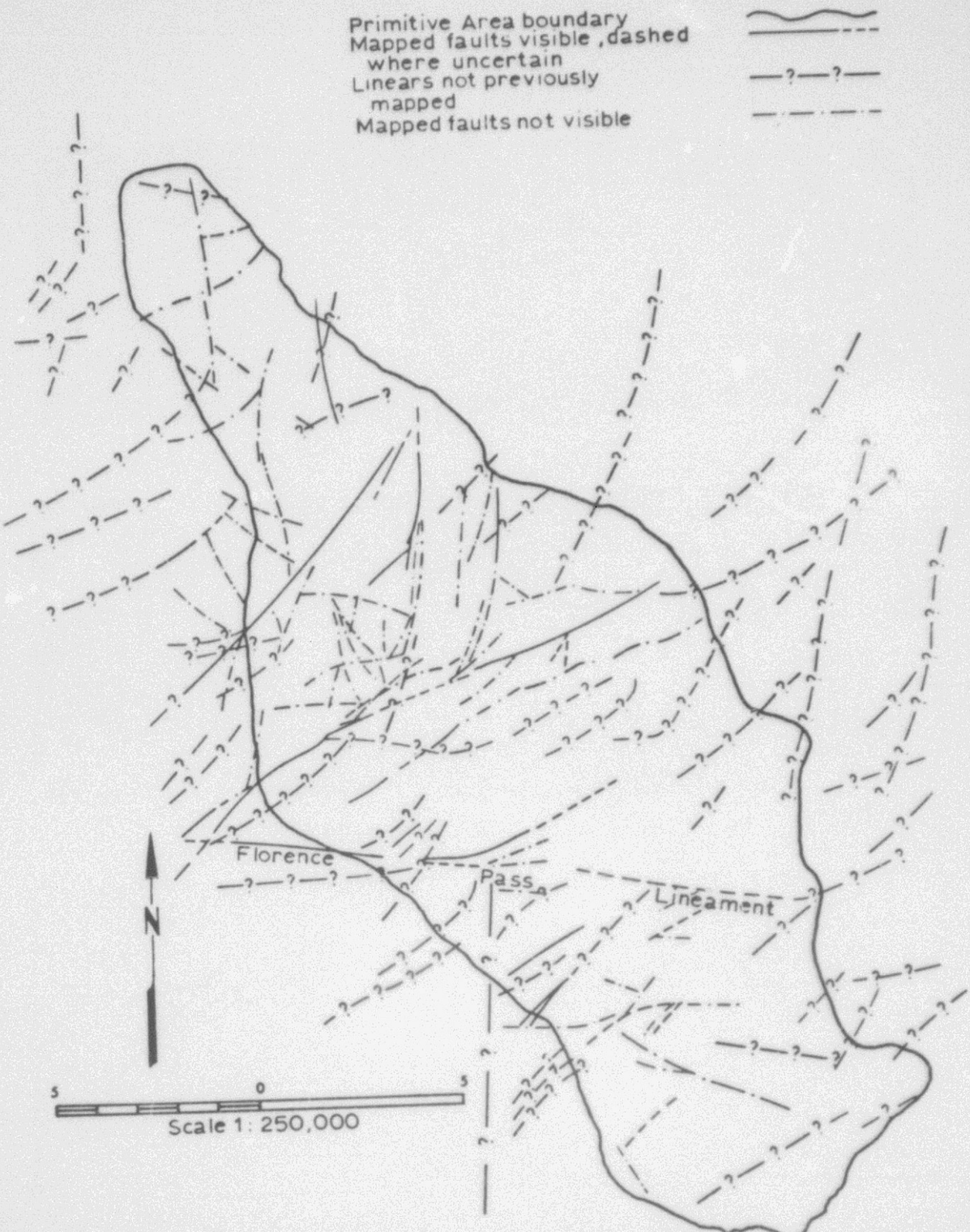


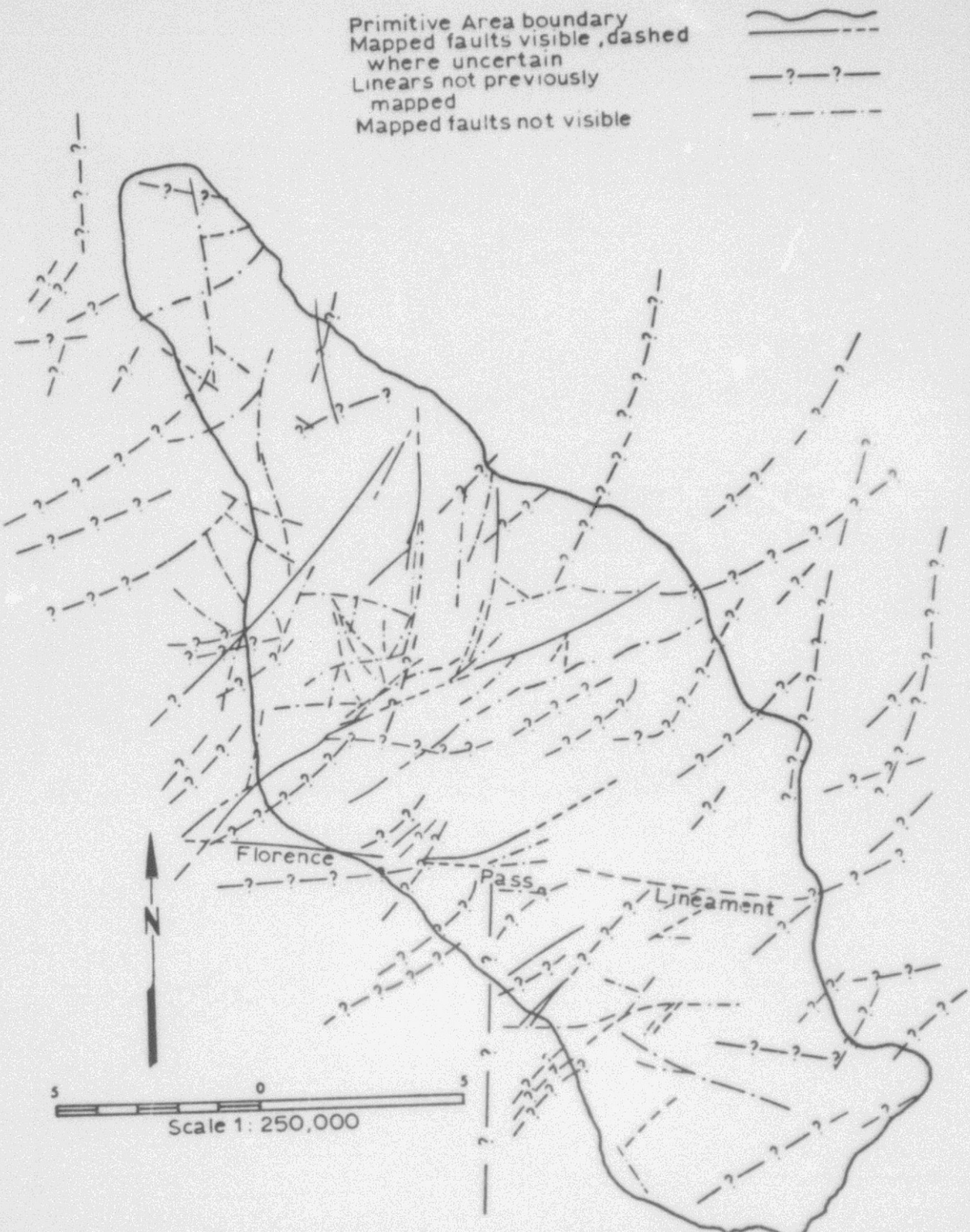
Fig. 11 : Type de variations du profil thermique dans l'air, près du sol et dans le sous sol au cours d'un cycle journalier, par une journée à ciel clair d'été, en zone tempérée.

(d'après GATES)



Comparison of ERTS-1 Imagery With Known Geologic Information
Cloud Peak Primitive Area, Wyoming

Fig. 12 - EXEMPLE DE LINEATIONS (Tireté avec points d'interrogation) SUPPLEMENTAIRES DECELEES SUR LES ENREGISTREMENTS DU SATELLITE ERTS I, PAR RAPPORT AUX ELEMENTS STRUCTURAUX ANTERIEUREMENT CARTOGRAPHIES PAR LES METHODES CLASSIQUES. (Région de Cloud Peak Primitive Area, WYOMING).
(d'après R. A. HOPPIN et alii, 1974)



Comparison of ERTS-1 Imagery With Known Geologic Information
Cloud Peak Primitive Area, Wyoming

Fig. 12 - EXEMPLE DE LINEATIONS (Tireté avec points d'interrogation) SUPPLEMENTAIRES DECELEES SUR LES ENREGISTREMENTS DU SATELLITE ERTS I, PAR RAPPORT AUX ELEMENTS STRUCTURAUX ANTERIEUREMENT CARTOGRAPHIES PAR LES METHODES CLASSIQUES. (Région de Cloud Peak Primitive Area, WYOMING).
(d'après R. A. HOPPIN et alii, 1974)

APPLICATION DE LA RADIOMETRIE INFRAROUGE

A L' HYDROGEOLOGIE.

—

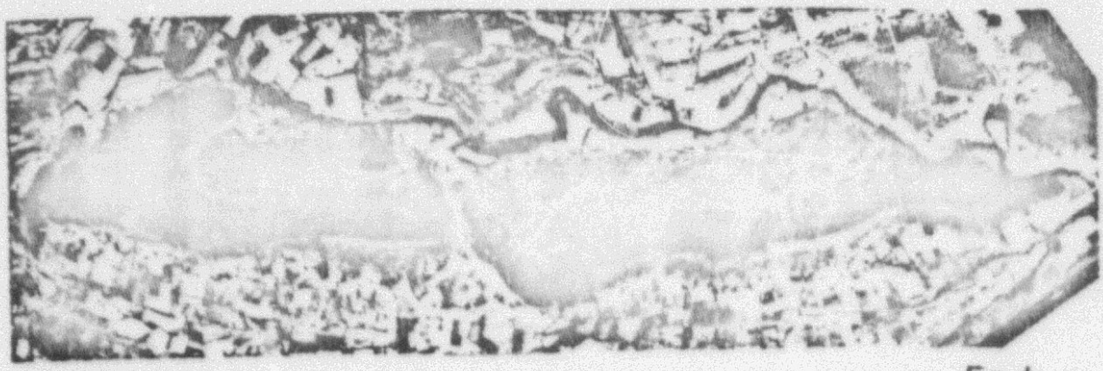


Fig. 1

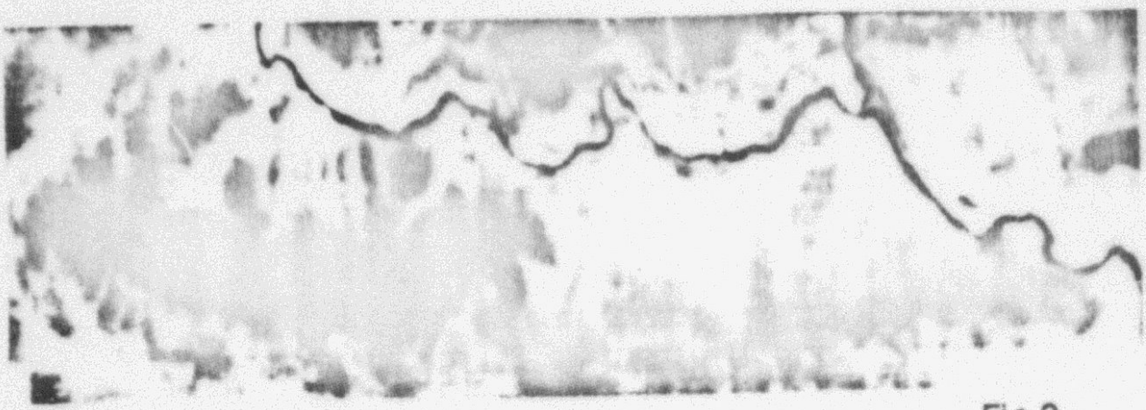


Fig. 2

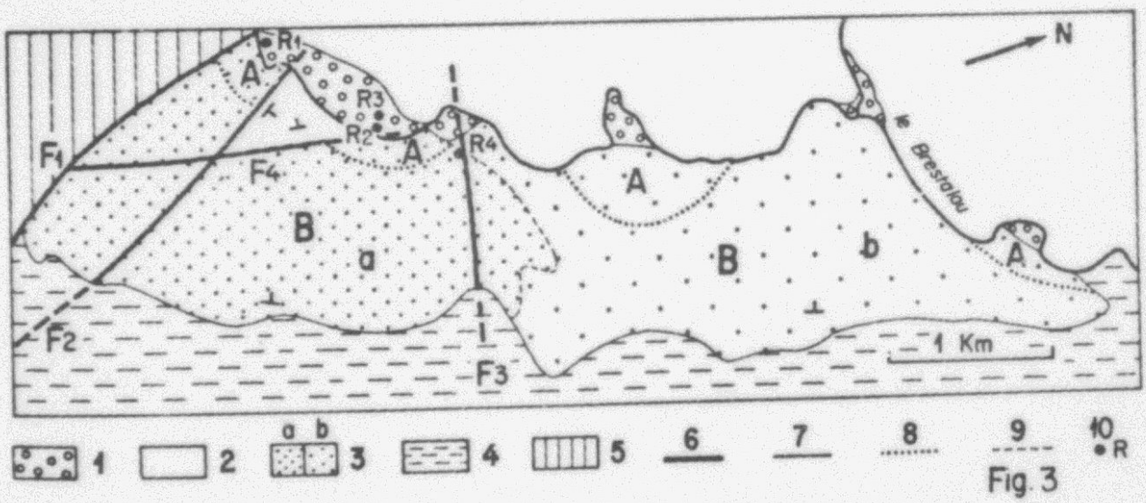


Fig. 3

Exemple de modification de l'émission I.R. induite par la présence d'un aquifère : Cas du monoclinal hauterivien calcaire du Bois de Paris, la partie gauche tectonisée et karstifiée est plus sombre, c'est-à-dire émet plus.

Fig. 1 - Photographie panchromatique N.B. - IGN.

Fig. 2 - Radiométrie I.R. 3-5 microns (prise en hiver et de nuit)

Fig. 3 - Carte géologique.

R = Exurgences de l'aquifère.

APPLICATION DE LA RADIOMETRIE INFRAROUGE

A L' HYDROGEOLOGIE.

—

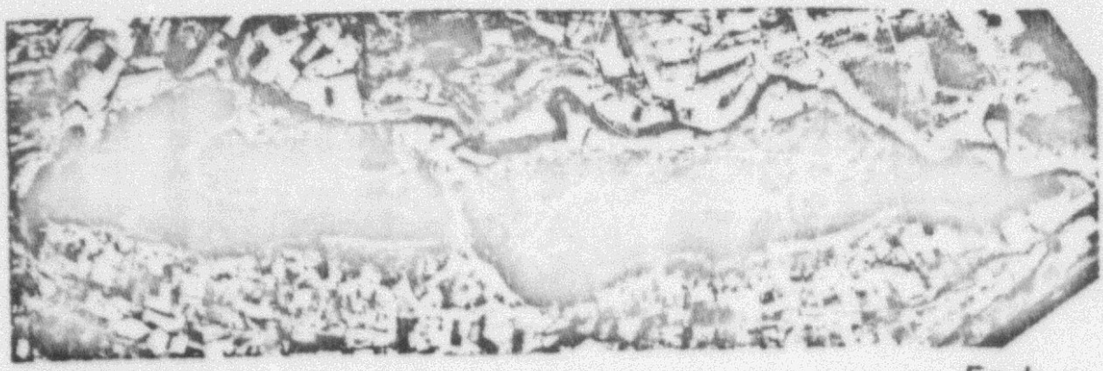


Fig. 1

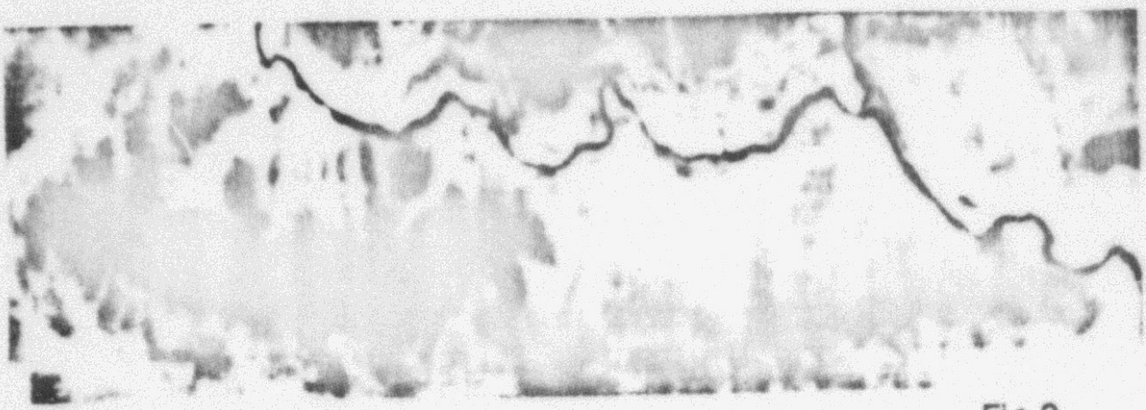


Fig. 2

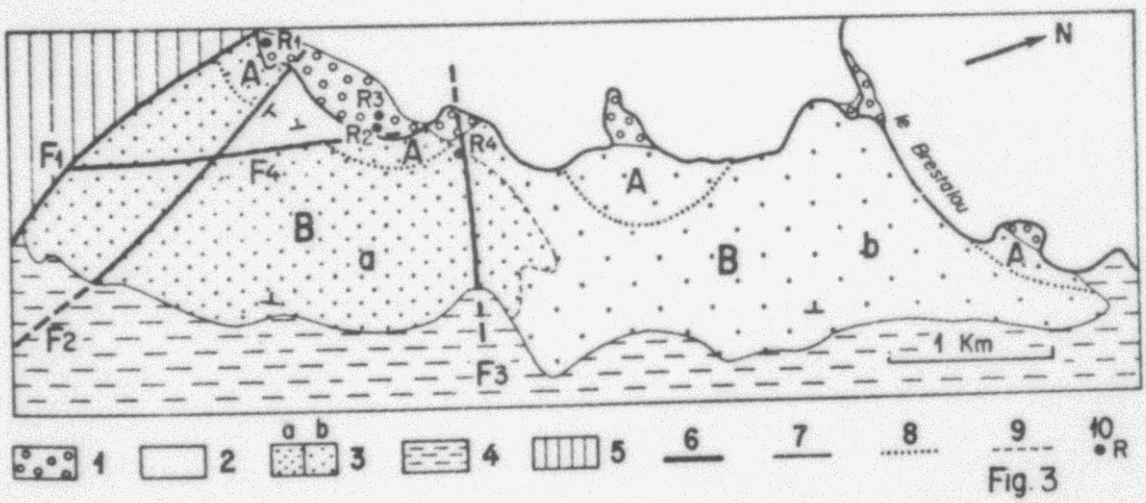


Fig. 3

Exemple de modification de l'émission I.R. induite par la présence d'un aquifère : Cas du monoclinal hauterivien calcaire du Bois de Paris, la partie gauche tectonisée et karstifiée est plus sombre, c'est-à-dire émet plus.

Fig. 1 - Photographie panchromatique N.B. - IGN.

Fig. 2 - Radiométrie I.R. 3-5 microns (prise en hiver et de nuit)

Fig. 3 - Carte géologique.

R = Exurgences de l'aquifère.

de Documentation
00 240

Séminaire de sensibilisation
LA TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

—

TUNIS - 29-30 Octobre 1975

APPLICATIONS GÉNÉRALES DE LA TÉLÉDÉTECTION ET EN PARTICULIER DE LA THERMOGRAPHIE À L'ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES DE POLLUTION DES EAUX

—

C. ARMANGAU

G.R.T.M. - C.E.R.G.H.
U.S.T.L. - MONTPELLIER

—

TUNIS -MONTPELLIER
Convention INRAT-CNRS/CEPE
Octobre 1975

—

Séminaire de sensibilisation
LA TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

TUNIS - 29-30 Octobre 1975

APPLICATIONS GÉNÉRALES DE LA TÉLÉDÉTECTION ET EN PARTICULIER DE LA THERMOGRAPHIE À L'ÉTUDE DES PHÉNOMÈNES DE POLLUTION DES EAUX

C. ARMANGAU

G.R.T.M. - C.E.R.G.H.
U.S.T.L. - MONTPELLIER

TUNIS -MONTPELLIER
Convention INRAT-CNRS/CEPE
Octobre 1975

- Résumé -

Aprés un rappel succint des propriétés de l'eau vis à vis des ondes électromagnétiques ainsi que des modifications de ces propriétés en liaison avec la qualité, l'auteur précise les caractéres généraux des pollutions des eaux. - Par télédétection : température, salinité, turbidité hydrocarbures, plancton, peuvent être étudiés. La thermographie, à la fois par sa disponibilité et par ses particularités, a une place de choix dans l'étude de la dynamique des eaux de surface.

L'auteur termine par une série d'exemples d'études de pollution qui ont été faites par son équipe et lui même sur la côte méditerranéenne française.

INTRODUCTION

Il est un domaine pour lequel les techniques actuelles de télédétection paraissent devoir compléter ou remplacer facilement des méthodes classiques, c'est celui de l'étude des phénomènes liés à la pollution des eaux, principalement en milieu lagunaire et marin. En effet, la pollution des eaux affecte souvent de grandes étendues, les masses d'eau peuvent être très rapidement mises en mouvement par le jeu des vents ou des marées, les méthodes classiques d'échantillonnage mettent en oeuvre des dispositifs peu pratiques à manipuler à partir d'un véhicule, perturbant le milieu étudié. Le repérage exact des stations de mesure est peu précis ou nécessite la mise en place d'importants moyens. Les déplacements entre stations de mesures sont longs et il est souvent difficile d'appréhender dans son ensemble un phénomène.

En regard de ce bilan, les perspectives offertes par les techniques de télédétection présentent d'incontestables avantages - saisie dans son ensemble du phénomène, localisation très simple des observations faites rapidement sans perturbation du milieu -, mais elles se heurtent à une difficulté importante : celle de la fiabilité des mesures de qualité. En télédétection, c'est en effet uniquement par des modifications apportées au rayonnement des ondes électromagnétiques caractérisant le milieu, que les phénomènes de pollution peuvent être saisis. De multiples sources d'énergie très différentes se combinent pour donner le signal qui est analysé à distance. Elles peuvent perturber le résultat cherché. C'est pourquoi encore aujourd'hui, malgré les très grands progrès réalisés ces derniers temps, seule la prise d'échantillon, sur lequel les déterminations physicochimiques classiques sont effectuées, peut constituer une preuve juridique de pollution. Cette situation est en évolution puisque la variété des plateformes, actuellement disponibles, le développement de capteurs nouveaux, l'amélioration des performances des capteurs existants, permettent, chaque jour, d'obtenir d'avantage de finesse et de sûreté dans les résultats. Jusqu'où sera t-il possible d'aller ? Que peut-on attendre sûrement des moyens actuellement opérationnels ? Deux questions auxquelles les lignes qui suivent vont tenter de répondre.

Dans ce séminaire sur la télédétection, je n'insisterai pas sur la présentation des ensembles porteurs-capteurs : les conférences de ce matin en ont parlé. Je rappelerai simplement que la gamme des senseurs actuellement existants couvre la quasi-totalité du spectre électromagnétique (pl. I). Cependant, aujourd'hui, en Europe, les senseurs opérationnels pour les études des étendues d'eau, senseurs avec lesquels il est possible de faire effectuer des prises de vues à la demande, se limitent à la partie visible du spectre et à l'infra-rouge. Ce sont essentiellement des senseurs passifs, c'est-à-dire analysant le rayonnement "naturel" en provenance des objets survolés.

Dans ce qui suit, sera tout d'abord examiné comment atteindre par télédétection les paramètres définissant la qualité des eaux. Parmi les di-

vers moyens ,possibles,une place spéciale sera réservée à la thermogra phie qui permet dès maintenant, malgré les défauts inhérents aux appa- reillages,dans le domaine de l'étude de la pollution des eaux, des in- ventaires trés rapides. En donnant enfin quelques exemples,nous ferons part de notre expérience en la matière,en espérant contribuer ainsin,à promouvoir des applications de la téiédétection.

---

1. COMMENT ETUDIER PAR TELEDETECTION LA QUALITE ET LA POLLUTION DES EAUX

1.1. QUALITE DE L'EAU ET RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE

Plus de 360 millions de kilomètres carrés, soit plus de 7/10 de la surface du globe sont occupés par l'eau de mer. Contrairement à ce qui se passe sur la terre, sauf au voisinage des côtes, le milieu marin est relativement homogène et de composition moyenne globale à peu près constante. Les rapports des concentrations des divers éléments présents varient peu suivant les régions : seule, la salinité des eaux superficielles, c'est-à-dire celles directement affectées par les précipitations et la température ambiante, sont susceptibles de notables variations, comme le démontrent les tableaux et figures des planches II à IV, ainsi que la figure C de la planche VI (pour la plupart extraits de (1)).

L'un de ces deux paramètres, la température, pour les eaux de surface dépend essentiellement de l'énergie provenant, d'une part directement de l'éclairement du soleil ou du rayonnement des nuages, d'autre part, de celle transmise par les couches plus profondes. Le sens des échanges d'énergie est fonction des températures relatives des différents milieux et de leurs aptitudes respectives à transmettre le rayonnement électromagnétique, vecteur de ces énergies (planches V, VII A, VII bis).

Mais les variations de la température sont elles-mêmes liées aux variations de salinité qui dépendent de la composition chimique globale de l'eau de mer. Cette composition chimique globale commande un autre paramètre physique : la densité, qui, facteur de non mélange et moteur de masses d'eau, joue un rôle non négligeable dans leurs déplacements verticaux et dans la dynamique des échanges thermiques (planches VI A et B et VII A). L'idée de la difficulté de la mesure par télédétection de l'un seulement des paramètres, par exemple la température, s'impose du fait des interdépendances de sa valeur avec la valeur des autres paramètres, chacun ayant une influence sur le rayonnement électromagnétique par l'intermédiaire duquel la mesure peut être faite.

Mais d'autres causes de variations entrent aussi en jeu, soit directement, soit indirectement : le vent, par exemple, peut modifier la température superficielle de l'eau directement par une évaporation plus intense (planche VII B) et indirectement, par la mise en mouvement des masses d'eau à caractères physico-chimiques différents.

Les variations de la composition chimique de l'eau de mer se traduisent par les modifications des propriétés optiques et plus généralement du comportement vis-à-vis des ondes électromagnétiques. Les principaux phénomènes, comme pour l'atmosphère, sont la réflexion, la réfraction, la diffusion et l'absorption.

a) En surface, la réflexion des rayonnements dépend de l'angle sous lequel le rayonnement atteint la couche superficielle : nulle pour une incidence normale, elle devient très importante en incidence rasante (planche IX A). Ceci explique l'extrême importance de l'état de surface au moment de l'observation. La réflexion spéculaire, c'est-à-dire celle qui se produit dans la direction d'observation symétrique par rapport à la verticale, du rayonnement incident, est très importante dans l'obtention d'images exploitables. L'état de surface influe sur la possibilité de capter cette réflexion spéculaire (planche XI B). La présence de nuages, qui jouent aussi bien le rôle d'écran que le rôle de source de rayonnement, affecte la qualité de l'observation (planche XI A).

La composition du milieu modifie le pouvoir réflecteur de la surface (planche X) et surtout la présence de couches superficielles très minces telles que celles produites par les hydrocarbures (planches IV B et XVI).

b) Au sein du milieu aqueux

Par diffusion et diffraction de la lumière au sein du milieu aqueux, la présence de particules en suspension se traduit généralement par une augmentation du pouvoir réflecteur.

Lorsque les particules sont suffisamment fines, les phénomènes de diffraction dépendent de la longueur d'onde du rayonnement (déplacement du minimum d'absorption en eau de mer et en eau de rivière).

c) Sur le fond, le rayonnement qui a pénétré dans l'eau et atteint la couche superficielle du fond marin est réfléchi. Le pouvoir réflecteur du matériau constituant le fond est très inférieur à celui du même matériau sec. Comme, pour la radiation réfléchie, les mêmes phénomènes que pour la radiation incidente se produisent, c'est un rayonnement d'énergie très faible qui parvient à retraverser la surface. Celà explique que la possibilité d'observation des fonds marins dans le visible n'excède pas deux à trois dizaines de mètres alors que ces fonds sont éclairés jusqu'à 1200 à 1300 mètres de profondeur (planche XIV C).

Le phénomène essentiel dans l'observation des structures sous-marines paraît être le phénomène d'absorption. L'eau pure présente un maximum d'absorption dans l'infra-rouge et un minimum dans l'ultraviolet. Pour une eau de mer claire, ce minimum est décalé vers le vert (0,5). En présence de matières en suspension, le minimum remonte jusque dans le jaune orange tandis que le maximum se situe dans le bleu violet.

L'augmentation de la longueur d'onde du rayonnement utilisé pour l'observation permet une meilleure observation car l'absorption diminue lorsque la longueur d'onde augmente, mais elle ne devient pas nulle, ce qui gêne l'obtention d'information en profondeur, même en utilisant les ondes radio.

Bien que limitées, les possibilités d'observation à distance des principaux paramètres caractérisant l'eau de mer existent donc et il convient d'examiner quelles sont les modifications de ces paramètres engendrées par les phénomènes de pollution. Précisons au préalable ce que sont ces phénomènes de pollution.

1.2. CARACTERES GENERAUX DES PHENOMENES DE POLLUTION DES EAUX ET ROLE ATTENDU DE LA TELEDETECTION

Mis à part les phénomènes récents liés au développement du transport par mer des hydrocarbures, la pollution des eaux est essentiellement un phénomène côtier en relation directe avec les activités humaines. L'eau purificatrice a de tous temps été utilisée sans retenue et est devenue de nos jours le principal vecteur des déchets consécutifs à toute activité. Les rejets s'effectuent le plus souvent en rivière ou fleuve, mais aussi,pour les ensembles côtiers, directement en étangs ou en mer. Les étangs côtiers et la frange littorale qui reçoivent le maximum de pollution sont aussi la plus grande réserve de nourriture, principalement sous forme de micro-algues ou de micro-animaux, pour la totalité des poissons. Tant que la pollution reste faible, la nature parvient à garder son équilibre en minéralisant à l'aide même des microorganismes apportés par le rejet polluant, la quasi-totalité des substances polluantes. Parfois, lorsque l'arrivée du polluant se prolonge sur une longue période, ou devient très importante, se produisent au cours du cycle saisonnier des phénomènes à évolution très rapide (de l'ordre de quelques jours au maximum, de la journée parfois) engendrant des effets catastrophiques aboutissant à la destruction totale de toute vie d'animal évolué dans le milieu (eutrophisation - malaïgues). Ces phénomènes s'accompagnant de modifications des propriétés physico-chimiques de l'eau, notamment en ce qui concerne la turbidité,sont décelables par télédétection et une étude suivie et précise doit aboutir à une prévention des effets destructeurs.

L'eau aussi est souvent utilisée au refroidissement dans les industries consommant ou produisant beaucoup d'énergie. L'orientation actuelle vers l'implantation en bord de mer de centrales nucléaires pour lesquelles les quantités d'eaux deviennent impressionnantes (de l'ordre de grandeur de celles des débits des principaux fleuves - ce qui explique l'installation en bordure de mer) laisse prévoir une véritable pollution thermique. Compte tenu des caractéristiques du rayonnement électromagnétique (planche VIII), cette pollution est très facilement observable par télédétection : radiométrie infra-rouge ou hyperfréquences peuvent donner à distance des mesures directes de température. Chimiques, organiques ou thermiques, les pollutions qui affectent la bande littorale se propagent en mer au gré des vents et des marées. Si leur impact sur le milieu marin peut, dans certains cas particuliers, aller très loin en distance, il faut garder présent à l'esprit d'une part, du fait du rôle de la densité, que les eaux polluées

Bien que limitées, les possibilités d'observation à distance des principaux paramètres caractérisant l'eau de mer existent donc et il convient d'examiner quelles sont les modifications de ces paramètres engendrées par les phénomènes de pollution. Précisons au préalable ce que sont ces phénomènes de pollution.

1.2. CARACTERES GENERAUX DES PHENOMENES DE POLLUTION DES EAUX ET ROLE ATTENDU DE LA TELEDETECTION

Mis à part les phénomènes récents liés au développement du transport par mer des hydrocarbures, la pollution des eaux est essentiellement un phénomène côtier en relation directe avec les activités humaines. L'eau purificatrice a de tous temps été utilisée sans retenue et est devenue de nos jours le principal vecteur des déchets consécutifs à toute activité. Les rejets s'effectuent le plus souvent en rivière ou fleuve, mais aussi,pour les ensembles côtiers, directement en étangs ou en mer. Les étangs côtiers et la frange littorale qui reçoivent le maximum de pollution sont aussi la plus grande réserve de nourriture, principalement sous forme de micro-algues ou de micro-animaux, pour la totalité des poissons. Tant que la pollution reste faible, la nature parvient à garder son équilibre en minéralisant à l'aide même des microorganismes apportés par le rejet polluant, la quasi-totalité des substances polluantes. Parfois, lorsque l'arrivée du polluant se prolonge sur une longue période, ou devient très importante, se produisent au cours du cycle saisonnier des phénomènes à évolution très rapide (de l'ordre de quelques jours au maximum, de la journée parfois) engendrant des effets catastrophiques aboutissant à la destruction totale de toute vie d'animal évolué dans le milieu (eutrophisation - malaïgues). Ces phénomènes s'accompagnant de modifications des propriétés physico-chimiques de l'eau, notamment en ce qui concerne la turbidité,sont décelables par télédétection et une étude suivie et précise doit aboutir à une prévention des effets destructeurs.

L'eau aussi est souvent utilisée au refroidissement dans les industries consommant ou produisant beaucoup d'énergie. L'orientation actuelle vers l'implantation en bord de mer de centrales nucléaires pour lesquelles les quantités d'eaux deviennent impressionnantes (de l'ordre de grandeur de celles des débits des principaux fleuves - ce qui explique l'installation en bordure de mer) laisse prévoir une véritable pollution thermique. Compte tenu des caractéristiques du rayonnement électromagnétique (planche VIII), cette pollution est très facilement observable par télédétection : radiométrie infra-rouge ou hyperfréquences peuvent donner à distance des mesures directes de température. Chimiques, organiques ou thermiques, les pollutions qui affectent la bande littorale se propagent en mer au gré des vents et des marées. Si leur impact sur le milieu marin peut, dans certains cas particuliers, aller très loin en distance, il faut garder présent à l'esprit d'une part, du fait du rôle de la densité, que les eaux polluées

restent en surface, d'autre part que les distances normales d'observation ne dépassent guère quelques dizaines de kilomètres.

Un problème d'une autre nature est posé par le développement du transport par mer des hydrocarbures. Avec la mise en service des pétroliers géants, des phénomènes de pollution, d'une ampleur exceptionnelle, peuvent être observés. En superficie, par exemple, 11 m3 de pétrole peuvent s'étaler en couche monomoléculaire sur près de 10 km2. L'étude par les méthodes classiques d'une pollution par les hydrocarbures devient vite très onéreuse ; par ailleurs, ces pollutions pouvant se produire en n'importe quel point du globe, les délais d'arrivée sur les lieux du dispositif d'observation peuvent être très longs. Les méthodes de télédétection, dans ce cas là à partir de satellites, apparaissent tout de suite comme d'une excellente efficacité dans la mesure où les capteurs adaptés à la détection existent.

Quel que soit le genre de pollution à surveiller, rejet côtier ou déversement en mer d'hydrocarbures, trois opérations sont toujours à envisager :

- déceler rapidement la source de pollution,
- l'identifier en qualité et en quantité,
- étudier son évolution dans le milieu marin.

Si, pour l'identification de la pollution, la télédétection n'apporte pas encore des solutions totalement satisfaisantes, elle est, dès aujourd'hui, parfaitement opérationnelle pour les deux autres points, ce qui rend envisageable d'utiliser une partie des crédits, généralement très lourds, prévus pour les opérations océanographiques, à des opérations de télédétection qui, en permettant un choix judicieux des emplacements des stations de mesures de contrôle, rendront efficace le système de surveillance. Encore faut-il qu'il soit possible d'envisager d'obtenir à distance au moins une indication sur la nature et la quantité du polluant recherché. Le développement actuel de la télédétection permet cet espoir.

1.3. QUELQUES POSSIBILITES REELLES

En effet, si comme dans le cas simple cité plus haut de la mesure des températures, les intéractions entre les divers paramètres caractérisant une eau rendent difficile son étude à distance dans une bande étroite du domaine spectral, la possibilité d'utiliser des capteurs différents, sensibles chacun dans une bande très étroite du spectre mais couvrant dans leur ensemble un domaine beaucoup plus large, conduit à des identifications précises.

Par exemple, dans le domaine du visible, en utilisant des spectromètres découpant le spectre visible en bandes étroites de quelques nanomètres, il est possible (2) de caractériser diverses espèces de plancton et de suivre leur évolution "explosive" dans certaines circonstances.

La planche XII donne les signatures spectrales de quelques espèces (planche XII A) et montre comment, simplement en augmentant la résolution spectrale du senseur, on peut espérer obtenir suffisamment de contraste dans certaines régions pour détecter et même (planche XIII) déterminer la quantité de plancton présent par mètre cube d'eau.

Même sans faire appel à des radiomètres très sophistiqués, d'importants résultats sont accessibles en utilisant la photographie multispectrale. Une méthodologie extrapolable à d'autres senseurs est dégagée par KLOOSTER (3) et résumée dans le schéma de la planche XV.

En matière de surveillance de pollution cependant, l'obtention d'information, n'importe quand et par n'importe quel temps, est indispensable à une efficacité totale du système. La gamme des senseurs actuellement existants permet de l'envisager. La radiométrie infra-rouge aboutit à des surveillances des étendues marines, en surface seulement certes, mais aussi bien de jour que de nuit. Mais la radiométrie en hyperfréquences (planches XII et XIII) est encore plus prometteuse en permettant certaines études à travers les couches nuageuses. Des mesures de salinité ont été obtenues par THOMANN (4) et un exemple de ses résultats est donné à la planche XIX.

GROSS (5) a montré qu'en utilisant simultanément un détecteur infra-rouge, un radiomètre hyperfréquences et un spectrophotomètre à laser qui induit une fluorescence, on arrive à avoir l'étendue d'une tache d'hydrocarbure (I.R.), l'épaisseur (hyperfréquences) et l'identification du polluant-huile, mazout- (spectrométrie à laser).

KEAFER et KOPIA (6) résument ainsi les possibilités d'application de la télédétection à la détection des pollutions.

FOLLUANT	INDICATEUR DETECTABLE A DISTANCE
Huile	Structure des vagues. Température de brillance. Couleur. Luminescence. Réflexion U.V.
Matières en suspension	Turbidité. Couleur. Polarisation de la lumière réfléchie.
Effluents chimiques toxiques	Température de brillance. Couleur.
Milieu nutritif	Chlorophylle. Algues. Luminescence. Couleur.
Effluent thermique	Température de surface.
Microorganismes	Couleur. Bioluminescence.

Seuls, la rareté des équipements existants et leur coût limitent donc l'utilisation de la télédétection en matière d'étude des pollutions. En Europe, il faut pratiquement se contenter de documents obtenus dans le visible ou par radiométrie infra-rouge. Les résultats obtenus dans le visible sont relativement connus, aussi, j'insisterai surtout sur les possibilités réelles de la thermographie en matière d'étude de la pollution des eaux superficielles.

---

2. ROLE PARTICULIER DE LA THERMOGRAPHIE

2.1. LA THERMOGRAPHIE

La thermographie est l'étude de la température apparente des objets par l'intermédiaire d'un dispositif donnant une image analogue à celle obtenue, dans le visible, avec un simple appareil photographique, en captant le rayonnement émis par l'objet dans des longueurs d'ondes supérieures à 1,2 microns.

Les courbes de la planche VIII montrent que pour l'observation des objets terrestres, le maximum d'énergie rayonnée par un objet se situe entre 8 et 14 microns pour des températures comprises entre 27º et -23º C.

Compte-tenu des détecteurs disponibles, des fenêtres atmosphériques et des principales applications visées, les appareils construits antérieurement à 1970, ont été développés pour travailler soit dans la bande 3 à 5 microns, soit dans la bande 8 - 14 microns. Ce n'est que très récemment que sont apparus sur le marché français des appareillages capables d'enregistrer simultanément des informations dans deux ou plusieurs bandes plus étroites à l'intérieur de ces fenêtres.

Trois types d'appareils sont facilement accessibles :

- les radiomètres simples qui enregistrent l'information dans une direction fixe par rapport au bâti ;

- les radiomètres à balayage simple - couramment appelés scanners ;

- les radiomètres à double balayage ou caméras thermiques.

Dans ce séminaire, ces dispositifs ont été déjà décrits, et par ailleurs, une abondante documentation existe déjà. Je ne reprends donc pas la description de ces appareillages.

Les scanners, susceptibles de donner une image, et, plus résolutifs que les caméras du fait du balayage simple, ont jusqu'à présent donné les meilleurs résultats.

Je rappelerai encore que dans la bande 3 à 5 microns, le soleil émemettant encore un peu d'énergie, les enregistrements effectués de jour donnent une information assez différente de la "température" des objets.

Par contre, tous les appareils donnent une information qui combine à la fois les variations de l'émissivité et de la température de l'objet.

2.2. EMISSIVITE ET TEMPERATURE DANS LE CAS DE L'OBSERVATION DE LA SURFACE DE L'EAU

Une remarque préliminaire : l'eau est opaque pour le rayonnement infra-rouge. Une thermographie de l'eau ne donnera donc pratiquement que le rayonnement émis par le film superficiel (planche VII A).

L'émissivité de l'eau est très voisine de celle du corps noir et les variations extrêmes observables se situent entre 0,96 et 0,99 ; il a donc été souvent considéré, en partant de la loi de STEFAN BOLTZMANN :

$$W = \varepsilon \sigma T^4$$

que $\varepsilon \neq 1$, donc que seule la température intervenait lorsqu'on observait une thermographie de la surface de l'eau. Ceci est valable en mesure absolue. Mais reprenons très simplement cette formule pour essayer d'apprécier une variation relative d'énergie aux alentours de 300º K, c'est-à dire dans les conditions d'observation normales de la surface terrestre.

$$\frac{dW}{W} = \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{4dT}{T}$$

En première approximation, j'obtiens donc vers 300º K :

$$\frac{dW}{W} \neq d\varepsilon + \frac{4}{300} dT$$

c'est-à-dire qu'un $d\varepsilon$ de 0,01 donne une variation relative de l'énergie reçue par le récepteur du même ordre de grandeur qu'un dT de 0,75.

Ce calcul, grossier mais très parlant, conduit à conclure qu'avec les systèmes de visualisation actuels, en matière d'observation de la surface de l'eau, des variations d'émissivité, dues à des différences de la qualité de l'eau, peuvent être plus importantes que celles observables à partir uniquement de la donnée température.

Ce simple fait explique :

1º) que quelles que soient les conditions dans lesquelles est effectuée la prise de thermographie, dès lors que le système de détection est correctement réglé, des masses d'eau de qualité différente sont toujours différenciées ;

2º) qu'il est impossible lorsqu'on ne dispose que d'une thermographie, de raisonner uniquement sur les températures ;

3º) qu'il est possible sur des thermographies prises à des dates différentes, de distinguer des eaux de qualité différente.

La seule difficulté avec les appareils français antérieurs à 1974 réside dans l'adaptation du réglage au sujet visé : par exemple, dans le cas de l'observation d'une surface d'eau, laisser l'appareil fonctionner au maximum de sensibilité, en sachant bien que, sauf conditions atmosphériques spéciales, aucun détail ne sera visible sur la terre. Mais ces appareils ont été conçus pour fonctionner de façon automatique, c'est-à-dire que le gain de la chaine amplificatrice du signal est automatiquement adapté aux variations d'énergies présentes sur la ligne balayée. Dans certains cas (supercyclope), il est possible de bloquer le gain, à la valeur qu'il a obtenue sur une ligne, pendant un certain temps (de l'ordre de quelques minutes). Comment se traduisent sur les images obtenues ces particularités de fonctionnement ?

2.3. EFFETS DU C.A.G. SUR LES ENREGISTREMENTS THERMOGRAPHIQUES

Comparaison des planches XX, XXI et XXII : les deux thermographies cyclope (3 à 5 μ), supercyclope (8 à 12 μ) ont été obtenues en réglage automatique (7) (8). L'eau de mer en novembre, est nettement plus chaude que la terre. La température de l'eau du fleuve est intermédiaire entre celle de la terre et celle de la mer. Lorsque la ligne de balayage est uniquement sur le sujet "eau", les faibles différences de température de brillance sont visibles (gain élevé). A partir du moment où le sujet "terre" apparaît sur une portion de la ligne de balayage, le compensateur de gain joue pour diminuer la sensibilité. Remarquer que cette compensation est beaucoup plus brutale dans le cas du cyclope que du supercyclope, mais dépend de la proportion terre/eau (comparer planche XXI et XXII pour le sypercyclope seul).

Dans les trois cas cependant, il est possible, en ne raisonnant que partiellement sur les températures de donner des interprétations erronées du type :

- l'eau des criques est plus chaude que l'eau de la haute mer,
- l'eau du fleuve se refroidit vers l'embouchure.

Il est possible en choisissant convenablement le moment de la prise de vue (égalisation des températures) de diminuer, sinon d'éliminer, les effets du C.A.G.. C'est ce qui est visible sur l'enregistrement présenté sur la planche XXIV. Une bonne visualisation de l'ensemble des sujets terre et eau est obtenue en réglage automatique. La comparaison avec la planche XXV - même sujet avec blocage du gain - montre que dans le cas, les anomalies du type cité précédemment ne sont pas visibles. Noter en comparant ces deux planches à la planche XXVI que l'appareillage est très sensible puisque les tout petits rejets, bien mis en évidence

sur le passage à basse altitude sont déjà nettement visibles sur les thermographies à 2000 m.

En ayant présent à l'esprit ces sources d'erreur, ainsi que d'autres inhérentes à tous les dispositifs de constitution d'images par un appareil à balayage placé sur un avion (roulis, lacet, tangage), il est possible de réaliser des études systématiques de rejets côtiers. C'est ce que nous avons fait ces dernières années au Centre d'Etudes et de Recherches Géologiques et Hydrologiques de la Faculté des Sciences de Montpellier, avec le concours de la Fondation C.E.R.G.A. (Centre d'Etudes et de Recherche de la Géologie et de ses Applications).

—

3. EXEMPLES D'ETUDES REALISABLES A LA DEMANDE

3.1. EXPERIENCE DU C.E.R.G.H. EN MATIERE DE TELEDETECTION DE LA POLLUTION

Les chercheurs du Centre, initialement axés sur l'étude de la pollution des eaux en utilisant les détergents anioniques comme traceurs naturels de la pollution des eaux, ont pu participer aux premières expériences du programme "Ressources Terrestres" mis sur pied au Centre National d'Etudes Spatiales. Très vite sont apparues les très grandes possibilités de la thermographie infra-rouge dans l'étude des phénomènes de pollution des eaux principalement par le fait que, visualisant dans presque tous les cas des masses d'eau de qualités différentes, les thermographies permettaient par la répétition des survols à des intervalles de temps variables, de saisir la dynamique des rejets. Les planches XXVIII et XXIX en montrent deux exemples : qu'il s'agisse d'un rejet polluant déversé de nuit dans un étang (planche XXVIII) ou des débouchés de rivière (planche XXIX). Dans des intervalles de temps très courts, en étang fermé, le panache d'un rejet déplacé par les courants côtiers, peut prendre une direction très différente sous l'influence d'un changement dans la direction du vent. De la répétitivité des vols se dégageait aussi une méthodologie d'inventaire qui nécessitait de disposer sur place d'un porteur peu onéreux sur lequel les principaux appareillages de télédétection pouvaient être placés. Après diverses expériences dans lesquelles furent successivement utilisés un PIPER CUB 90 ou un CESSNA pushpull, le choix s'est porté sur le MARCHETTI 205 présenté, ainsi que les appareillages cyclope et supercyclope, en fonctionnement simultané dans cet avion, sur la planche XXVII.

Depuis sa mise en services, plus de 200 heures de vol, réparties par périodes allant de 4 jours à 20 jours, ont été consacrées à la prise de documents de télédétection radiométriques sur les régions côtières du Languedoc-Roussillon principalement, mais aussi sur la région Marseille Côte d'Azur. Des progrès technologiques, tant sur le plan photographie (choix des émulsions et des filtres) que sur le plan radiométrie, ont été obtenus, notamment en collaboration avec le Centre National d'Etudes Spatiales et le Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale. Nous présenterons seulement les principaux résultats obtenus au cours de ces missions.

3.2. EXEMPLES D'ETUDES DEJA REALISEES

a) Pour la thermographie

Etude de résurgence sous marines dans l'étang de Leucate. Des prises de vue à diverses époques, des considérations sur la variation comparative d'anomalies liées à des résurgences connues, ont conduit l'un de nous (R.BURKHALTER) à déceler une résurgence inconnue dans cet étang (anomalie a des planches XXX à XXXII bis).

Une étude précise de la dynamique des échanges entre la mer et les étangs dont le principe avait été mis en évidence dès les premières missions (9) (planche XXXIII) et le canal du Rhône à Sète dans la région de Palavas a été menée en liaison avec le laboratoire d'Hydrobiologie Marine de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc. La méthodologie d'étude des rejets a servi aussi dans les travaux effectués en liaison avec l'Institut Scientifique et Technique des Pêches Maritimes pour préciser les mécanismes de pollution de l'étang de Thau dans lequel est pratiquée une conchyliculture intensive.

En 1973, l'inventaire des rejets polluants de la côte entre Marseille et Menton a été réalisé. C'est au cours de cette étude qu'a été améliorée la technique de prise de vue par blocage du C.A.G.

b) Pour la photographie multispectrale

Parallèlement aux travaux réalisés en thermographie, des expérimentations ont été poursuivies pour étudier les phénomènes d'eutrophisation des étangs sous l'influence de la pollution en utilisant la photographie multispectrale. La planche XXXIV donne des exemples de ce que peuvent apporter diverses émulsions dans l'étude des zones à forte turbidité, et la cartographie précise des bords d'étang. Toujours en utilisant la photographie, le mécanisme d'apport de matières en suspension dans les eaux de l'étang de Thau (crique de l'Angle), après de gros orages, a été précisé : seule la couche superficielle est affectée par ces matières en suspension. Le travail présenté sur la planche XXXVI est en cours : il s'agit de visualiser à l'aide de colorants un émissaire en mer, de façon à suivre sa dispersion dans l'espace et dans le temps.

Enfin, la planche XXXVII est un exemple de visualisation de polluants (détergents) en employant un filtre spécial sur une émulsion infra-rouge.

D'autres études sont actuellement poursuivies portant spécialement sur le mécanisme de dispersion en mer d'une pollution thermique (eaux de refroidissement de centrale), effectuées pour le compte d'E.D.F. A l'occasion de ce travail, des résultats importants ont pu être acquis sur la possibilités d'utiliser une caméra thermique couplée à un système électronique de codage en couleur des températures observées permettant d'obtenir instantanément une image colorée analogue à celle obtenue par des équidensités sur une thermographie ordinaire.

En utilisant cette fois comme porteur un hélicoptère, il est possible, dans le quart d'heure de communiquer au bateau effectuant les mesures au sol, un document cartographique (photographie polaroïd couleur) précisant la position exacte du rejet à étudier. La gamme des applications pratiques possibles de la télédétection est donc loin d'être épuisée.

CONCLUSION

Plus peut-être que dans d'autres domaines d'application, la télédétection pratiquée à petite échelle à l'aide de porteurs légers, mais suffisants pour pouvoir embarquer simultanément plusieurs détecteurs, se révèle très intéressante dans les études locales de dynamique des eaux et d'inventaire des rejets polluants. Principalement dans l'étude des étangs côtiers, elle peut aussi apporter une meilleure connaissance des mécanismes de croissance des algues et prévenir les phénomènes de malaïgues qui dépeuplent périodiquement ces étangs. La photographie multispectrale, à l'aide d'une caméra I^2S et de son complément, le Viewer I^2S permet d'envisager localement des études analogues à celles que l'utilisation de scanners multispectraux, appuyés sur des centres de calculs importants, peuvent donner sur de grandes superficies. La possibilité de répéter des expériences relativement peu coûteuses, doit permettre de faire progresser rapidement l'efficacité de la méthodologie d'étude des pollutions par télédétection. Puissent ces quelques lignes convaincre le lecteur que s'il y a encore beaucoup à faire dans ce domaine, certaines techniques sont maintenant au point et concurrentielles des techniques ordinairement employées en matière d'étude de pollution des eaux.

* *
*

BIBLIOGRAPHIE

(1) - IVANOFF A. - Introduction à l'Océanographie. Propriétés physiques et chimiques des eaux de mer. t. I. Vuibert, Paris, 1972.

(2) - CREW Gary W. - Signature Analysis of Reflectance Spectra of Phytoplankton and Sediment in Inland Waters, p. 1147-1172. Remote Sensing of Earth Ressources, vol. II, Shahrokhi, 1973.

(3) - KLOOSTER S. A. and SCHERTS J. P. - Water Quality Determination by Photographic Analysis p. 1187-1200. Remote Sensing of Earth Ressources, vol. II, Shahrokhi, 1973.

(4) - THOMANN G. C. - Remote Measurement of salinity in an Estuarine Environment, Remote Sensing of Earth Ress., pp. 327-344, vol. II, Shahrokhi, 1973.

(5) - GROSS G. - Progress in the Application of Higher Specificity Laser Induced Luminescence to the Remote Sensing of the environment and Ressources. Rem. Sens. of Earth Ress., vol. II, pp. 345-362, Shahrokhi, 1973.

(6) - KEAFER, L. Jr. and KOPIA L. P. - Development of Flight Experiments for Remote Measurement of Pollution. Remote Sens. of Earth Ress., vol. II, pp. 129-164, Shahrokhi, 1973.

(7) - BURKHALTER R. - Influence de l'appareillage sur l'aspect des images thermographiques de zones côtières. Photointerprétation, pp. 30-37, fasc. 2, Technip , Paris. 1973.

(8) - " - Rapports C. E. R. G. A., Montpellier.

a) Application de la Télédétection à l'étude de la dynamique de la dispersion des rejets en mer. Fevr. 1973.

b) Etude par Télédétection I. R. de l'étang de Salses-Leucate, Mai 1973.

c) Télédétection des résurgences d'eau douce dans l'étang de Leucate par radiométrie I. R. à balayage. Juin 1973.

(9) - ARMANGAU C. et AVIAS J. - Note préliminaire sur l'étude de l'hydrodynamique de la salinité, de la température et de la pollution des étangs côtiers du Languedoc-Roussillon, par télédétection au moyen de senseurs I. R. C. R. Acac. des Sc. , Paris, t. 273, pp. 1910-1913, 22 Nov. 1971.

LISTE DES PLANCHES

Planche I - Télédétection et rayonnement électromagnétique.

" II - Fig. A : Principaux constituants de l'eau de mer.
Fig. B : Pourcentage, en volume, des gaz de l'eau de mer.

" III - Tabl. A : Eléments-traces dans les eaux de mer.
Tabl. B : Principaux constituants des organismes vivants, leur concentration dans les eaux de mer.

" IV - Fig. A : Amplitude de variation annuelle de la température des océans.
Fig. B : Variations avec la latitude de l'évaporation, de la précipitation et de la salinité de surface.

" V - Fig. A : Valeurs comparées, en fonction de la latitude, de l'amplitude de la variation de température superficielle et de l'éclairement.
Fig. B : Variations avec la latitude (hémisphère N), de l'éclairement solaire reçu, du rayonnement thermique, des pertes par évaporation et par convection.

" VI - Fig. A : Variations de la conductivité des eaux avec la chlorinité et la température.
Fig. B : Variations de la densité des eaux avec la salinité et la température.
Fig. C : Variations de la température superficielle d'août 62 à août 64 entre Nice et la Corse.

" VII - Fig. A : Structure thermique de l'eau.
Fig. B : Variation de la température de surface de l'eau en fonction de la force du vent.

" VII bis - Fig. A : Profil de température de l'eau de mer en-dessous de la surface.
Fig. B : Transmissivité et réflectivité d'une surface d'eau libre.
Fig. C : Variations diverses de la température.
Fig. D : Mécanisme des transferts thermiques vers la surface.

" VIII - Fig. A : Spectre des rayonnements solaire et terrestre.
Fig. B : Rayonnement du corps noir.

" IX - Fig. A : Réflectivité dans les deux directions de polarisation.
Fig. B : Réflectivité d'une lame en fonction de l'épaisseur.

" X - Fig. A : Réflectance spéculaire de diverses solutions de NaCl dans la bande 2-4 microns.
Fig. B : Réflectance spéculaire de diverses solutions de NaCl dans la bande 7-15 microns.

" XI - Fig. A : Perturbations introduites par l'atmosphère.
Fig. B : Réflexion et nature des surfaces.

Planche XII - Fig. A : Signatures spectrales du phytoplancton.
Fig. B : Dégradation de la signature par augmentation de la largeur de la bande spectrale du senseur.

" XIII - Evolution de la signature spectrale du phytoplancton en fonction de la dilution.

" XIV - Fig. A et B : Absorption de la lumière par l'eau de mer entre 0,1 et 10^6 microns.
Fig. C : Pénétration de la lumière dans l'eau de mer.

" XV - Fig. A : Principe d'un système de contrôle de la qualité de l'eau par photographie aérienne.
Fig. B : Relation type entre la concentration d'un polluant et la densité optique d'une émulsion.

" XVI - Exemple de mise en évidence d'un rejet en utilisant les propriétés de la lumière réfléchie.

" XVII - Fig. A : Principe de la détection en radiométrie hyperfréquence.
Fig. B : Température apparente en fonction de l'angle d'observation et de la polarisation.

" XVIII - Fig. A : Influence de l'état de la mer sur les mesures de température en hyperfréquence.
Fig. B : I fluence de la température de l'air sur la mesure de la température d'une surface en radiométrie hyperfréquence.

" XIX - Fig. A : Radiométrie hyperfréquence. Influence de la salinité sur la mesure de température.
Fig. B : Emissivité comparée de l'eau de mer et d'une solution de ClNa.
Fig. C : R sultats de mesures à distance de la salinité.

" XX - Radiométrie I.R. - Défauts thermiques.

" XXI - " " " "

" XXII - " " " "

" XXIII - R diométrie I.R. - Correction ou élimination des défauts thermiques.

" XXIV - " " " " " " " "

" XXV - " " " " " " " "

" XXVI - RadiométrieI.R. et détection des petits rejets.

" XXVII - Ensemblede télédétection mis en oeuvre au C.E.R.G.H.

" XXVIII - Exemplede surveillance de rejet polluant.

" XXIX - Influence du vent sur les eaux superficielles.

" XXX - Méthodologie d'identification de tache thermique.

" XXXI - " " " " "

" XXXII - " " " " "

Planche XXXII bis - Méthodologie d'identification de tache termique.
" XXXIII - Dynamique des échanges entre la mer et les étangs côtiers.
" XXXIV - Cartographie précise des bordures lagunaires.
" XXXV - Turbidité des eaux aprés un orage.
" XXXVI - Méthodologie d'étude d'un émissaire en mer.
" XXXVII - Détection de polluant par photographie multispectrale.

Nota : La quasi-totalité des documents radiométriques présents provient des travaux par R. BURKHALTER, tant pour des rapports C.E.R.G.A. que pour des publications scientifiques.

Télédétection et rayonnement électro-magnétique.

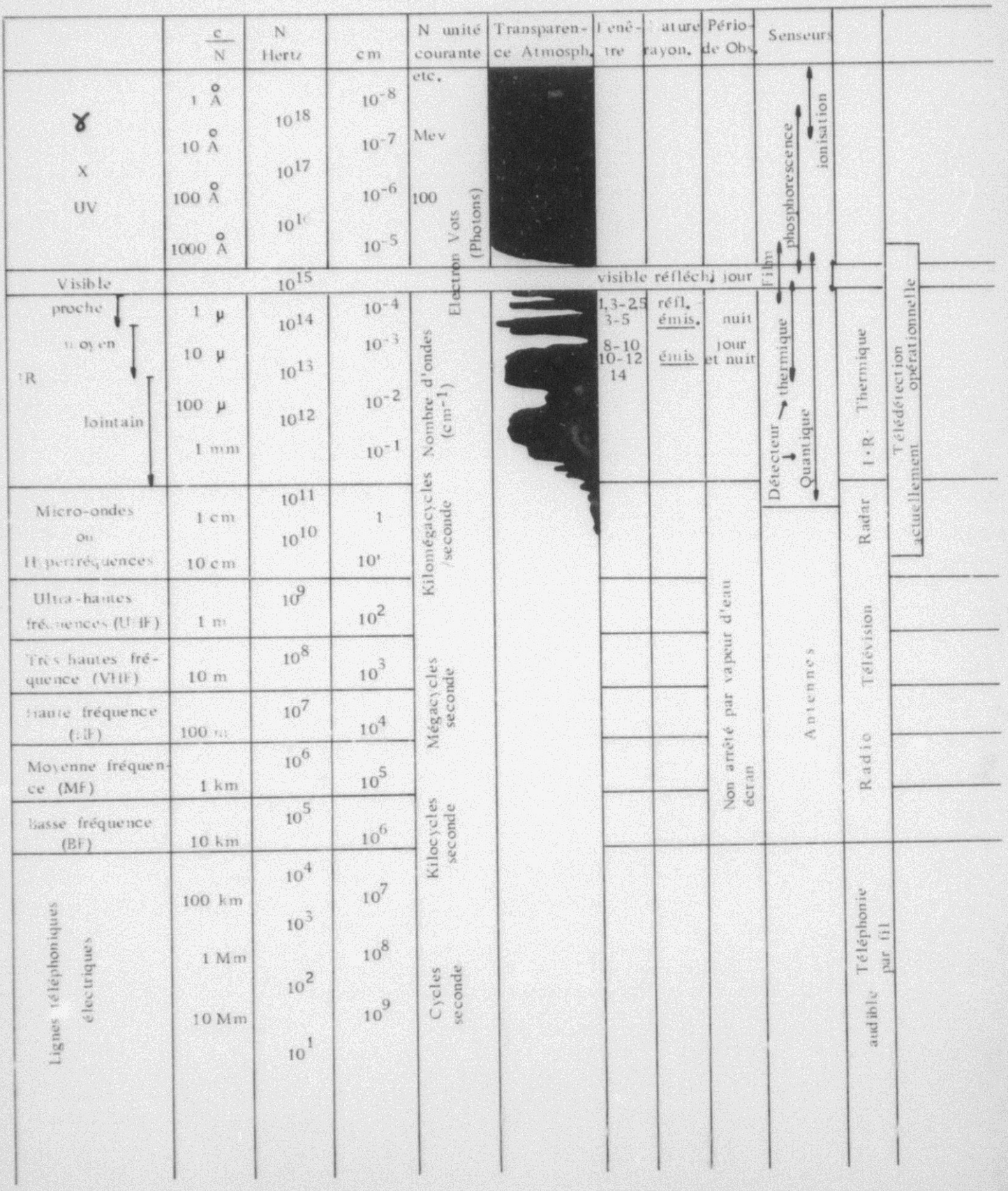


Fig-A - PRINCIPAUX CONSTITUANTS DE L'EAU DE MER
(Substances dissoutes)

Eléments	%	Rapport à la chlorinité	Concentration en gr/kg d'eau de mer d'après F. CULKIN (1965)
Cl^-	55,0	0,999	19,353
SO_4^{--}	7,7	0,140	2,712
HCO^{3-}	0,4	0,0075	0,142
Br^-	0,2	0,00348	0,067
F^-	0,003	0,00007	0,001
H^2BO_3	0,077	0,0013	0,023
Na^+	30,6	0,556	10,760
Mg^{++}	3,7	0,0668	1,294
Ca^{++}	1,2	0,0213	0,413
K^+	1,1	0,0206	0,387
Sr^{++}	0,03	0,00041	0,008
Autres éléments	0,01		

(d'après IVANOFF - 1972)

Fig-B - POURCENTAGE EN VOLUME DES GAZ DE L'EAU DE MER (DE SALINITE 35 °/oo SUPPOSEE NEUTRE POUR CO^2) A 10° C ET DE L'ATMOSPHERE

	Atmosphère	Eau de mer S = 35°/oo T = 10°
N	78,08 %	62,1
O	20,95 %	34,4
Ar	0,93 %	1,7
CO^2	0,03 %	1,8

(d'après IVANOFF - 1972)

Chlorinité °/oo = masse en grammes de l'Ag nécessaire pour précipiter les halogènes contenus dans 0,3285234 kilogramme d'eau de mer (d'après JACOB-SEN MUNDSEN (1940) et IVANOFF (1972)).
Salinité °/oo = 1,80655 Cl °/oo.

Élément	mg/m³ ou µg/l	Masse atomique	mat.g/m³ ou µat.g/l	Élément	µg/m³ ou µg/l	Masse atomique	µat.g/m³ ou µat.g/l
Silicium	3 000	28,09	104	Étain	0,8	118,69	0,006 7
Azote (NH_4^+, NO_2^- NO_3^-)	500	14,007	35,7	Selenium	0,4	78,96	0,005 1
				Cesium	0,5	132,91	0,003 8
				Yttrium	0,3	88,91	0,003 4
Lithium	170	6,94	24,5	Antimoine	0,3	121,75	0,002 7
Phosphore	70	30,97	2,26	Cobalt	0,1	58,93	0,001 7
Rubidium	120	85,47	1,4				
Iode	60	126,90	0,47	Chrome	0,05	52,0	0,000 96
Barium	30	137,34	0,22	Cadmium	0,1	112,40	0,000 89
Aluminium	5	26,98	0,19	Scandium	0,04	44,96	0,000 89
Fer	10	55,85	0,18	Germanium	0,06	72,59	0,000 83
Zinc	10	65,37	0,15	Tungstène	0,1	183,85	0,000 54
Molybdène	10	95,94	0,10	Gallium	0,03	69,72	0,000 43
				Argent	0,04	107,87	0,000 37
				Plomb	0,03	207,19	0,000 15
Cuivre	3	63,54	0,047	Mercure	0,03	200,59	0,000 15
Arsenic	3	74,92	0,040	Bismuth	0,02	208,98	0,000 1
Vanadium	2	50,94	0,039	Niobium	0,01	92,91	0,000 1
Manganèse	2	54,94	0,036	Or	0,02	196,97	0,000 1
Nickel	2	58,71	0,034				
Titane	1	47,90	0,021				
Uranium	3	238,03	0,013	Radium	$0{,}8.10^{-7}$	226,05	$3{,}5.10^{-10}$

Tableau A — Concentration dans les eaux de mer des 36 éléments traces pour lesquels elle semble être supérieure à 10^{-4} µat.g/l, ainsi que celle du radium (principalement d'après E. D. Goldberg, 1965).

	Masse D (en g) par 100 g de matière vivante, après dessiccation	Masse O (en g) par m³ d'eau de mer de salinité 35 ‰	Rapport de l'« offre » à la « demande » O/D
Oxygène	47	90 (sous forme de O_2 et de CO_2)	2
Carbone	30	29 (sous forme de HCO_3)	1
Hydrogène	7		
Azote	5	0,3 (moyenne)	0,06
Silicium	0,5 à 10	0,5 (moyenne)	1 à 0,05
Chlore	4	19 400	4 800
Sodium	3	10 750	3 600
Potassium	1	390	390
Soufre	1	900	900
Phosphore	0,6	0,03 (moyenne)	0,05
Calcium	0,5	416	830
Magnésium	0,4	1 300	3 300

Tableau B — Principaux constituants des organismes vivants; leur concentration dans les eaux de mer (extrait de G. Dietrich [4]).

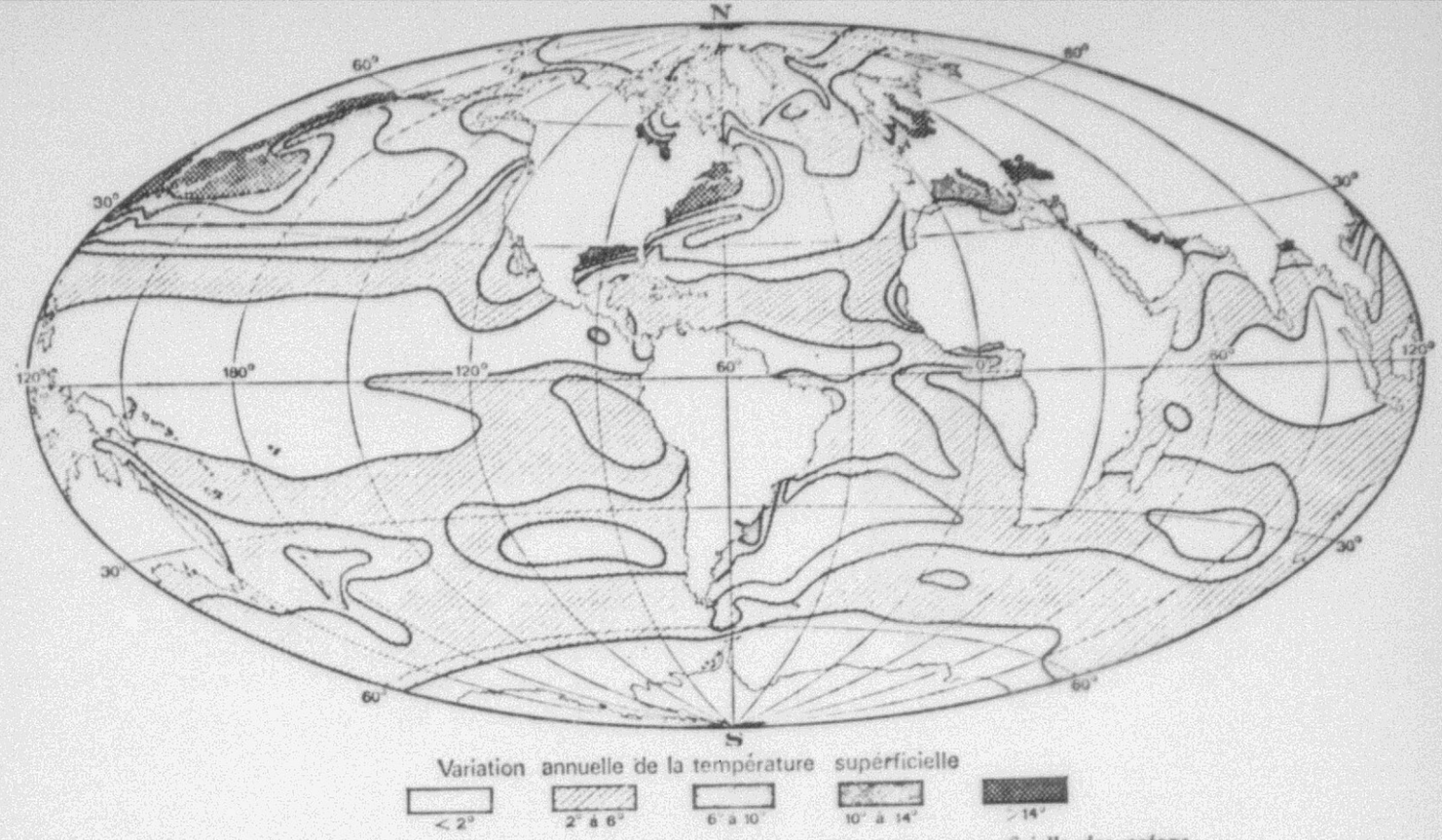


Fig-A — Amplitude de variation annuelle de la température superficielle des océans (d'après G. SCHOTT, 1942; extrait de G. DIETRICH [4]).

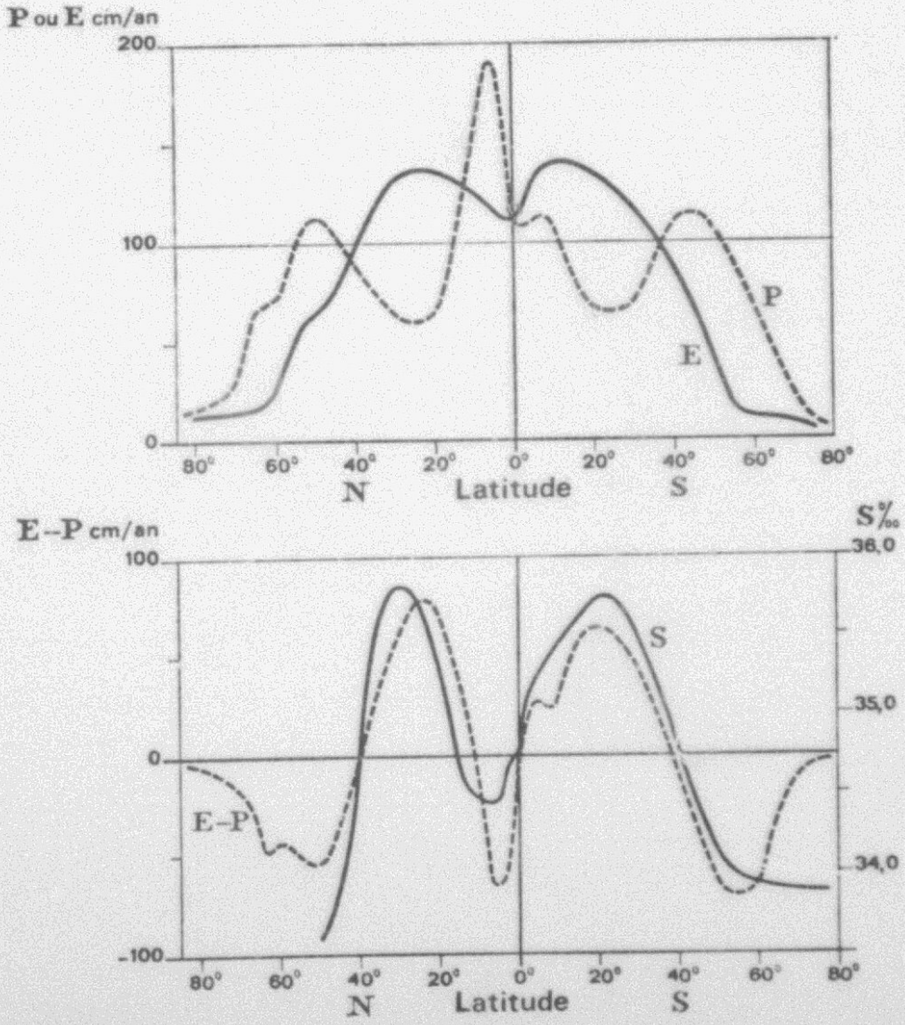
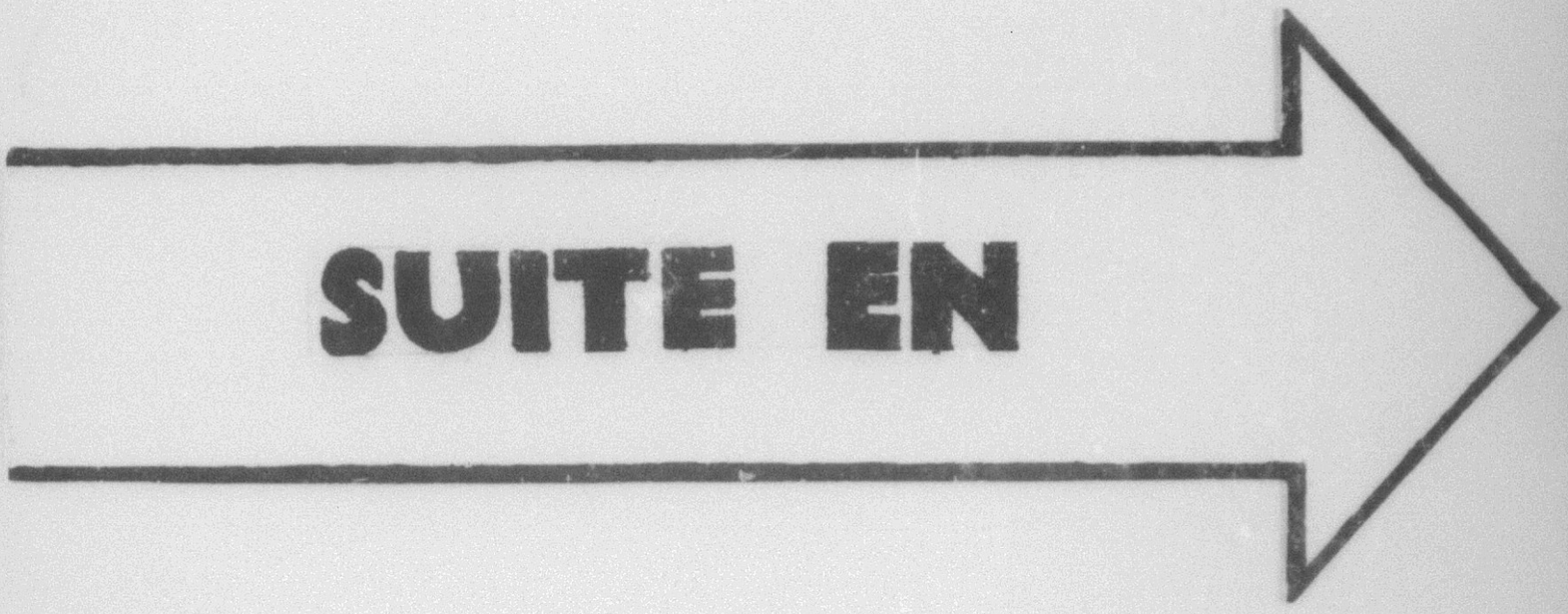


Fig-B — Variations avec la latitude de l'évaporation E, de la précipitation P, de leur différence E — P, et de la salinité de surface S (d'après G. WÜST, 1954).



F 5

MICROFICHE N°

00230

République Tunisienne

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

CENTRE NATIONAL DE

DOCUMENTATION AGRICOLE

TUNIS

الجمهورية التونسية

وزارة الفلاحة

المركز القومي

للتوثيق الفلاحي

تونس

F 5

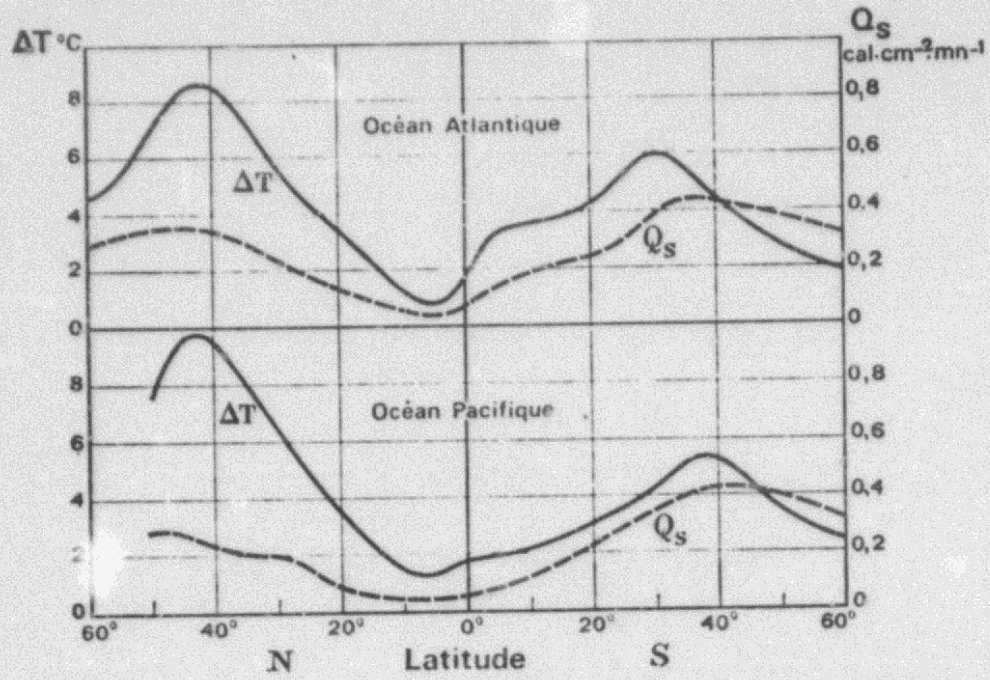


Fig-A — Valeurs comparées, en fonction de la latitude, de l'amplitude de variation ΔT de la température superficielle de l'eau et de l'éclairement Q_s (d'après H. U. SVERDRUP [13], 1948).

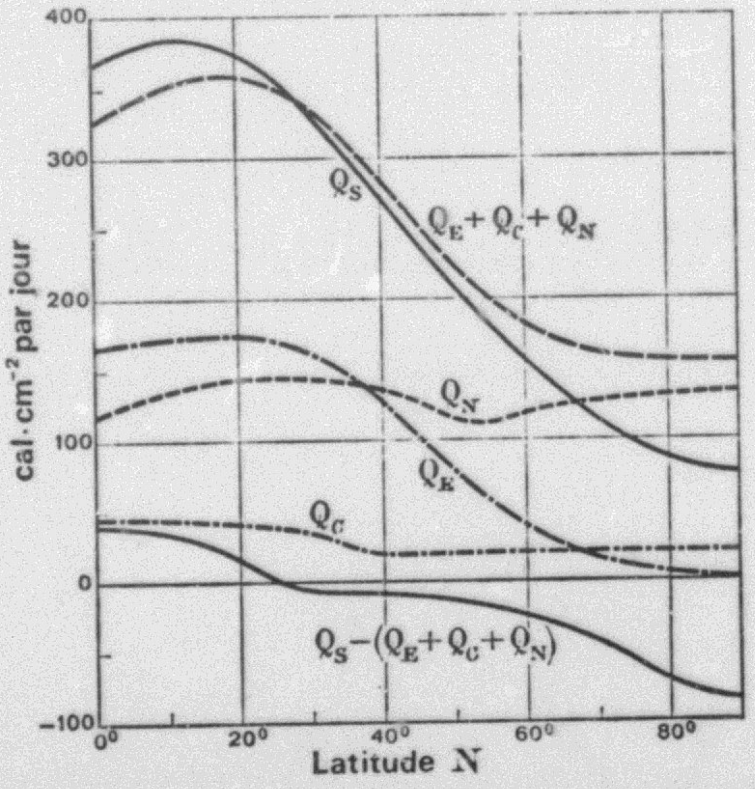


Fig-B — Variations avec la latitude (dans l'hémisphère Nord) de l'éclairement solaire reçu Q_s du rayonnement thermique émis Q_N, des pertes par évaporation Q_L et par convection Q_C (d'après A. DEFANT, 1961, extrait de H. J. MC LELLAN [9]).

Rapport de conductivité R_{15} = rapport de la conductivité d'un échantillon d'eau à celui d'une eau ayant une salinité = 35 °/oo, les deux échantillons étant à t = 15° et sous une pression d'une atmosphère.

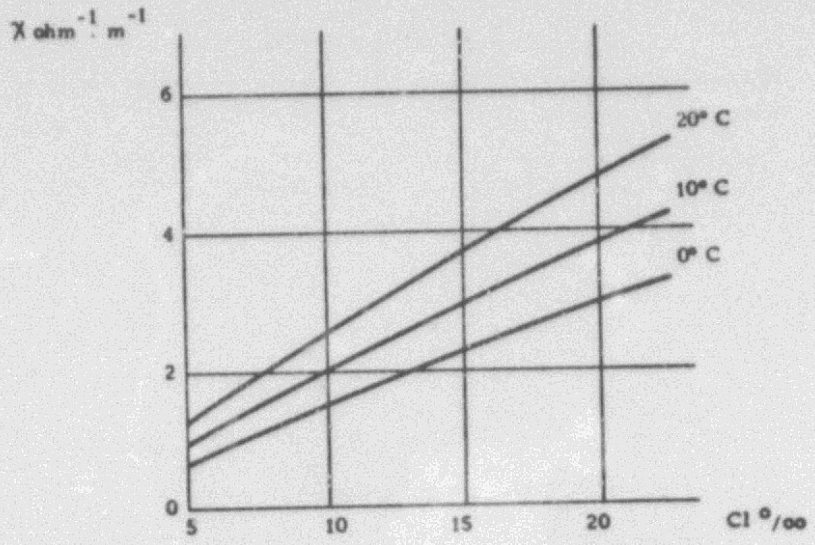
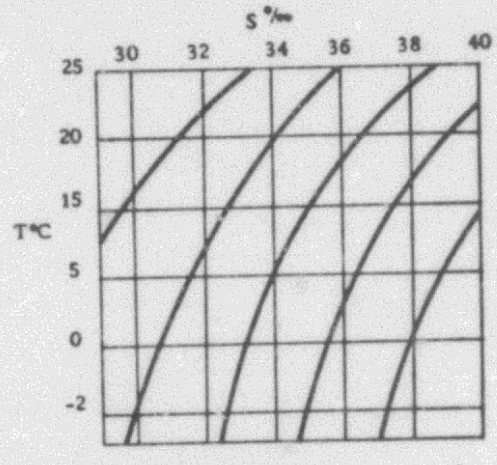


Fig-A VARIATION DE LA CONDUCTIVITE DES EAUX AVEC LA CHLORINITE ET AVEC LA TEMPERATURE



- : isopycnes : courbes d'égale densité,
(les chiffres correspondent à σ
$\sigma_{S,T,P}$ = (densité$_{S,T,P}$ - 1) 1.000

Fig-B VARIATIONS DE LA DENSITE DES EAUX AVEC LA SALINITE (S) ET AVEC LA TEMPERATURE (T) - D'après G. L. PICKARD.

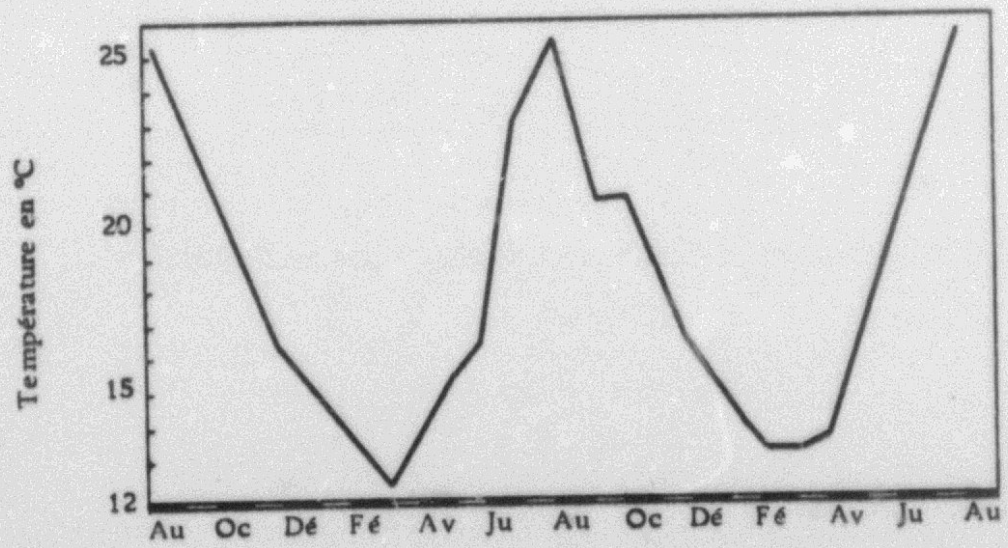
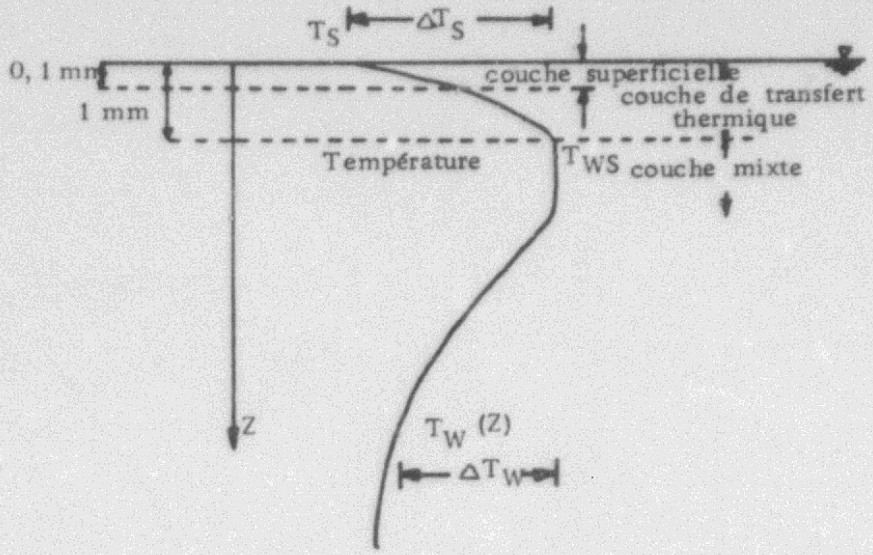
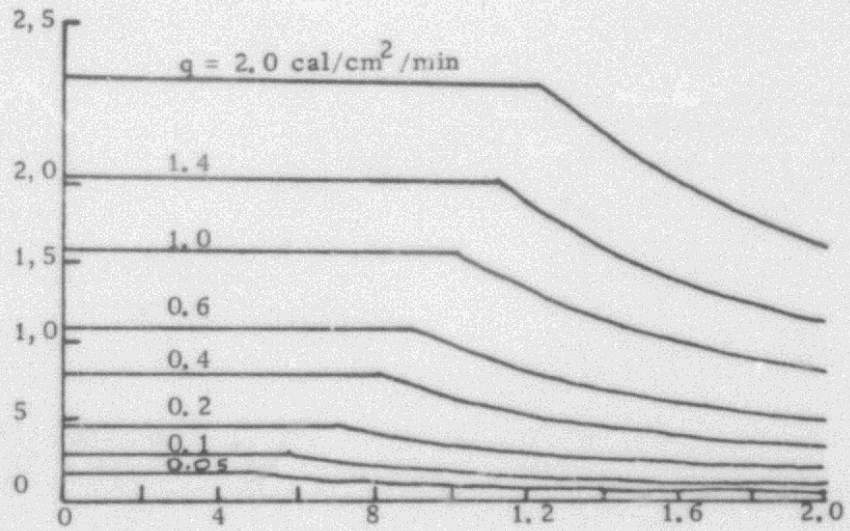


Fig-C - VARIATION DE LA TEMPERATURE SUPERFICIELLE DE L'EAU D'AOUT 1962 A AOUT 1964 ENTRE NICE ET LA CORSE - D'après J. COSTAN (1968)



Structure thermique de l'eau



Variation de température de surface de l'eau en fonction de la vitesse du vent.

PLANCHE VII

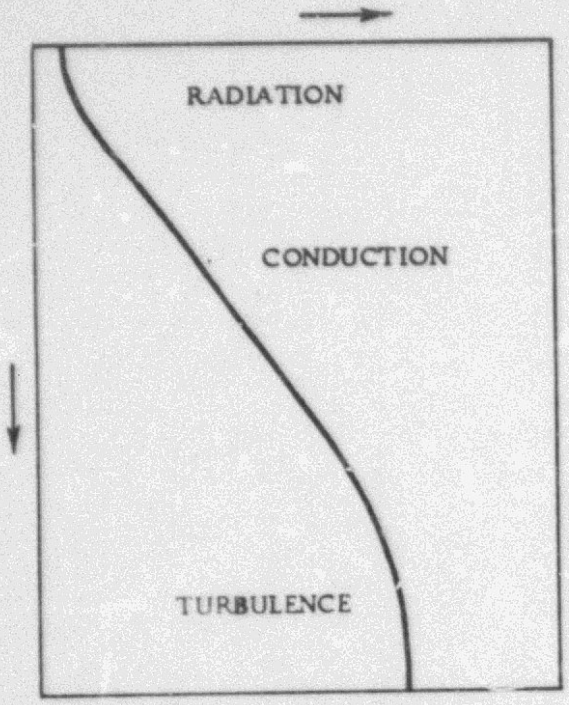


Fig-A - REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROFIL DE TEMPERATURE DE L'EAU DE MER EN-DESSOUS DE LA SURFACE (d'après E.D. Mc Alister et Mc Leish, 1969).

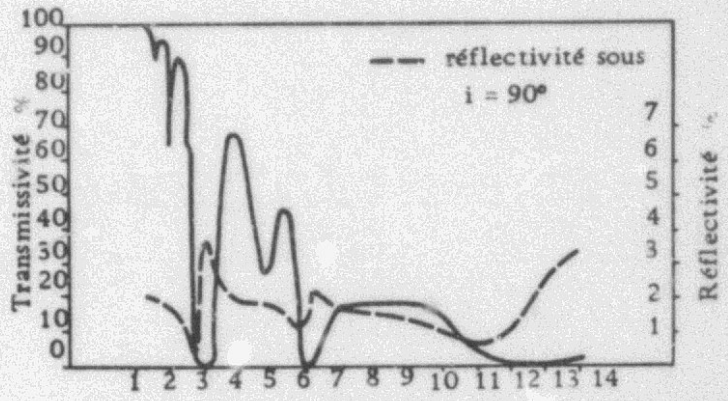


Fig-B - TRANSMISSIVITE DE 0,003 cm D'EAU ET REFLECTIVITE D'UNE SURFACE D'EAU LIBRE. (d'après E.D. Mc Alister, 1964)

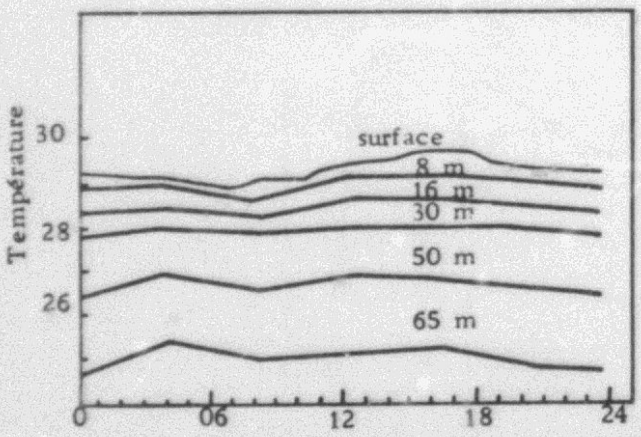


Fig-C - VARIATIONS DIURNES DE LA TEMPERATURE A DIFFERENTES PROFONDEURS SOUS LA SURFACE OCEANIQUE.

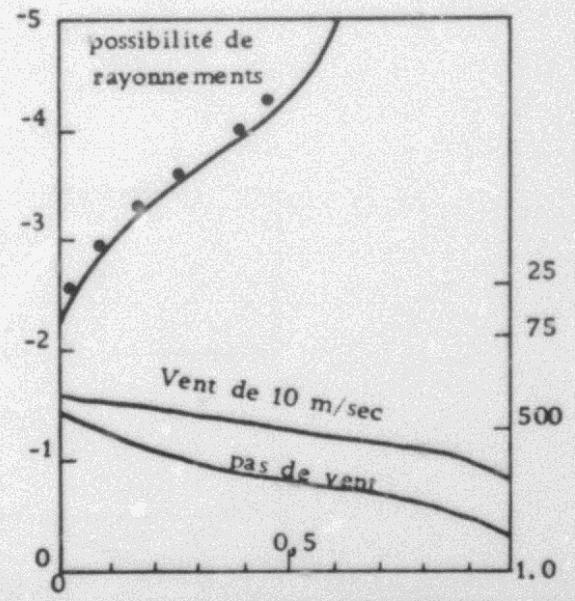


Fig D - MECANISME DES TRANSFERTS THERMIQUES VERS LA SURFACE DE L'EAU, A DIFFERENTES PROFONDEURS.
(d'après Mc Alister et Mc Leish, 1969).

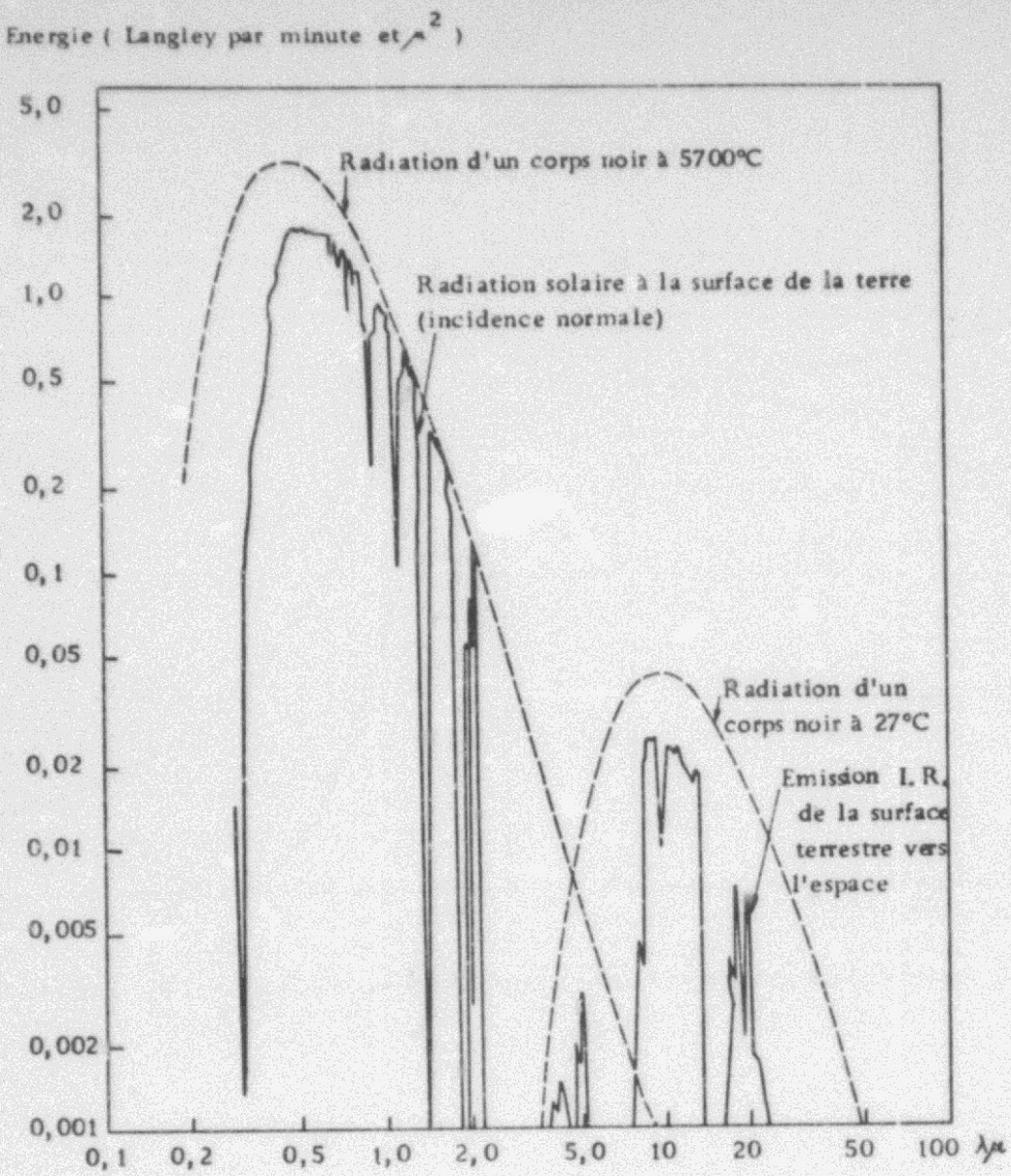


Fig-A SPECTRES DES RAYONNEMENTS SOLAIRE ET TERRESTRE A LA SURFACE DE LA TERRE - D'après H. Flohn, 1968.

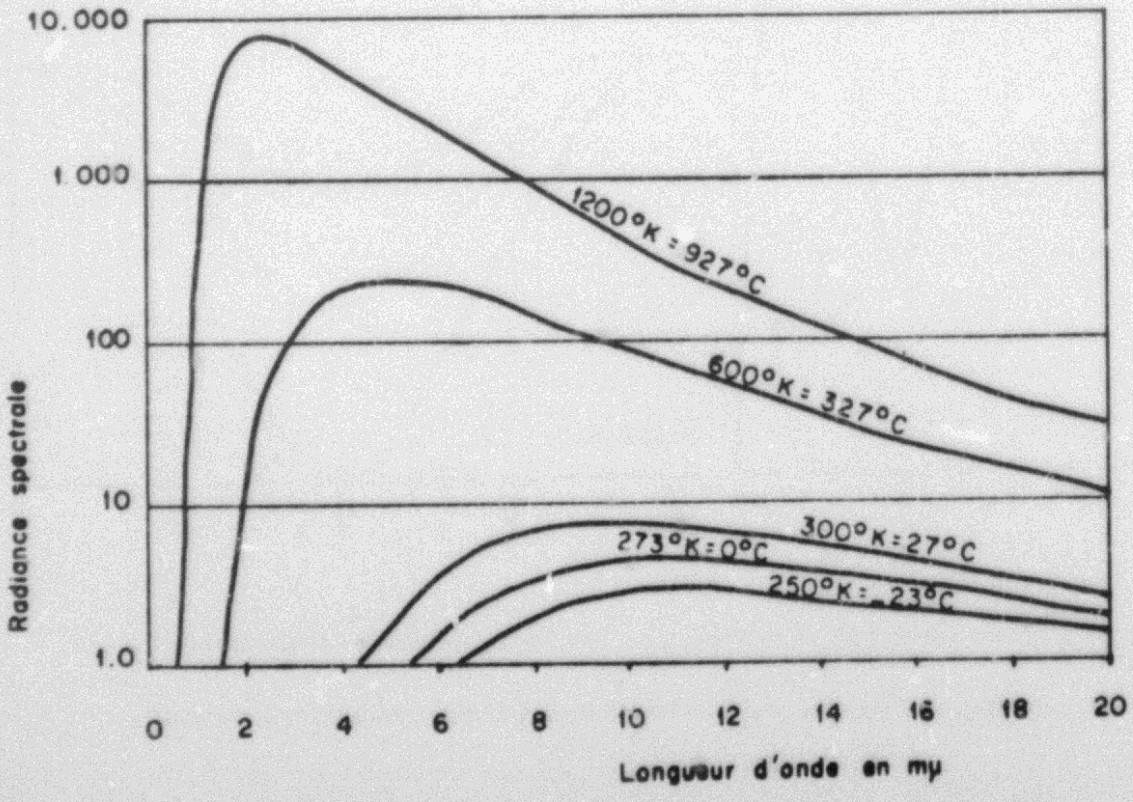


Fig B RAYONNEMENT DU CORPS NOIR.

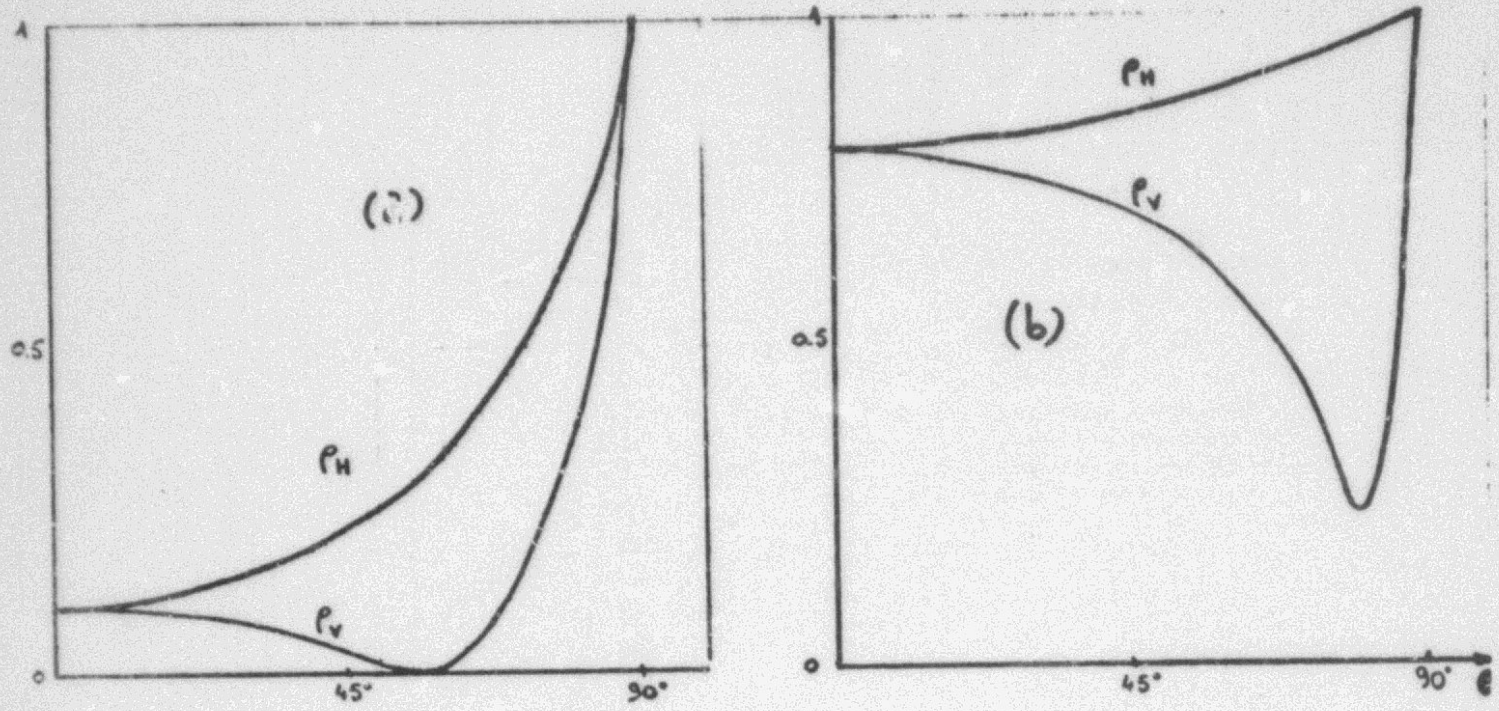


Fig A variation de la reflectivité selon l'incidence pour les deux polarisations horizontale et verticale

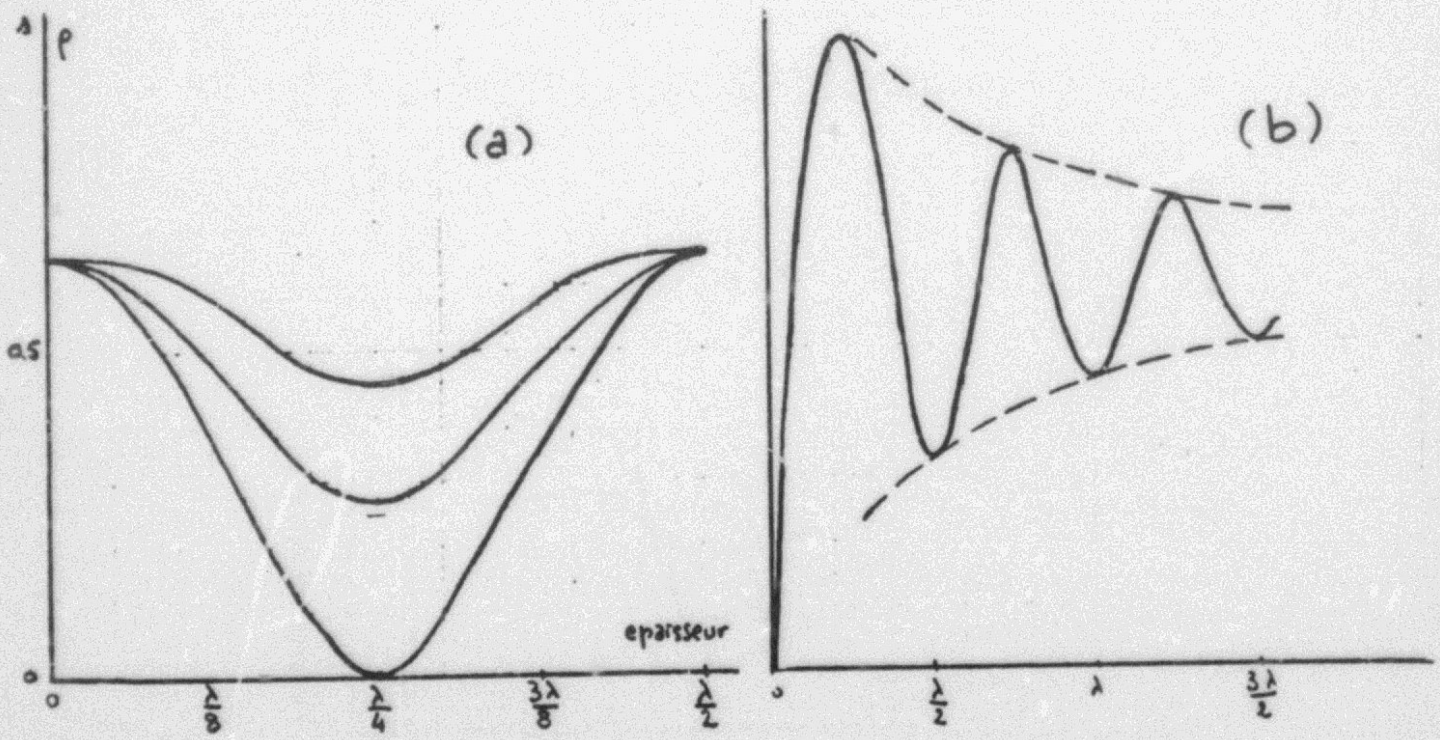
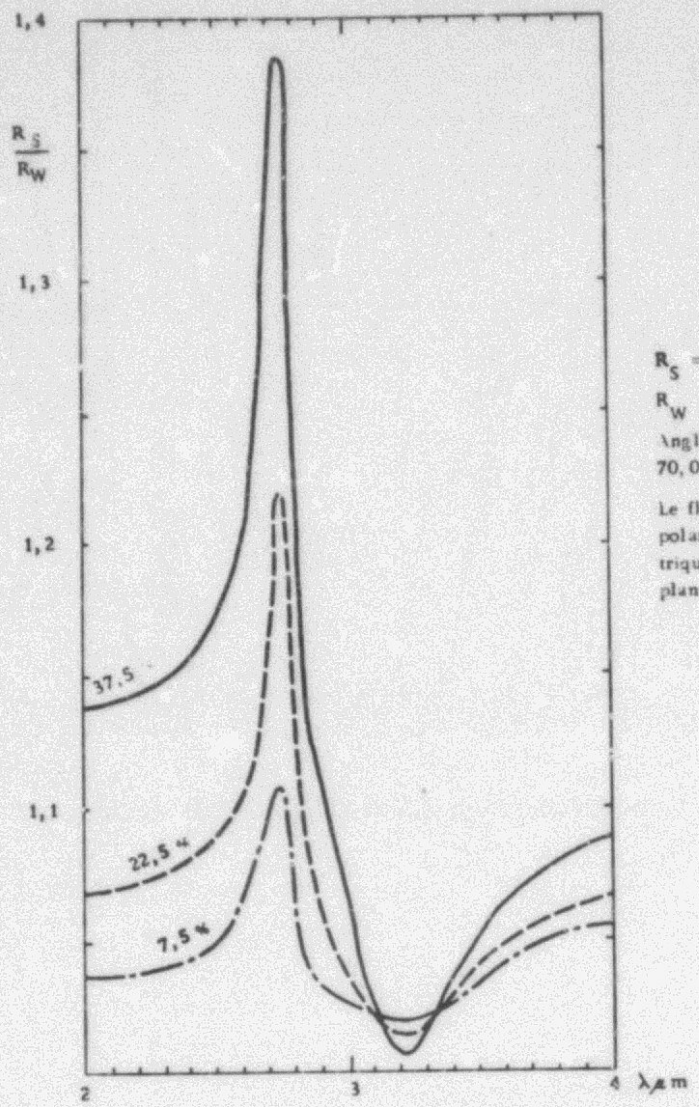


Fig B Variation de la reflectivité d'une lame en fonction de l'epaisseur comptée en nombre de longueur d'onde dans le milieu pour un diélectrique ou pour un conducteur.



R_S = Réflectance de la solution

R_W = Réflectance de l'eau pure

Angle d'incidence utilisé : $70,03° \pm 0,23°$

Le flux radiactif utilisé était polarisé, le vecteur champ électrique étant perpendiculaire au plan d'incidence.

Fig-A - REFLECTANCE SPECULAIRE RELATIVE DE SOLUTIONS A 7,5, 22,5 ET 37,5 DE NaCL DANS LA BANDE DES 2-4 µm. D'après QUERRY.

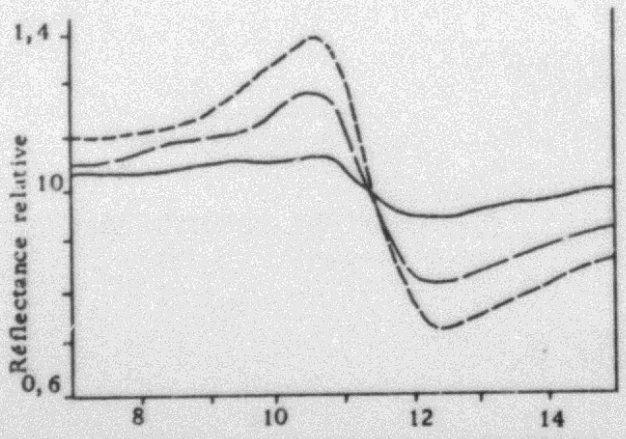


Fig-B - REFLECTANCE SPECULAIRE RELATIVE DE SOLUTIONS AQUEUSES A 7,5, 22,5 et 37,5 de Na Cl DANS LA BANDE DES 7-15 µm
(d'après QUERRY et alii, 1972).

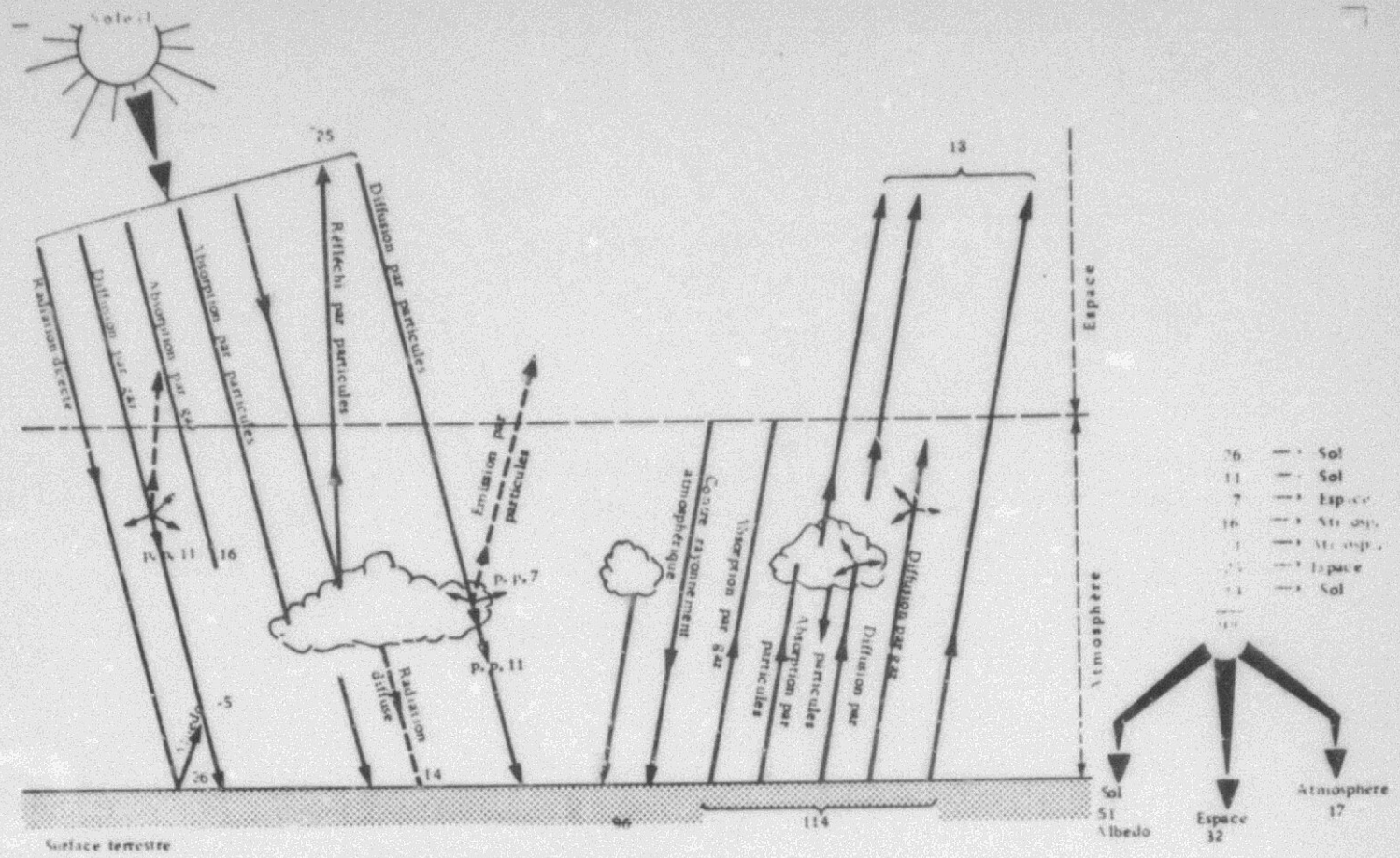
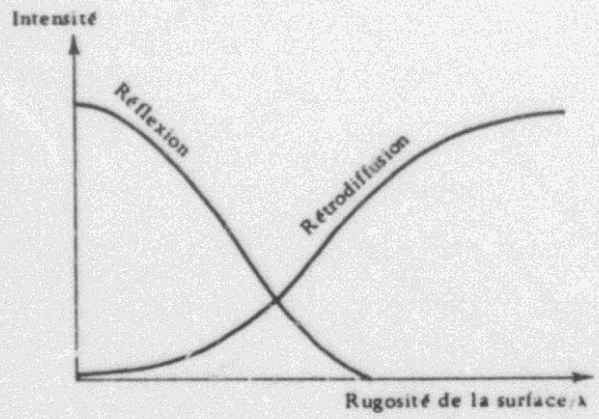


Fig-A RAYONNEMENTS PERTURBATIONS INTRODUITES PAR L'ATMOSPHERE - D'après ALLOUGES et TESSIER (1969)



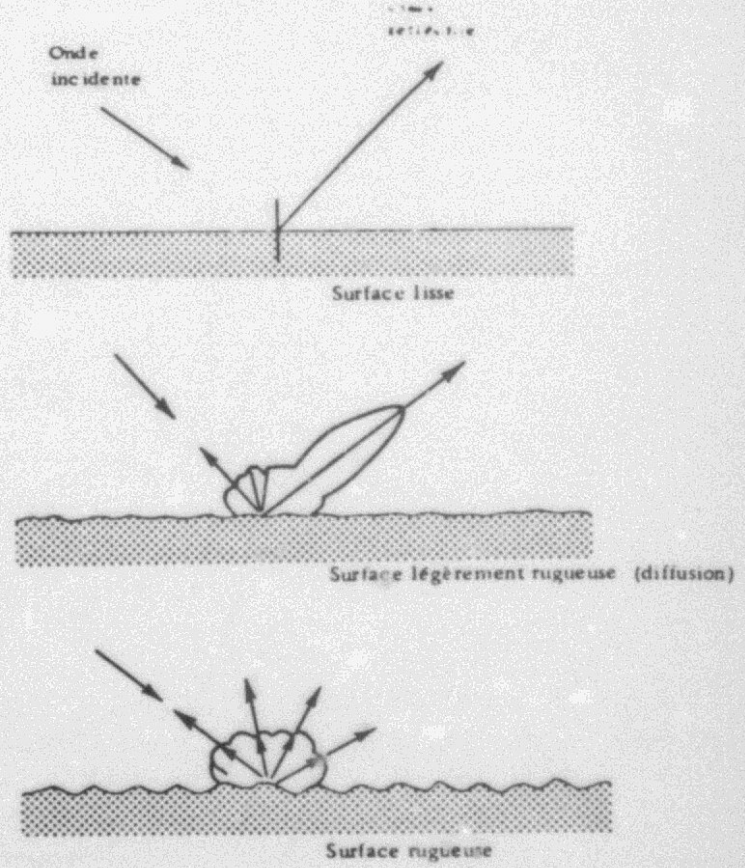


Fig-B REFLEXION A PARTIR DES SURFACES ET PHENOMENES DE DIFFUSION

PLANCHE XI

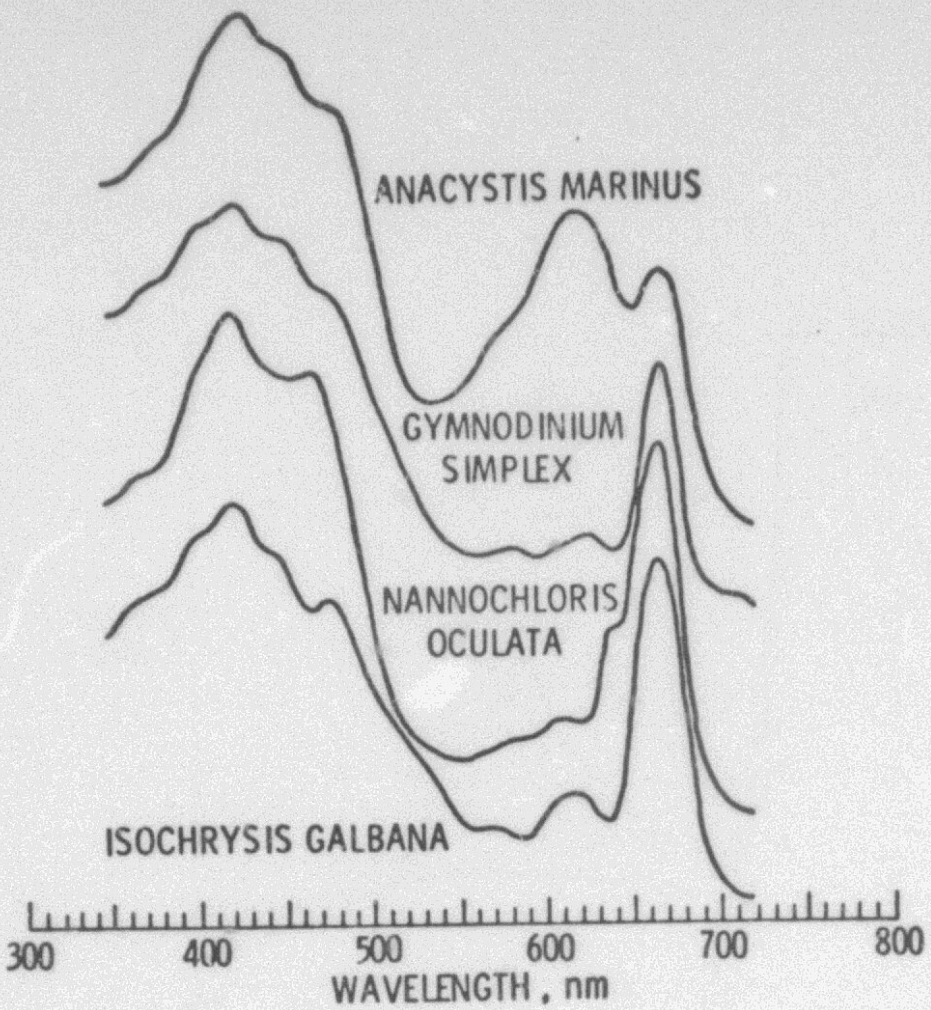


Fig-A

Signatures spectrales du Phytoplancton.

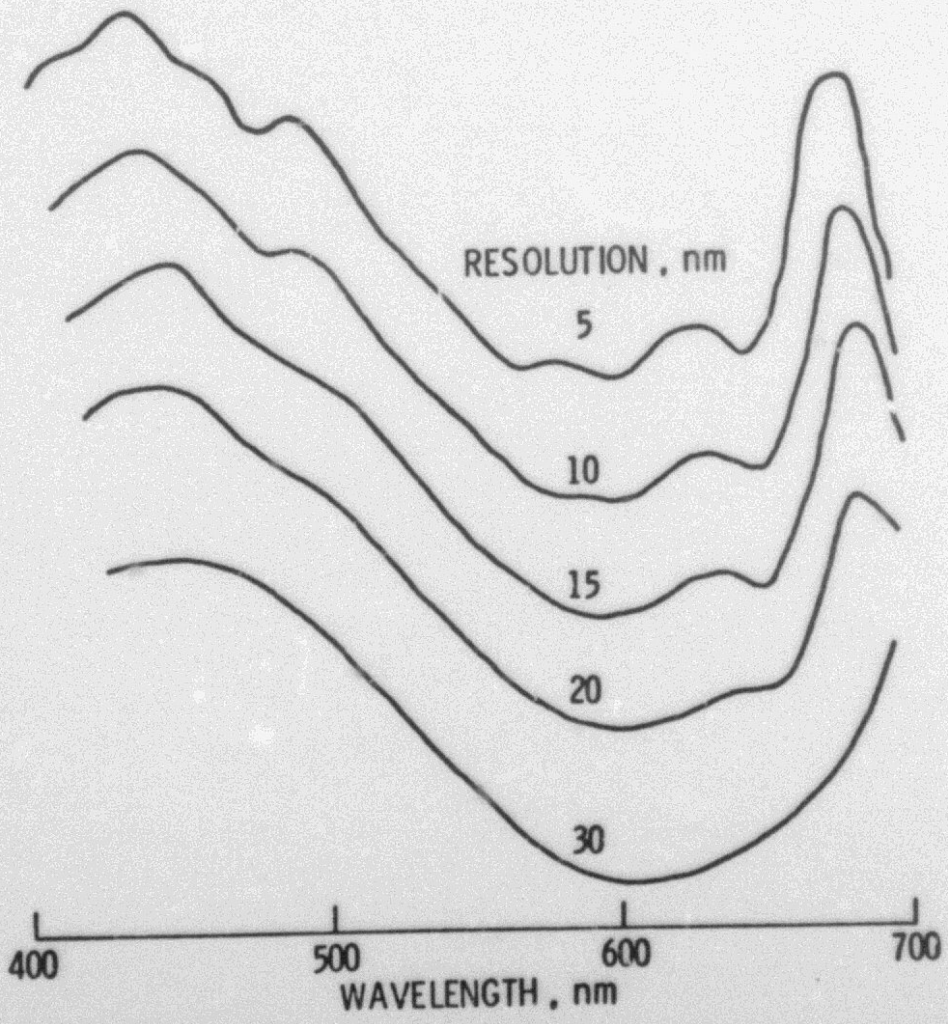


Fig-B

Dégradation de la signature avec l'augmentation de la largeur de la bande spectrale du senseur.

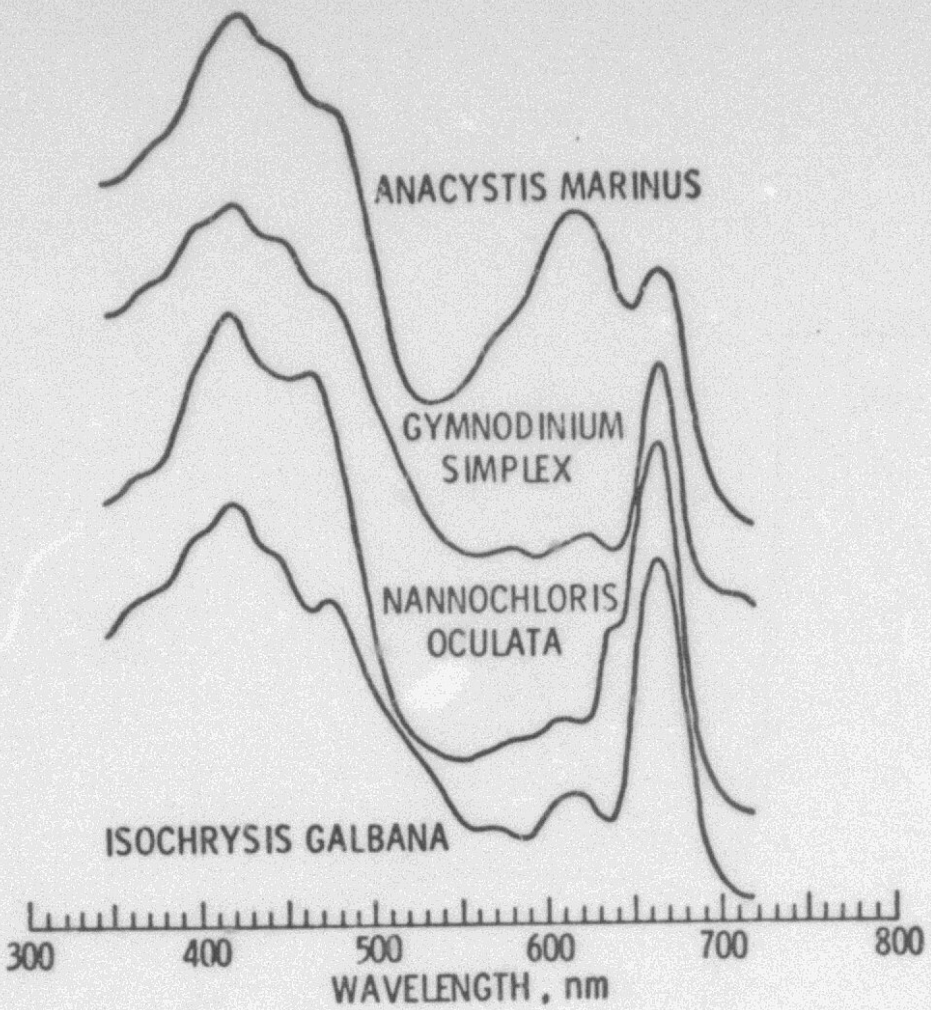


Fig-A

Signatures spectrales du Phytoplancton.

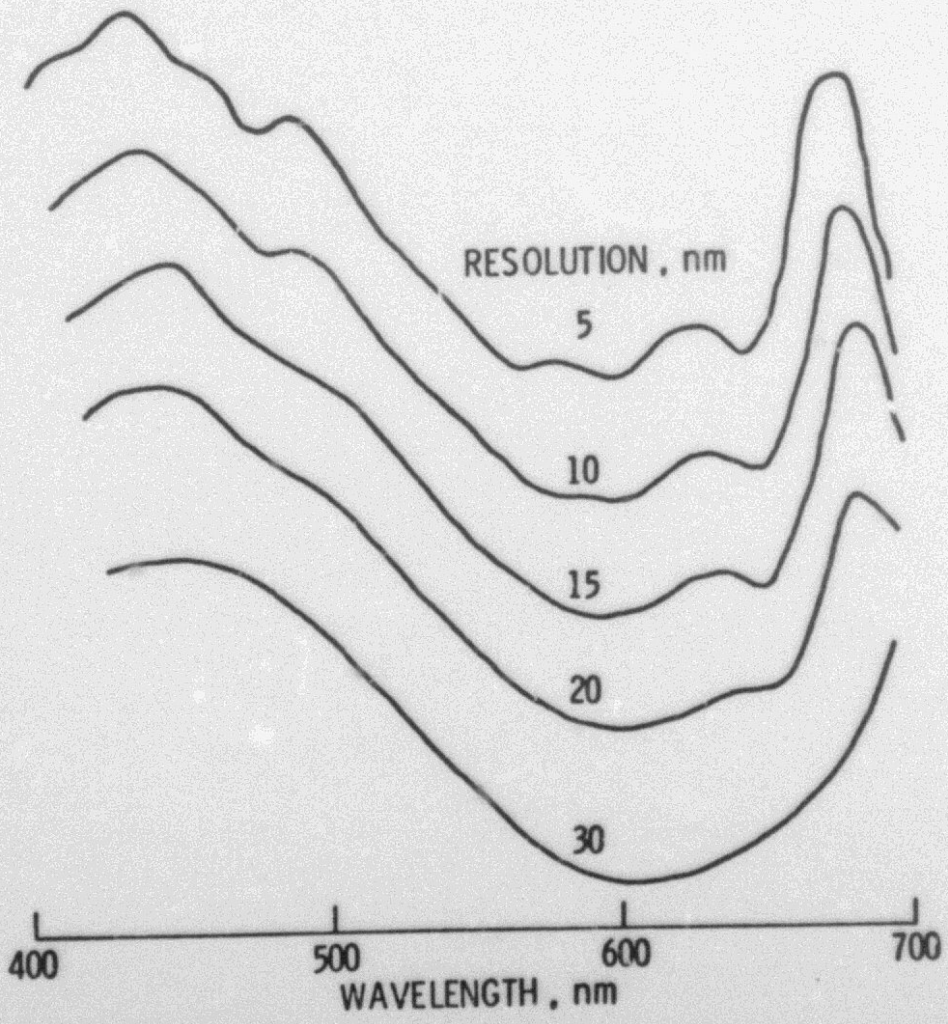
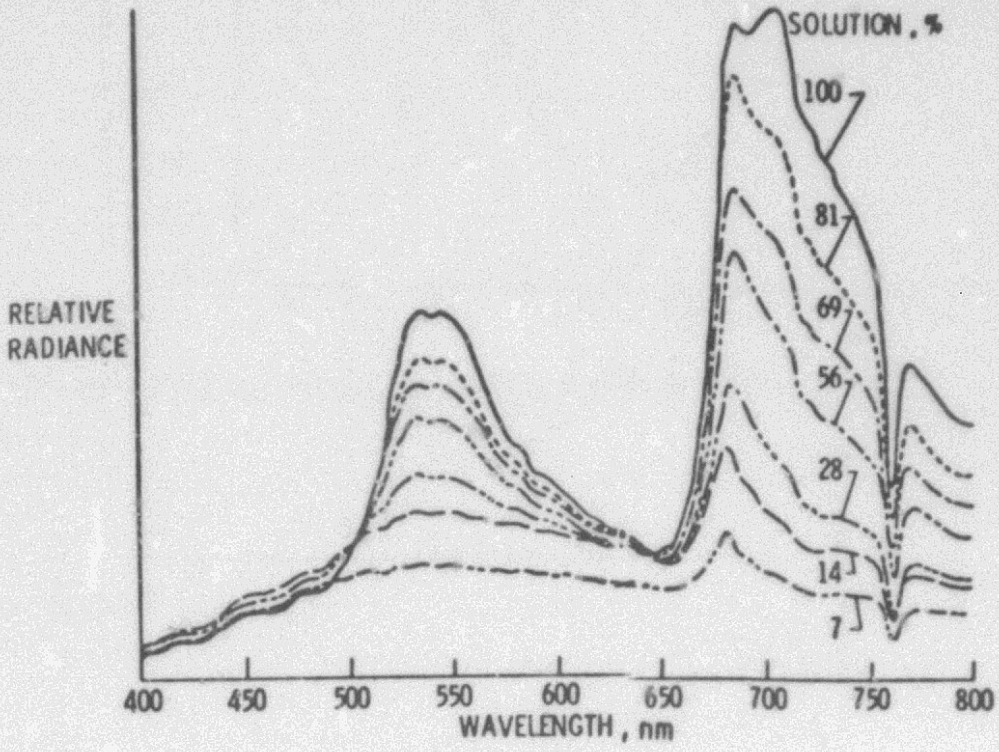


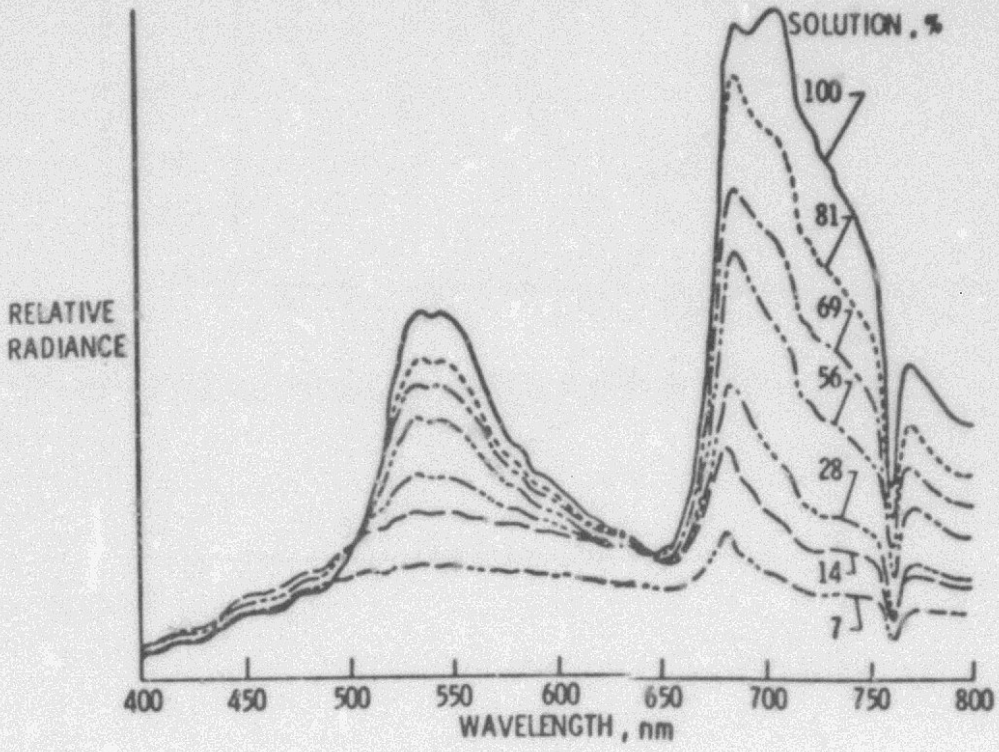
Fig-B

Dégradation de la signature avec l'augmentation de la largeur de la bande spectrale du senseur.



Evolution de la signature spectrale du phytoplancton en fonction de la dilution

PLANCHE XIII



Evolution de la signature spectrale du phytoplancton en fonction de la dilution

PLANCHE XIII

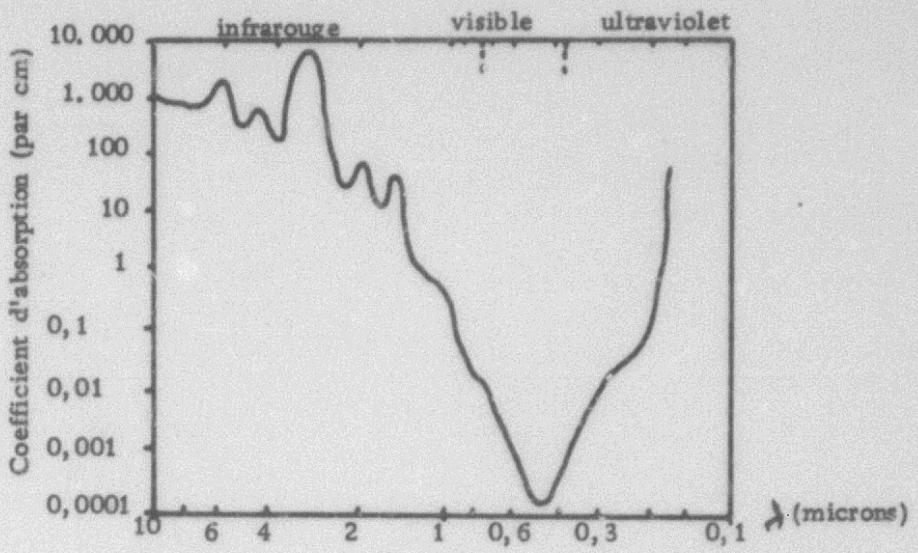


Fig. A - Absorption par l'eau de mer (BRACKETT, Mc GRAW HILL in WHOI)

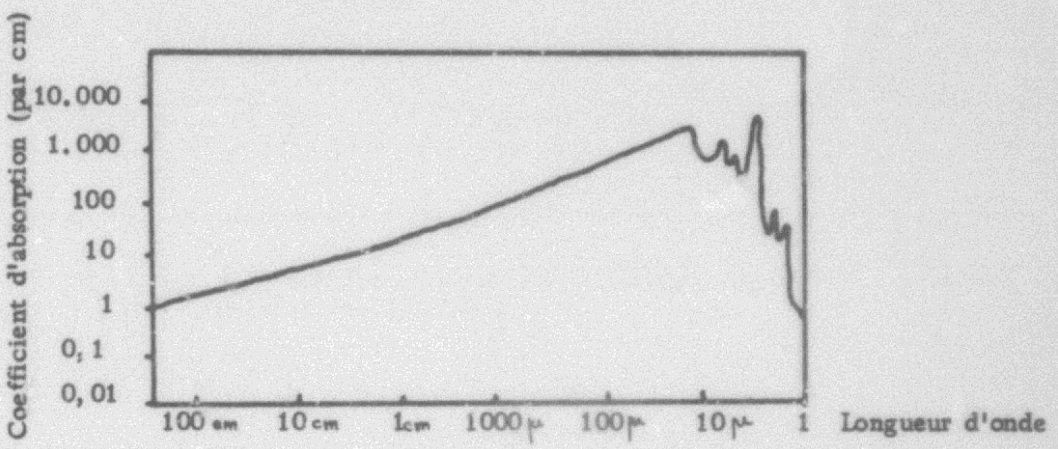


Fig. B - Absorption par l'eau de mer (Mc ALISHER, Mc LEISH WHOI)

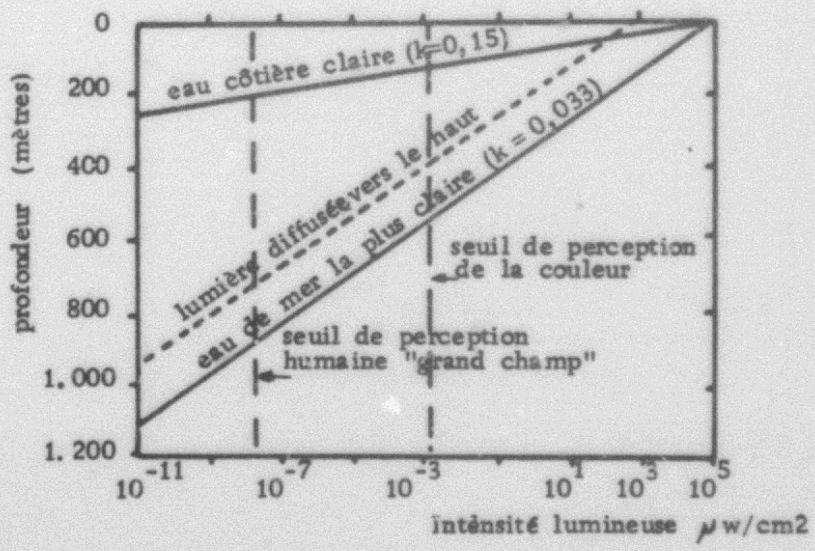


Fig. C - Pénétration de la lumière dans l'eau de mer (G. CLARKE WHOI).

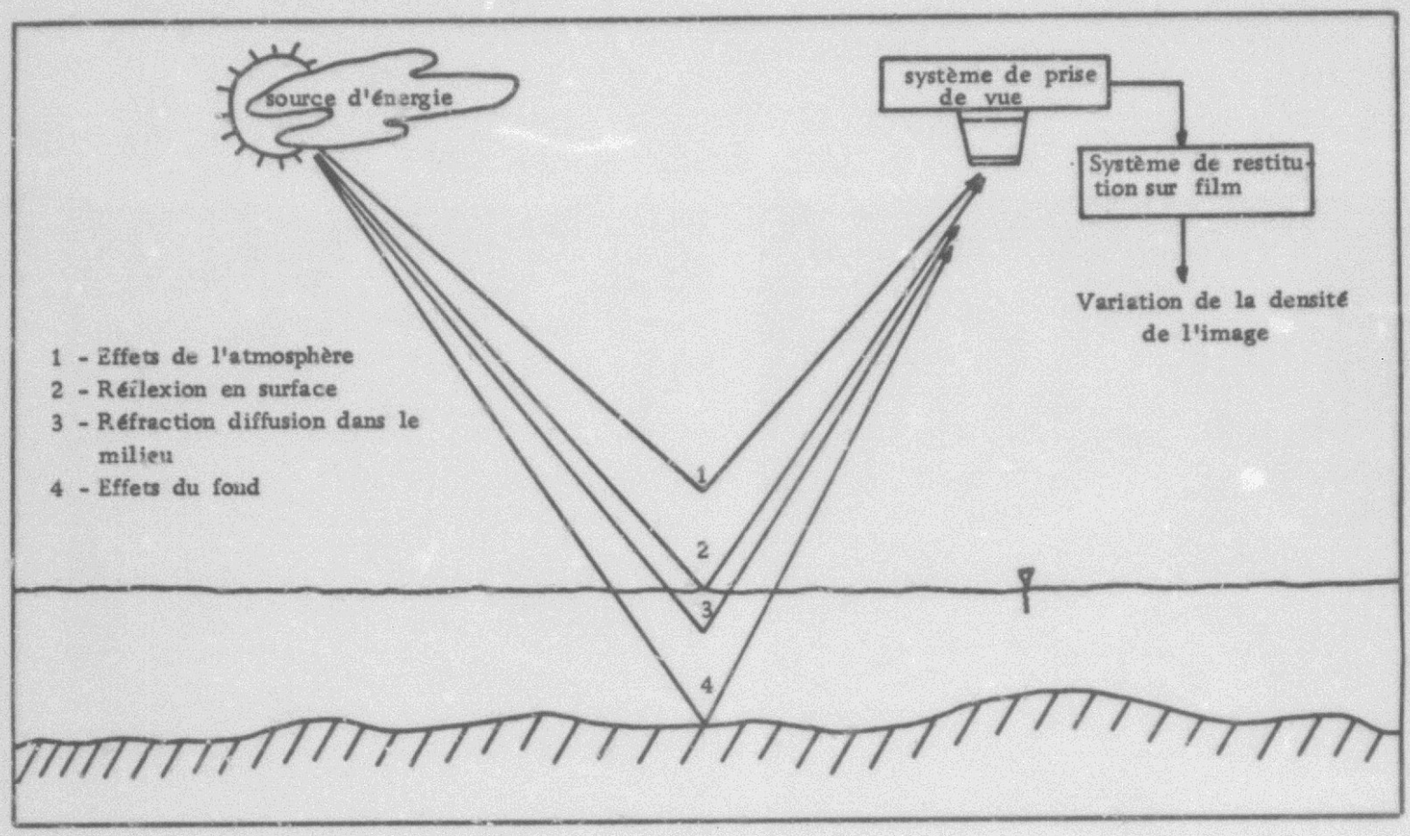


Fig. A - Exemple de profil typique de flux d'énergie dans un système de contrôle de la qualité des eaux par photographie aérienne, (d'après LILLESAND et STEVENS)

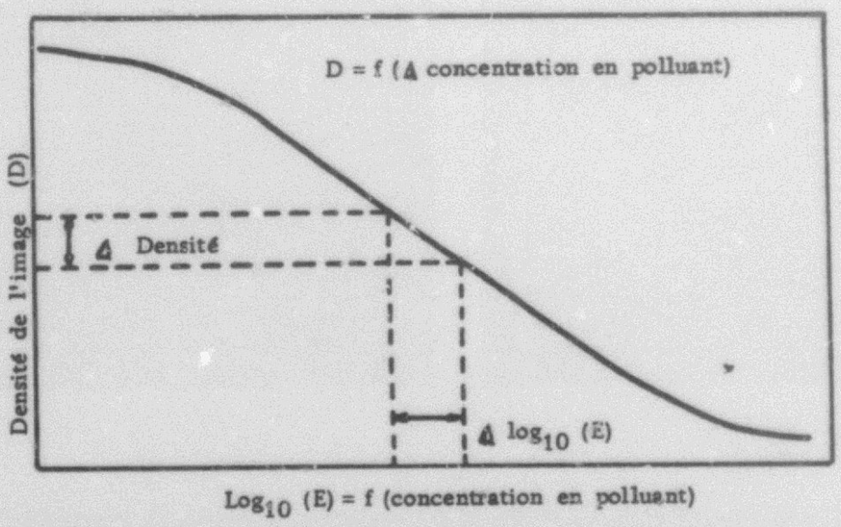
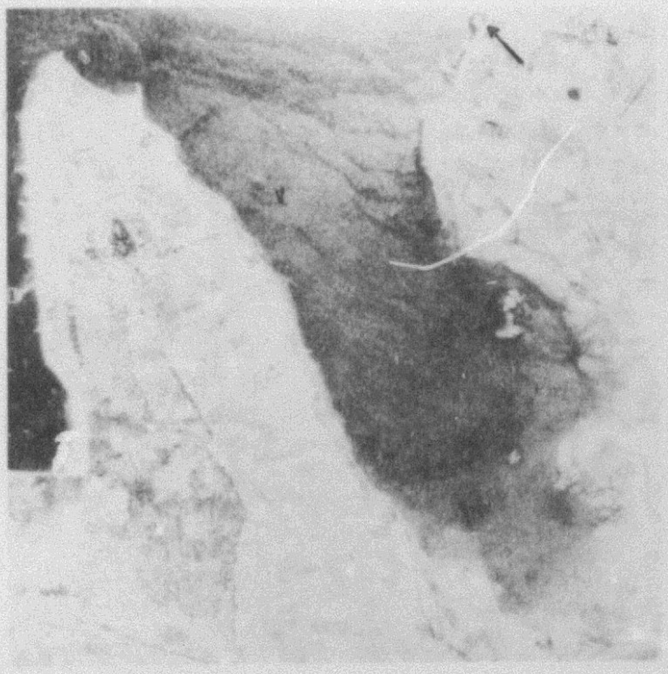


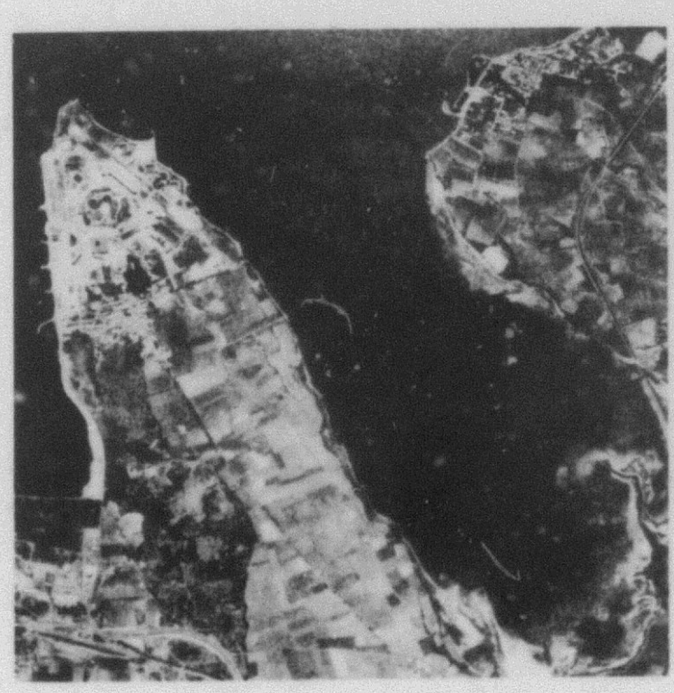
Fig. B - Principe de relation entre la concentration d'un polluant et la densité optique d'une émulsion, (d'après LILLESAND et STEVENS).

C bis

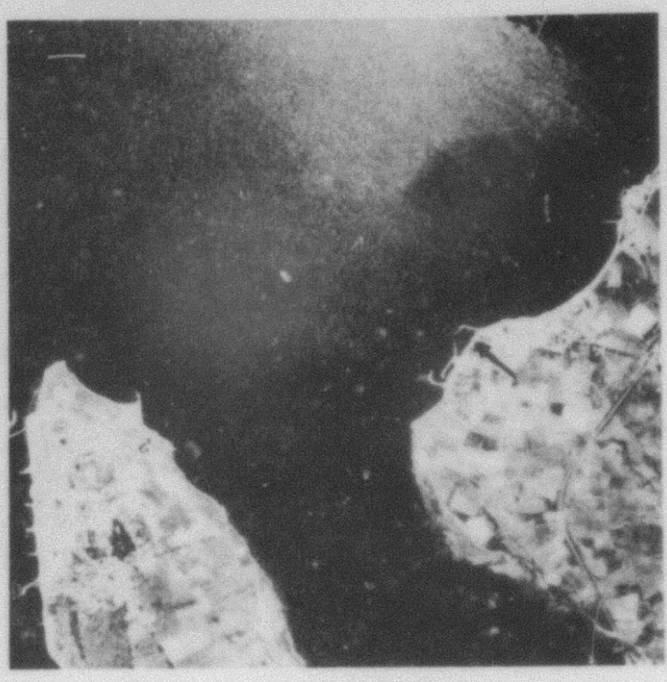


A





C



B

Combinaison de réflexion spéculaire et réflexion sur couches minces mettant en évidence un rejet d'eaux usées dans le port de Bouzigues.

PLANCHE XVI

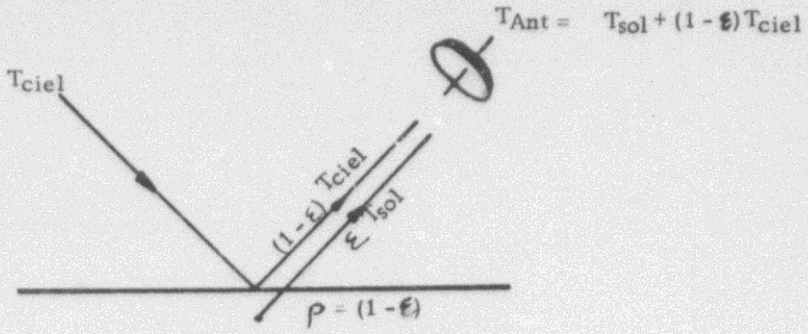


Fig. A - Origine de la température apparente mesurée par l'antenne. On a négligé l'émission atmosphérique réfléchie par le sol ou reçue directement.

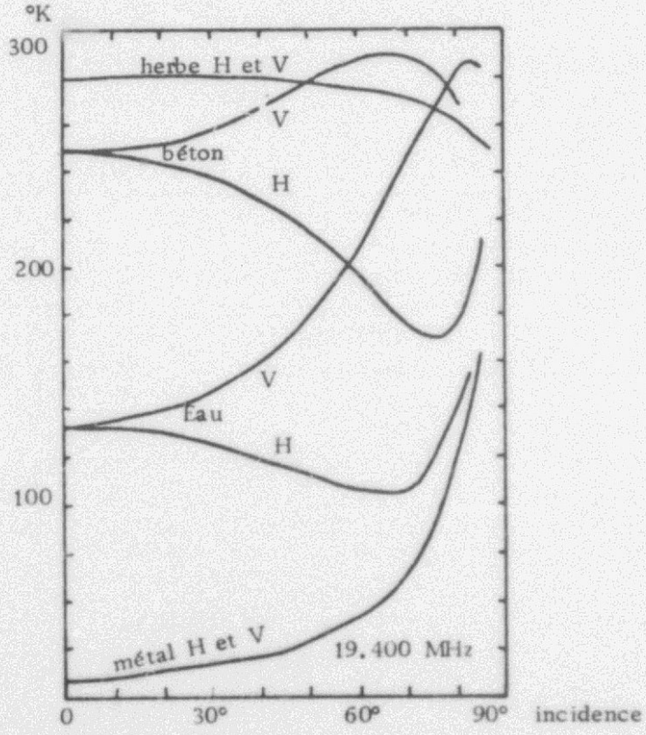


Fig. B - Température apparente de différents matériaux en fonction de l'angle d'observation et de la polarisation (Horizontale, Verticale) d'après FALCO JOHNSON.

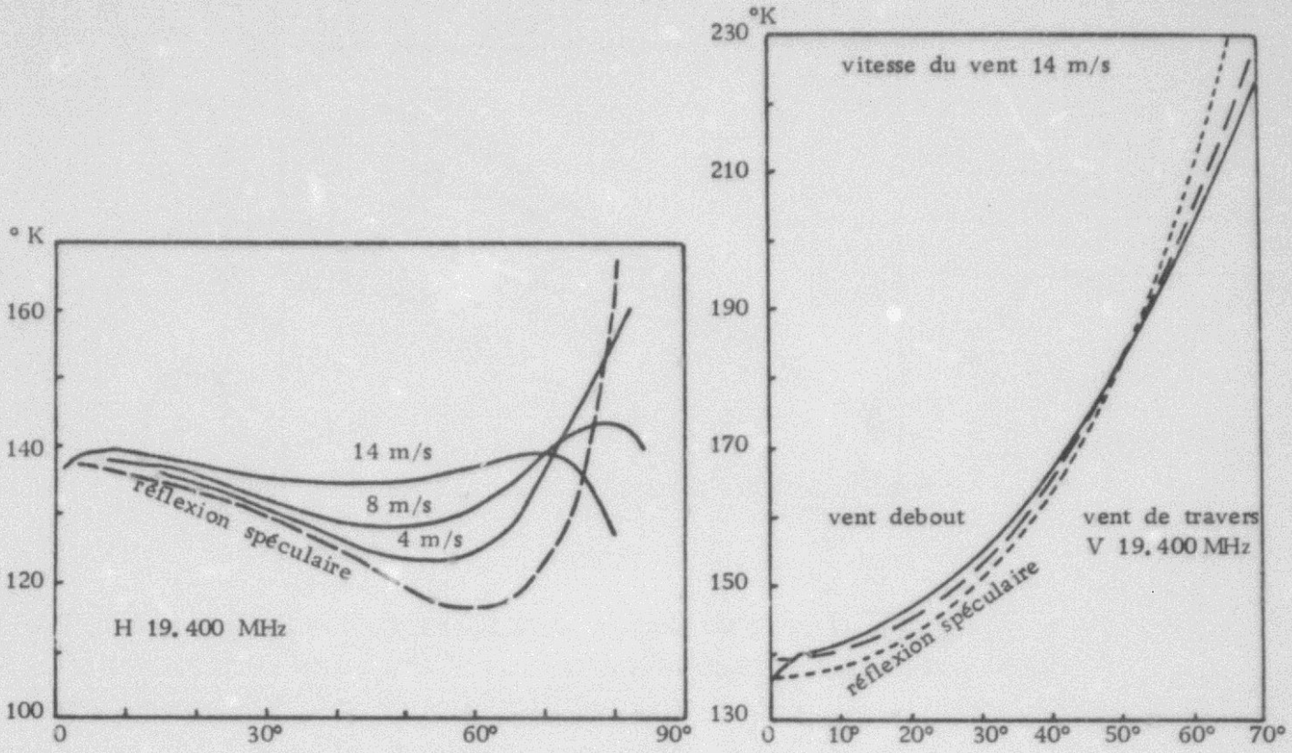


Fig. A - Influence de l'état de la mer sur la température apparente. FALCO, JOHNSON, 1968.

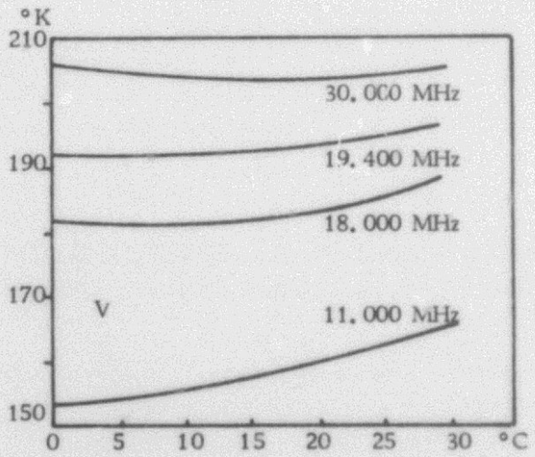


Fig. B - Influence de la température thermométrique sur la température apparente. FALCO, JOHNSON, 1968

RADIOMETRIE HYPERFREQUENCE

PLANCHE XVIII

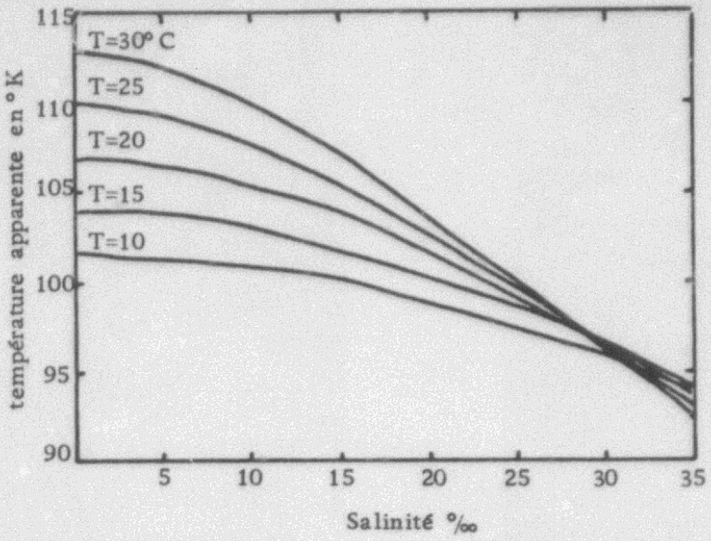


Fig. A - Température apparente de la surface de la mer en fonction de la salinité et de la température réelle pour λ = 21,1 cm, un angle d'incidence de 9,3° et une polarisation verticale (d'après C. THOMANN, 1973).

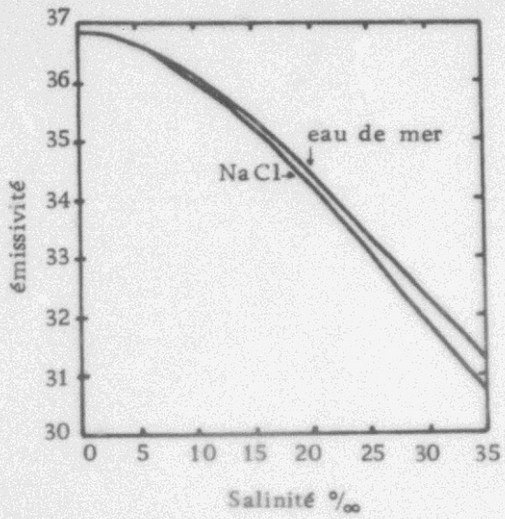


Fig. B - Comparaison entre l'émissivité de l'eau de mer et celle d'une solution pure de ClNa à diverses concentrations pour une température de 25°C pour λ = 21,1 cm et un angle d'incidence de 9,3° (d'après C. THOMANN, 1973).

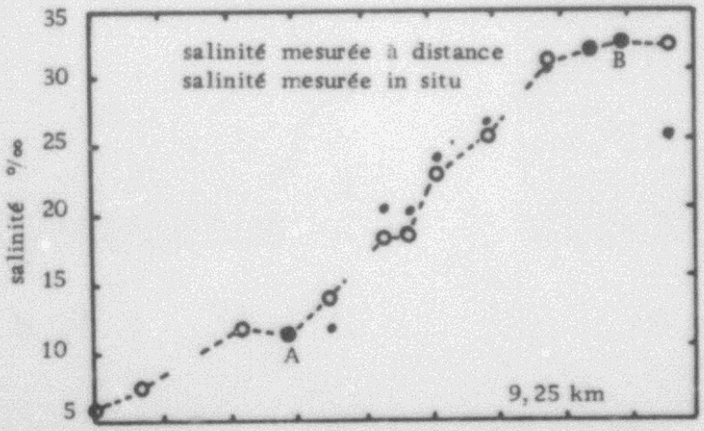
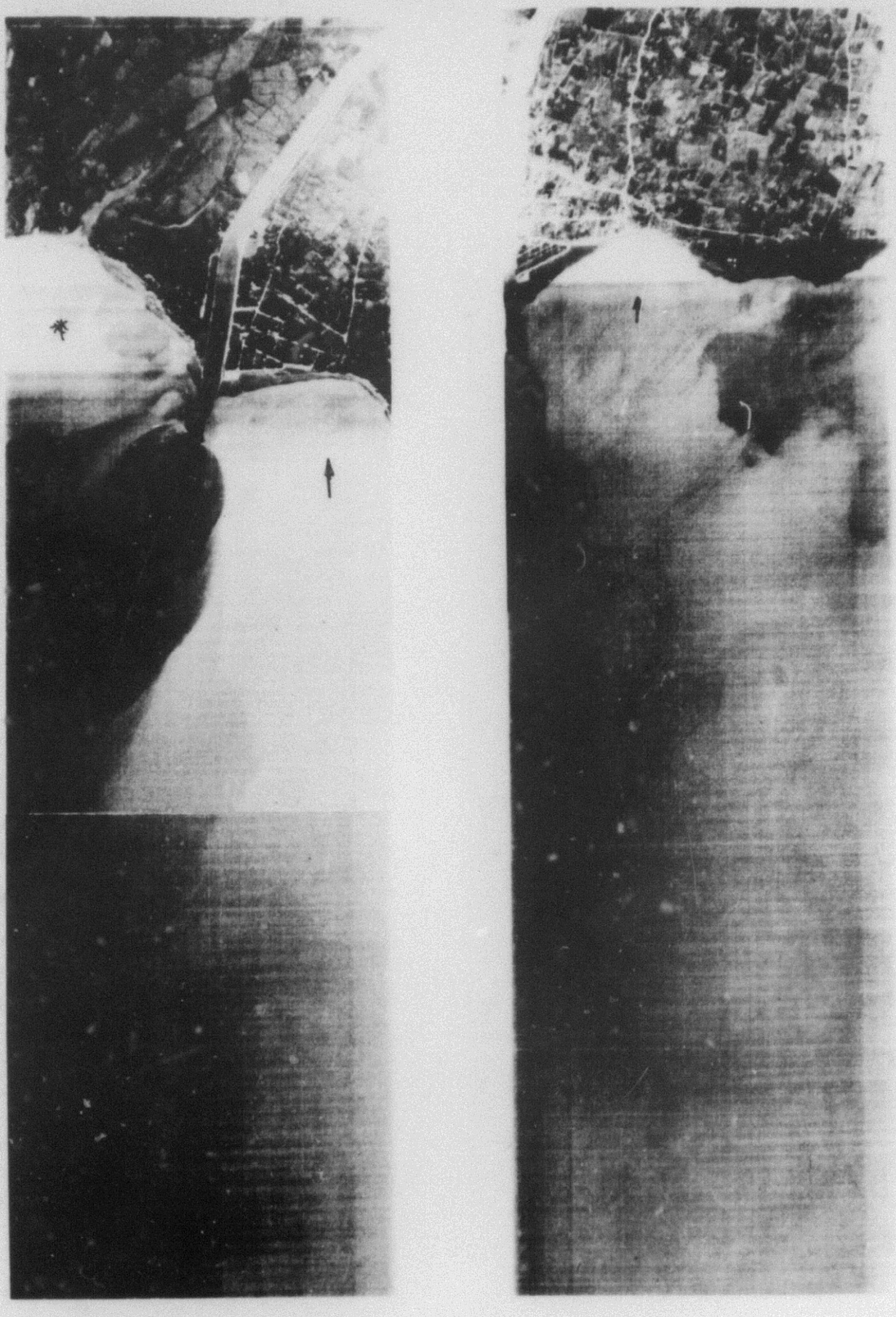


Fig. C - Comparaison de mesures de salinité à distance et in situ obtenues sur le Mississipi (C. THOMANN, 1971)



B 65 16.11.72 B 66

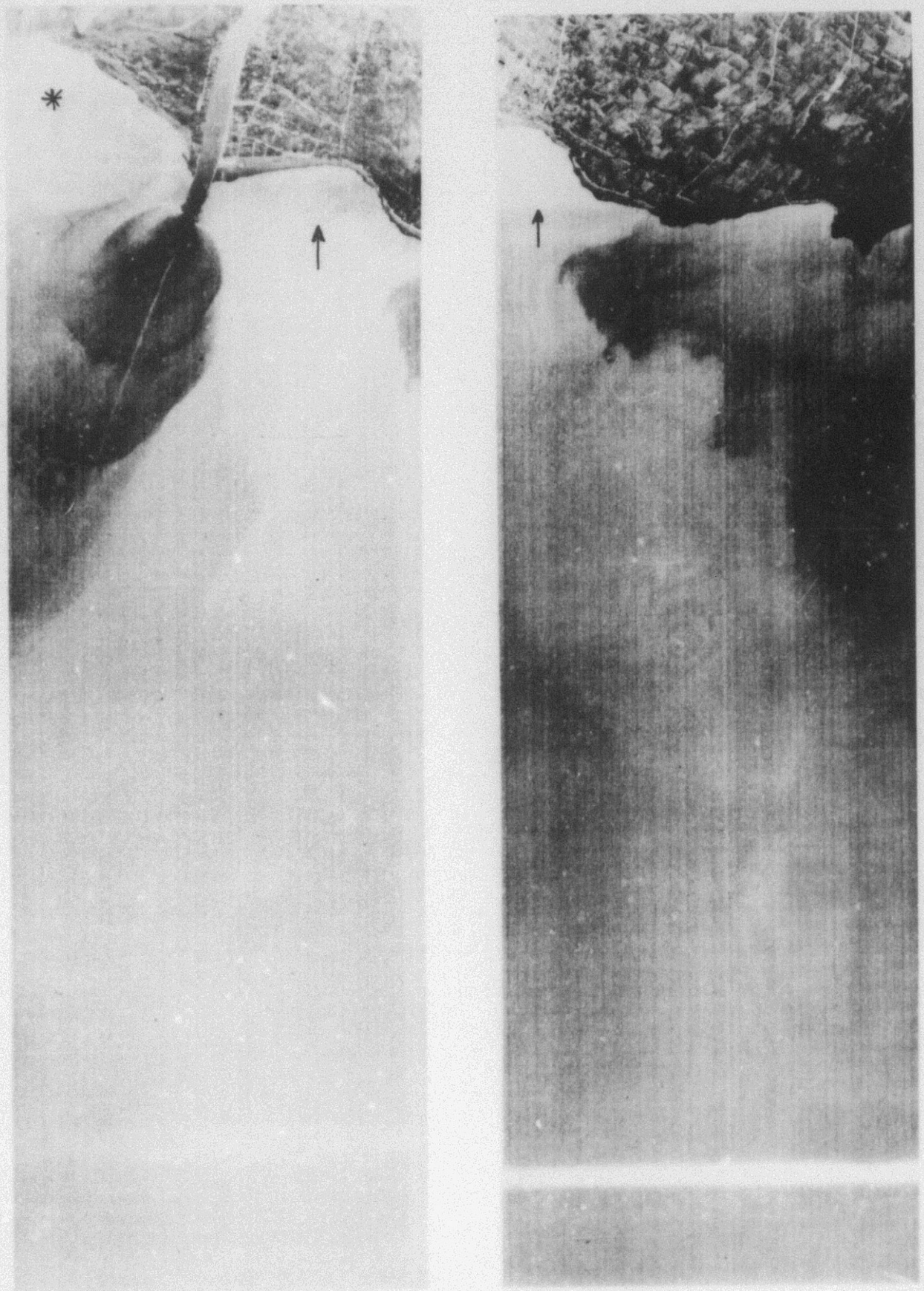
CYCLOPE

PLANCHE XX

Effets du CAG pouvant conduire à des erreurs d'interprétation. (cf. Pl. XXI)

16h30

17h



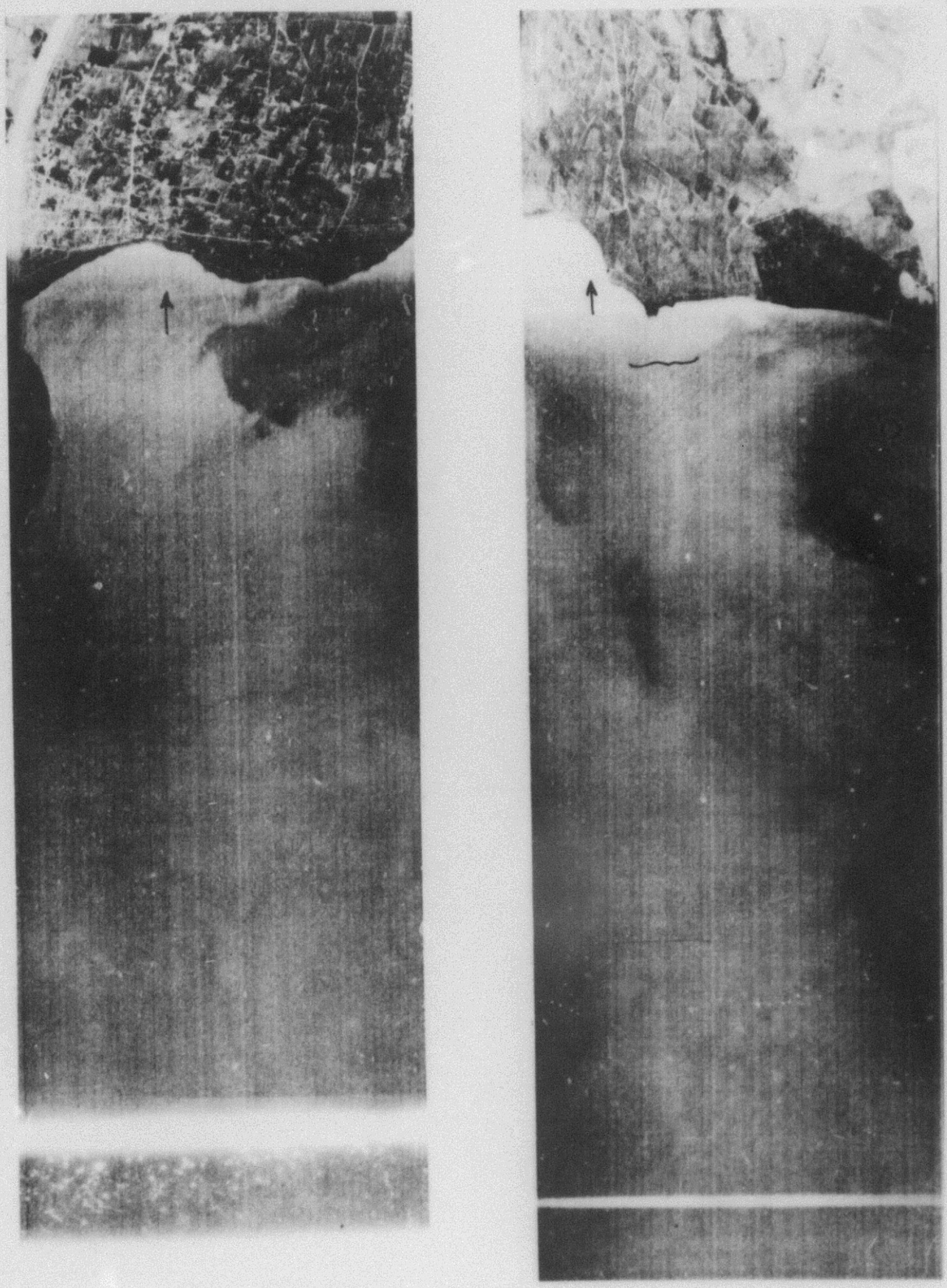
Super Cyclope **Mission** du 16.11.72 Altitude 1400m

PLANCHE XXI

Effet du contrôle automatique de gain avec un appareil plus performant que le Cyclope donnant une perturbation plus difficile à déceler (✱) (✱)

17h 15

17h 25

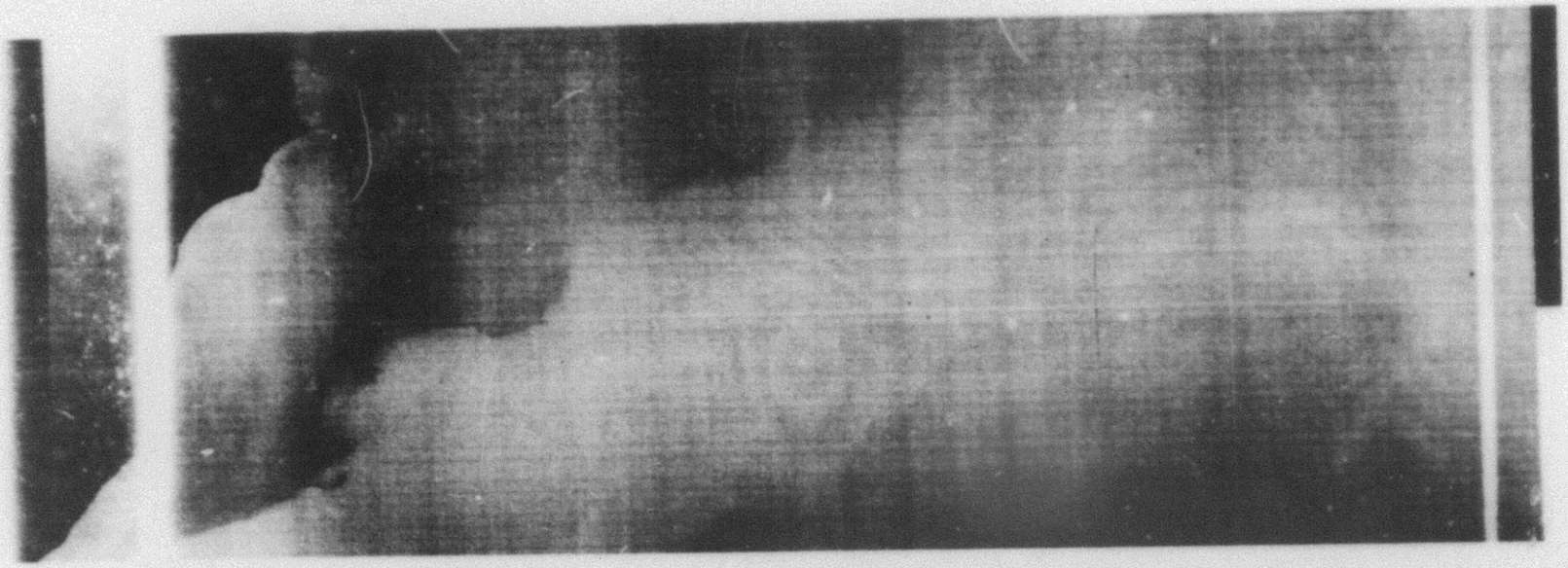


Super Cyclope **Mission** du 16.11.72 **Altitude** 1400 m

EFFETS DU CONTROLE AUTOMATIQUE DE GAIN (Comparer avec Pl. XX, XXI et XXIII

PLANCHE XXII

super Cyclope "ABSOLU"



Enregistrement sans C A G du 16.11.72

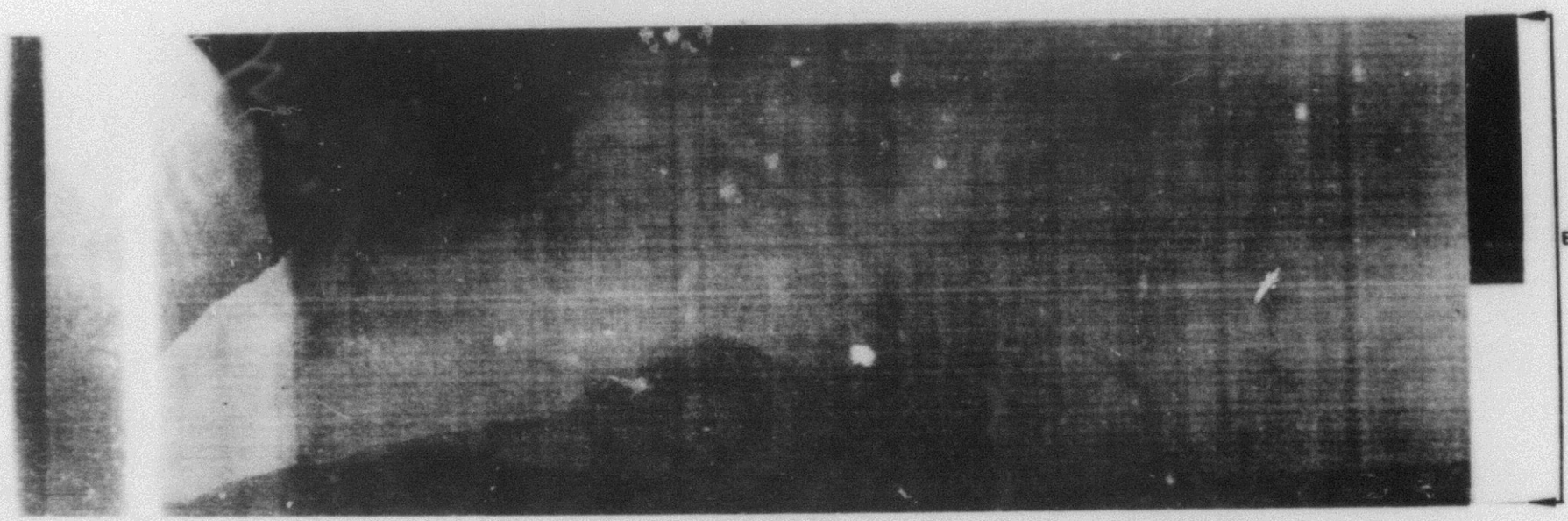


PLANCHE XXIII

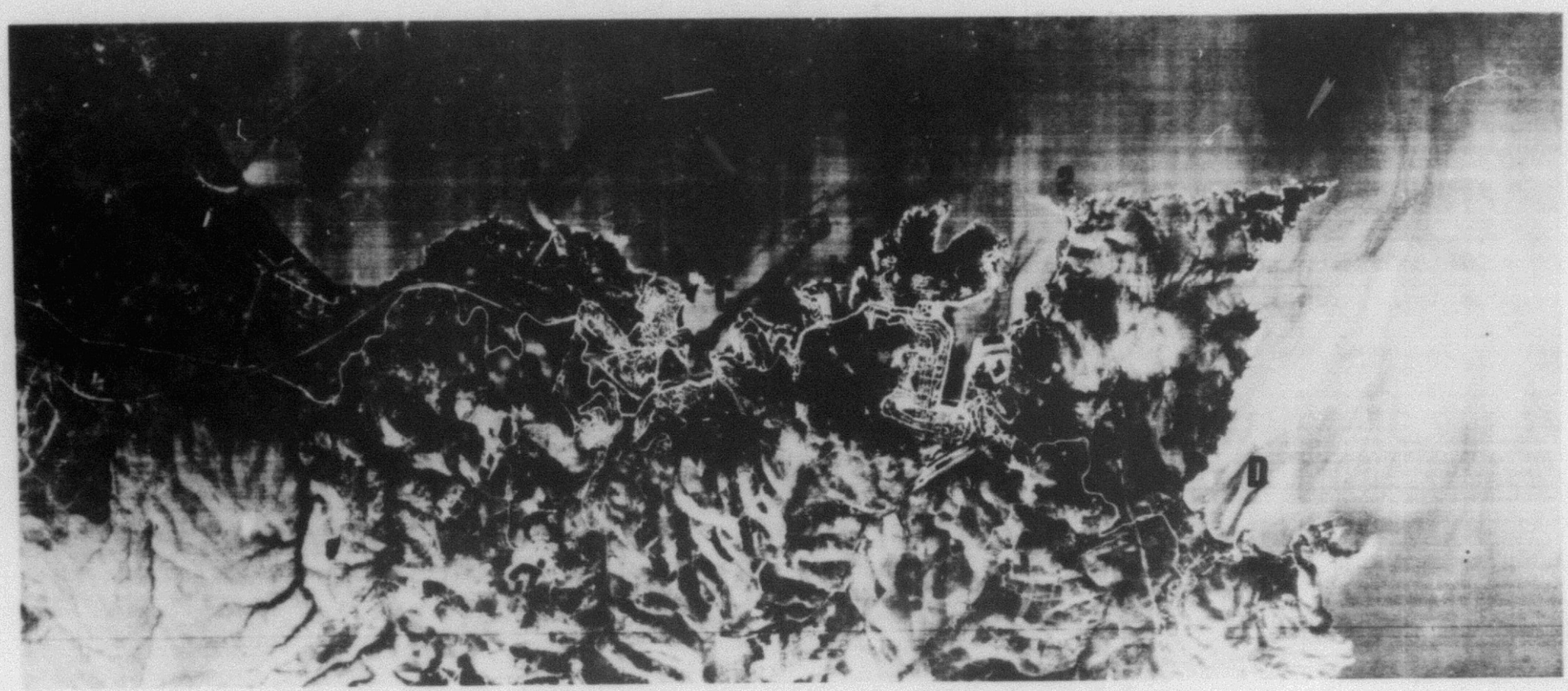
Images correspondantes à celles de la Pl. XXII, mais obtenues après suppression de contrôle automatique de gain.

Argeles-Plage

Collioure

Port Vendres

Cap Bear

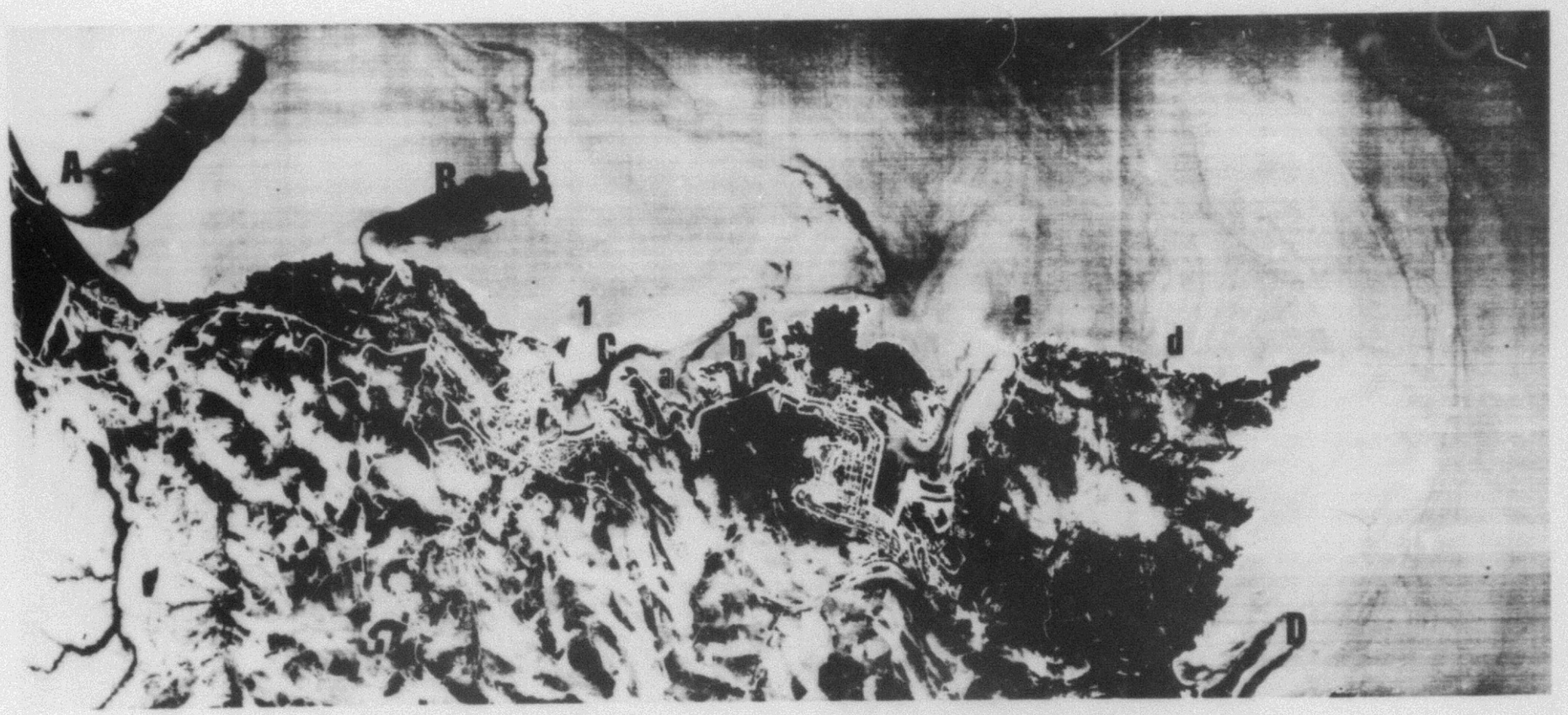


Thermographie (8 - 12 µ) 21h — Reglages automatiques Alt: 2000 m

Un moyen d'éviter oud e diminuer l'effet du CAG: le choix de l'heure de prise de vue en fonction du moment de la journée (égalisation des températures terre-mer)-comparer avec Pl. XXV

PLANCHE XXIV

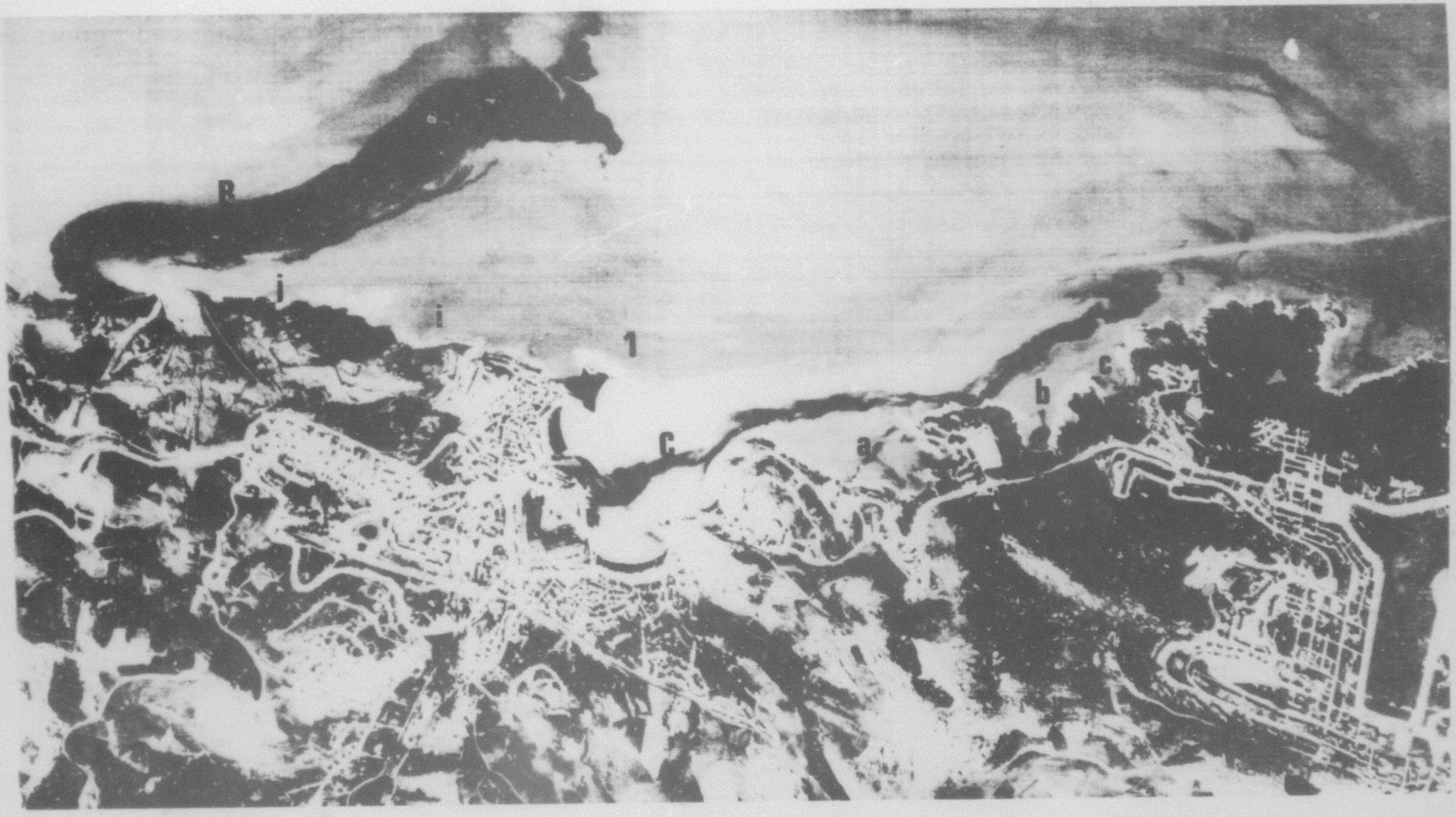
Collioure ↓ Port Vendres ↓ Cap Bear ↓



Thermographie (8 - 12 µ) 21h 30 _ Réglages bloqués Alt: 2000m

PLANCHE XXV

Comparer avec la Planche XXIV.

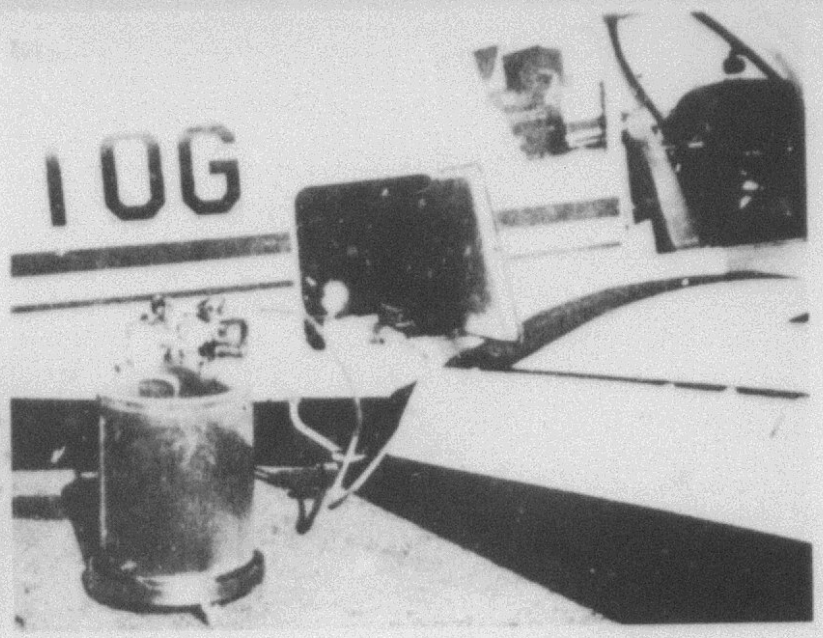


Thermographie (8 - 12µ) Réglages bloqués Alt: 1350m

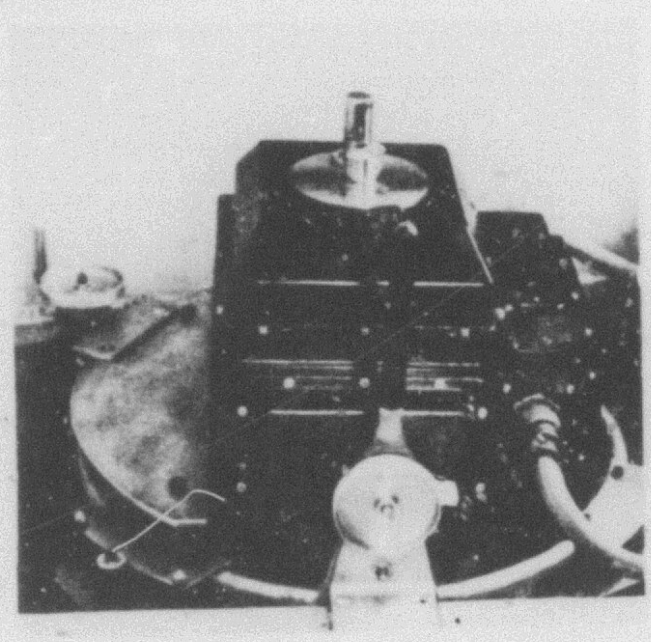
PLANCHE XXVI

Amélioration de la détection : passage basse altitude pour la détection des très faibles rejets (a - b - c - d) comparer avec Pl. XXV.

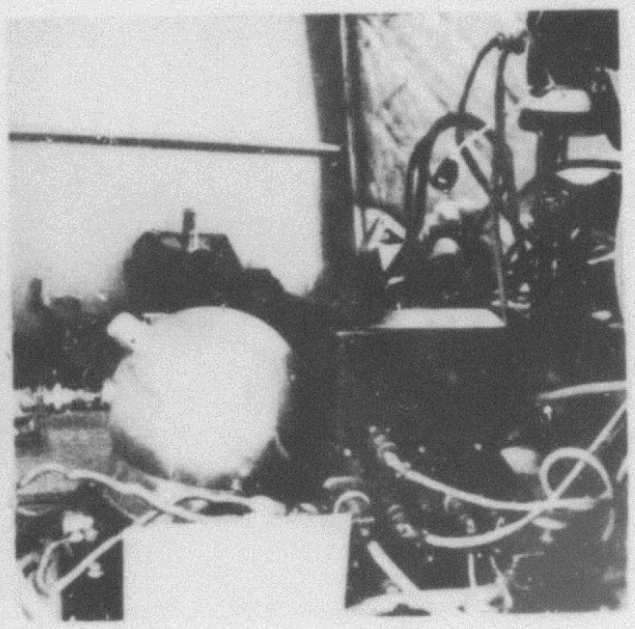




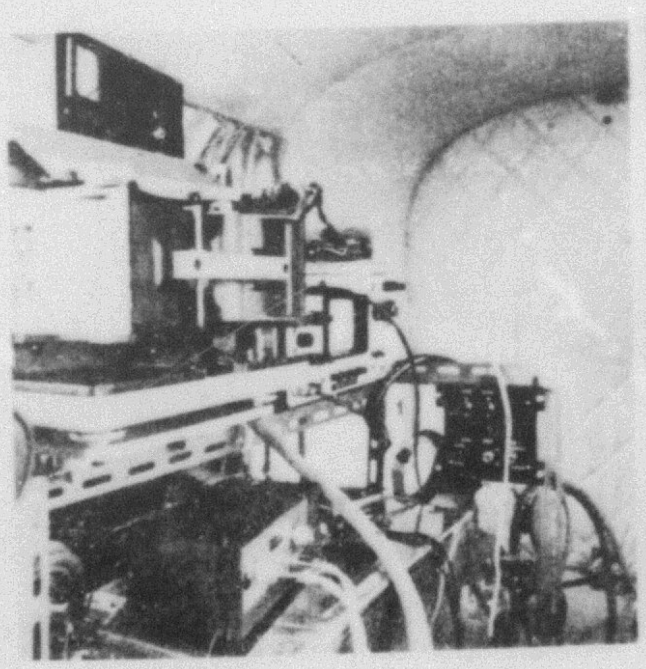
Le porteur : MARCHETTI 205

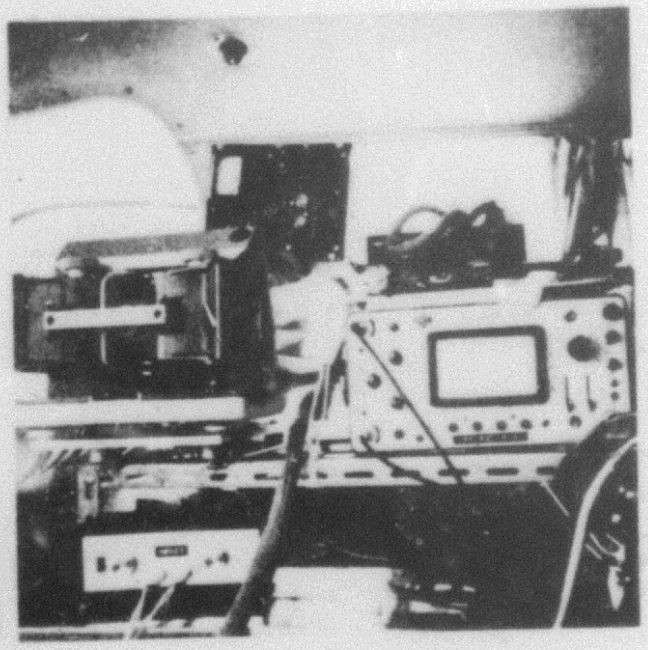


Super Cyclope



Cyclope





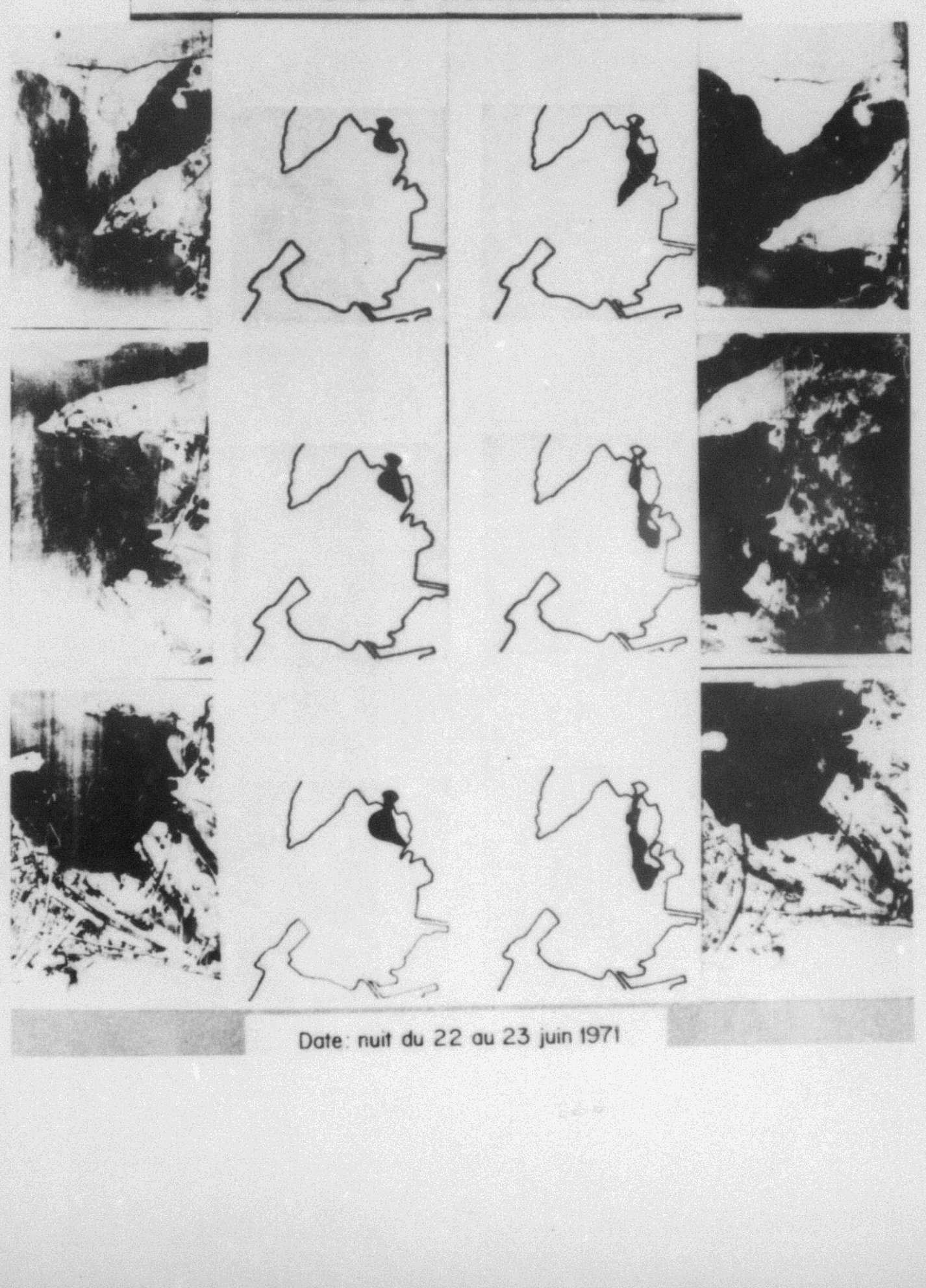
Controle et Visualisation

PLANCHE XXVII

Petit porteur mis en oeuvre à la demande du C.E.L.R.G.H. et montage simultané des scanners Cyclope et Super-Cyclope.

Méthodologie de surveillance d'un rejet polluant et correction des déformations géométriques dues au grand angle de prise de vue du radiomètre à balayage.

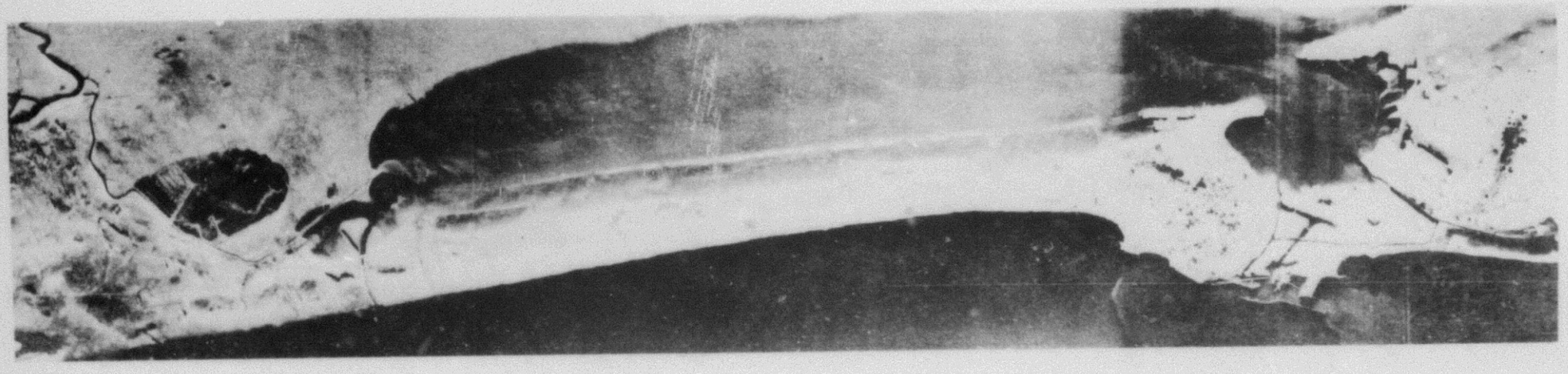
SCANNER INFRAROUGE CYCLOPE (3 a 5 µ)
ENREGISTREMENTS CHRONOSEQUENTIELS



Date: nuit du 22 au 23 juin 1971

Influence d'un changement dans la direction du vent sur le panache du rejet.

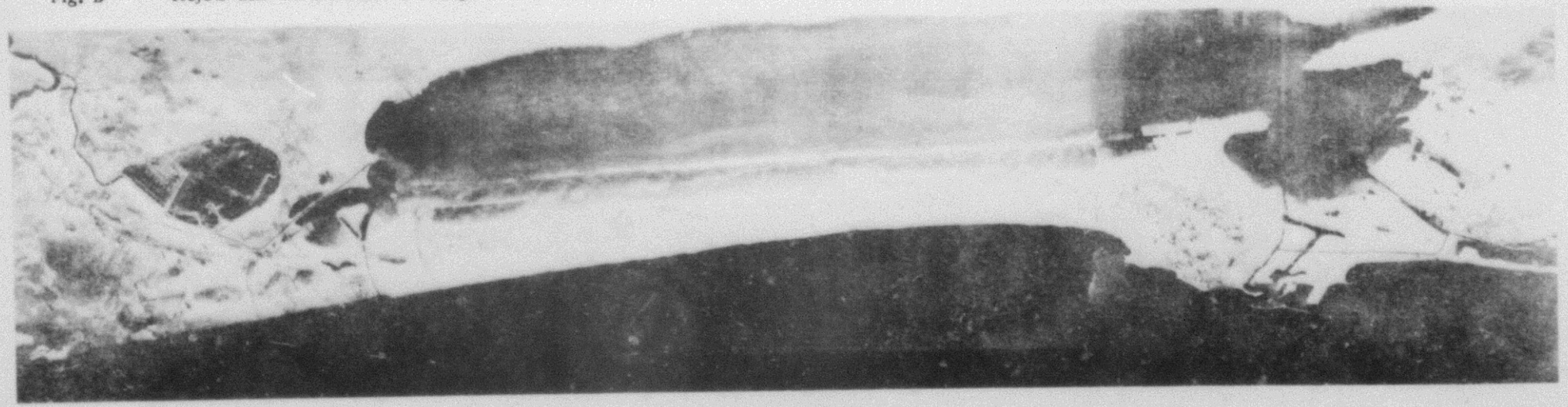
Fig. A



Etang de Thau - 6.12.72 - 3 h 39

Fig. B Rejets dont la direction a changé

Progression du front sous l'influence du vent



Etang de Thau - 6.12.72 - 5 h 58

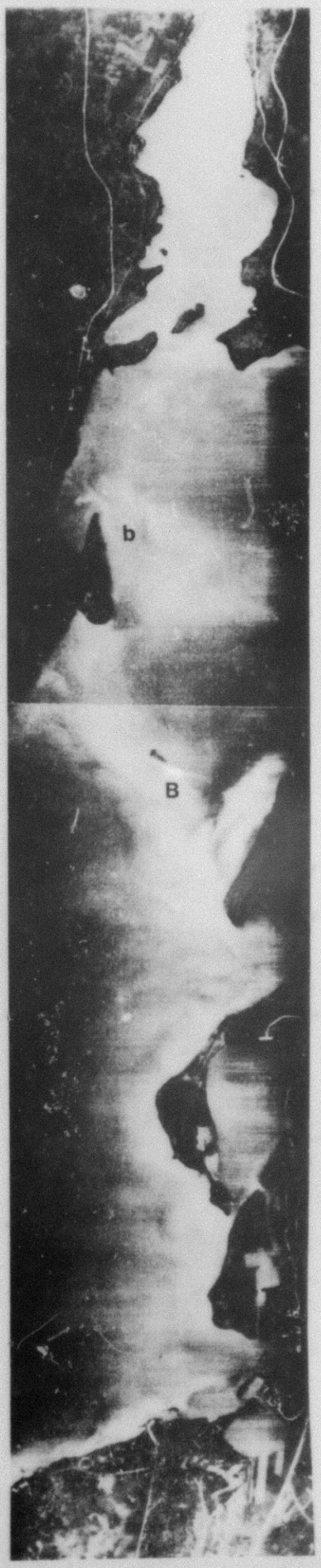
PLANCHE XXX

Etude des résurgences d'eaux douces en milieu lagunaire salé.

Mission 1

21 juillet 72 - 23 h





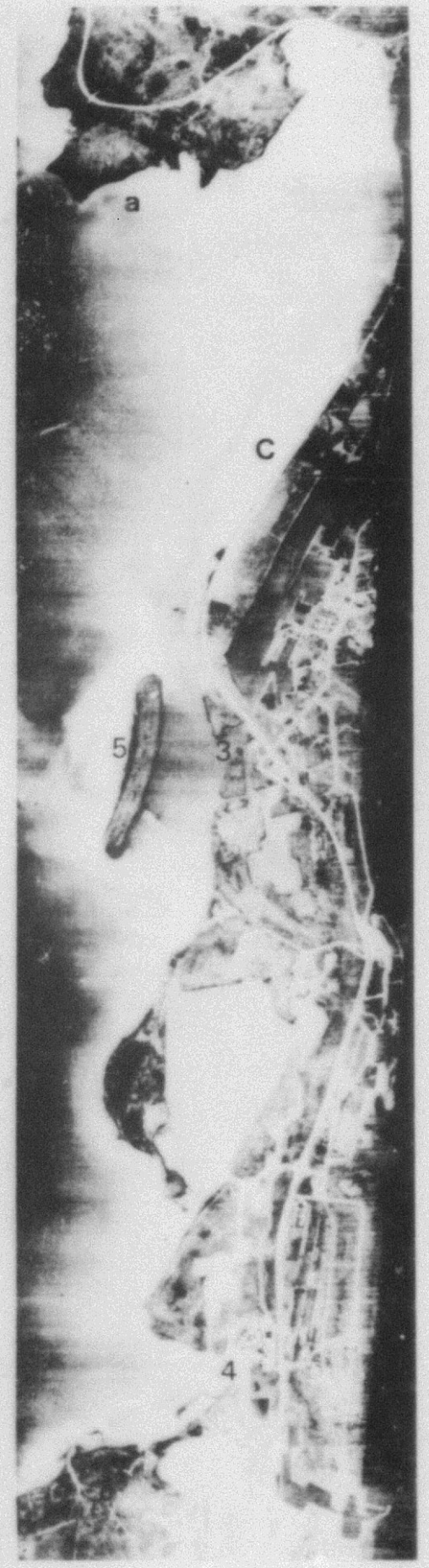


PLANCHE XXXI

Etude des résurgences d'eau douce en milieu lagunaire salé.

Mission 2

22 juillet 72 - 4 h



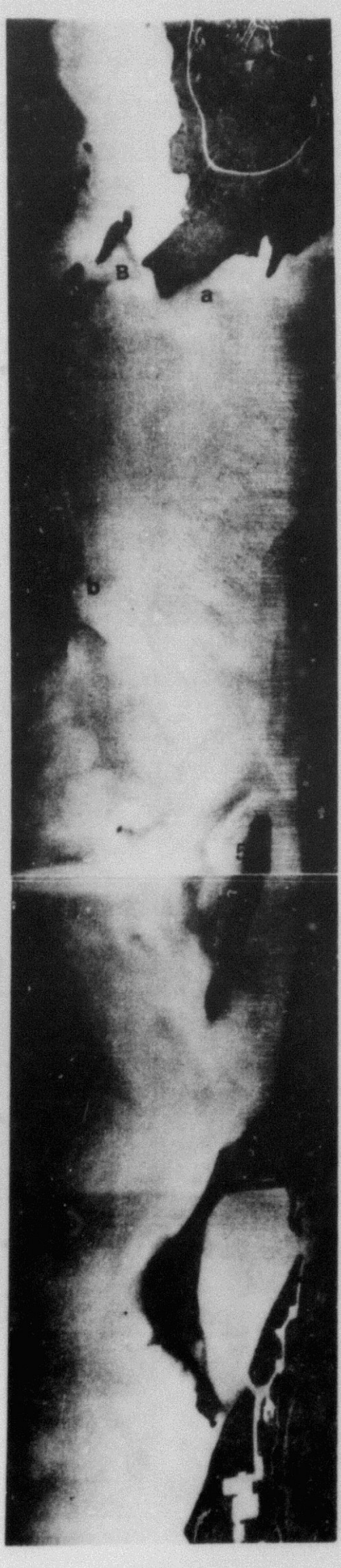
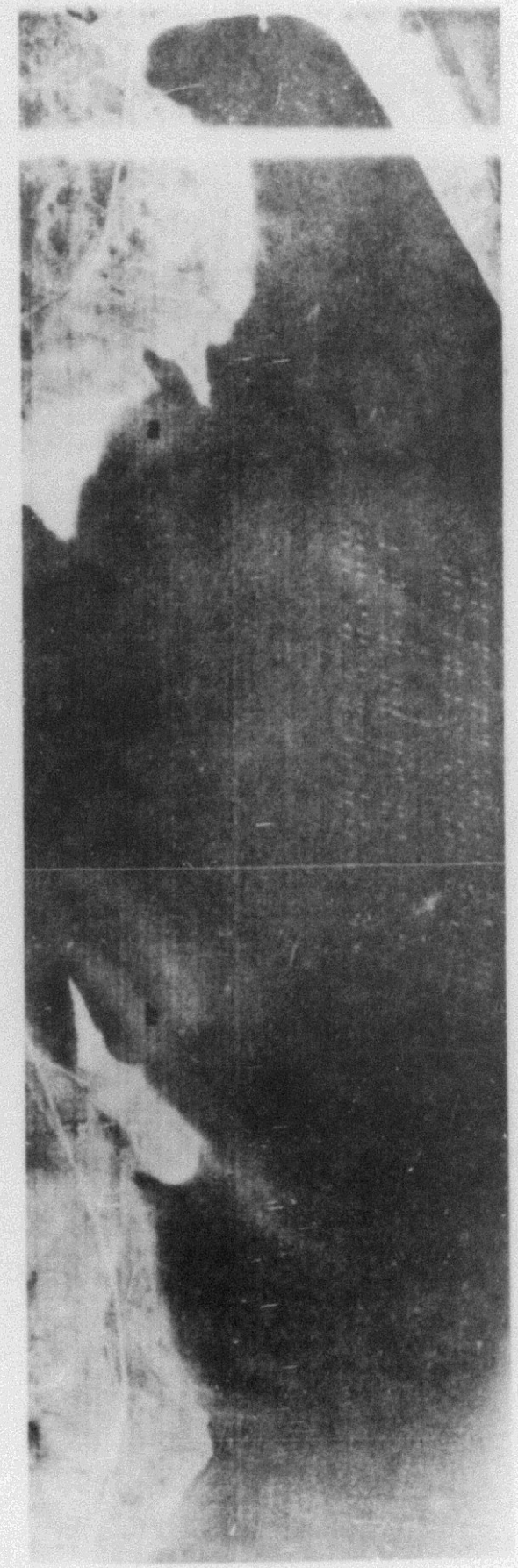


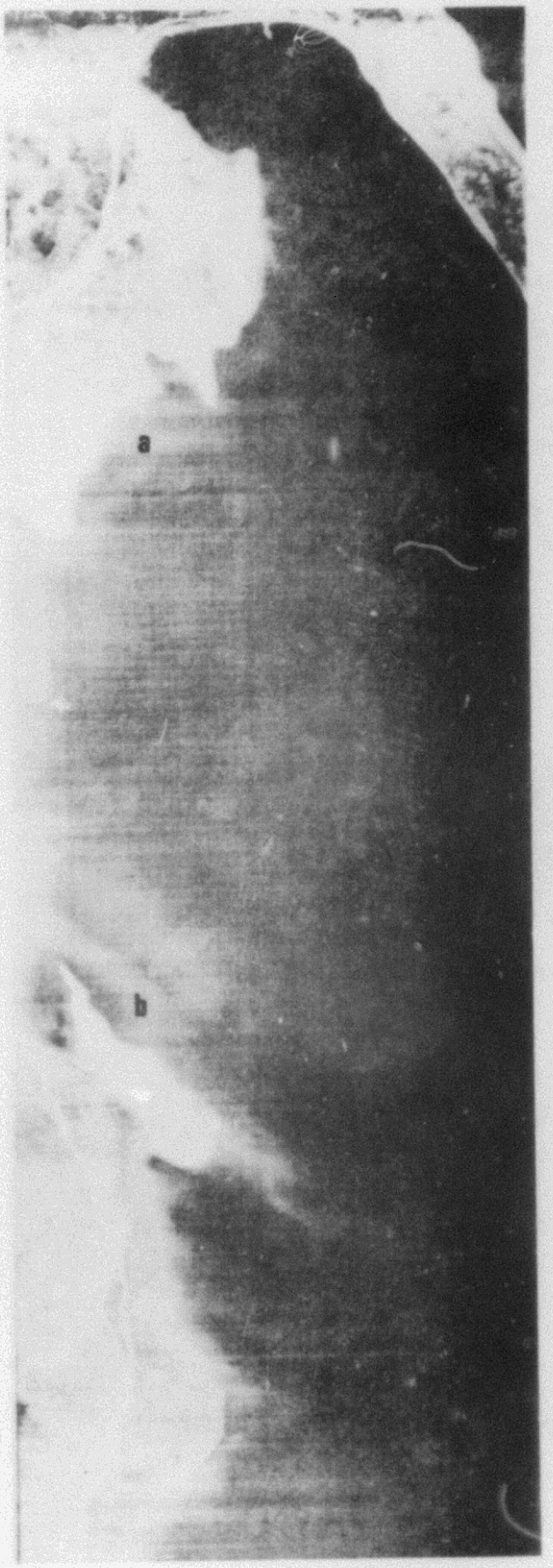


PLANCHE XXXII

Etude des résurgences d'eau douce en milieu lagunaire salé.



Supercyclope

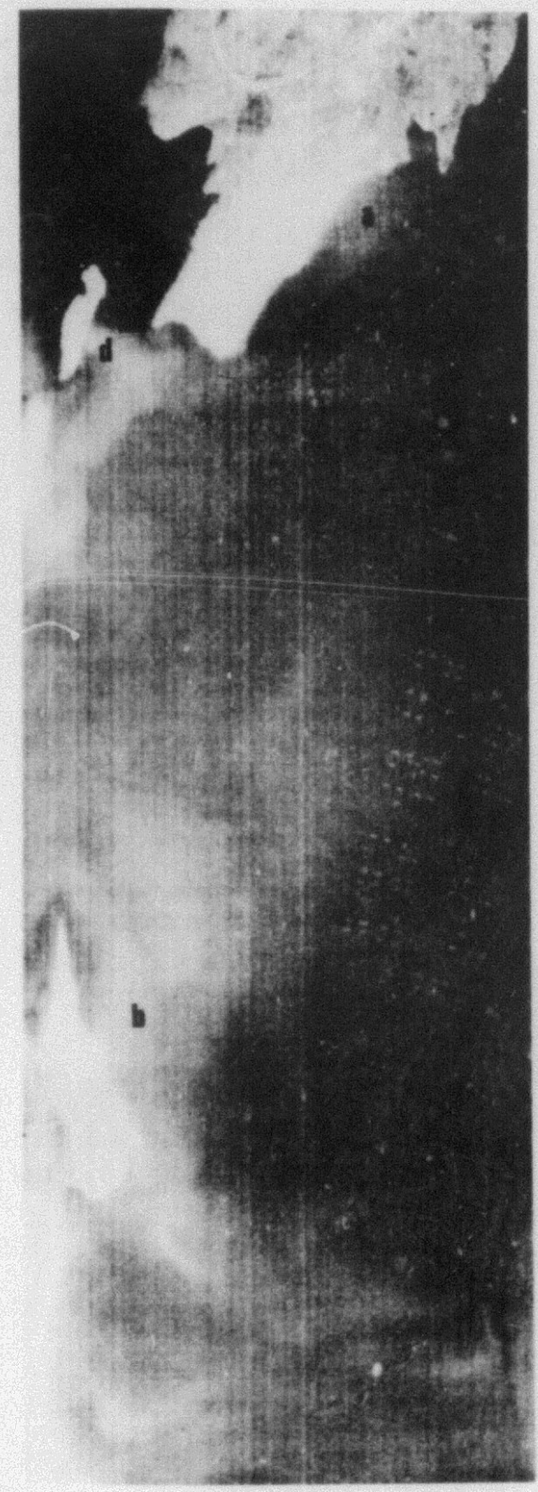


Cyclope

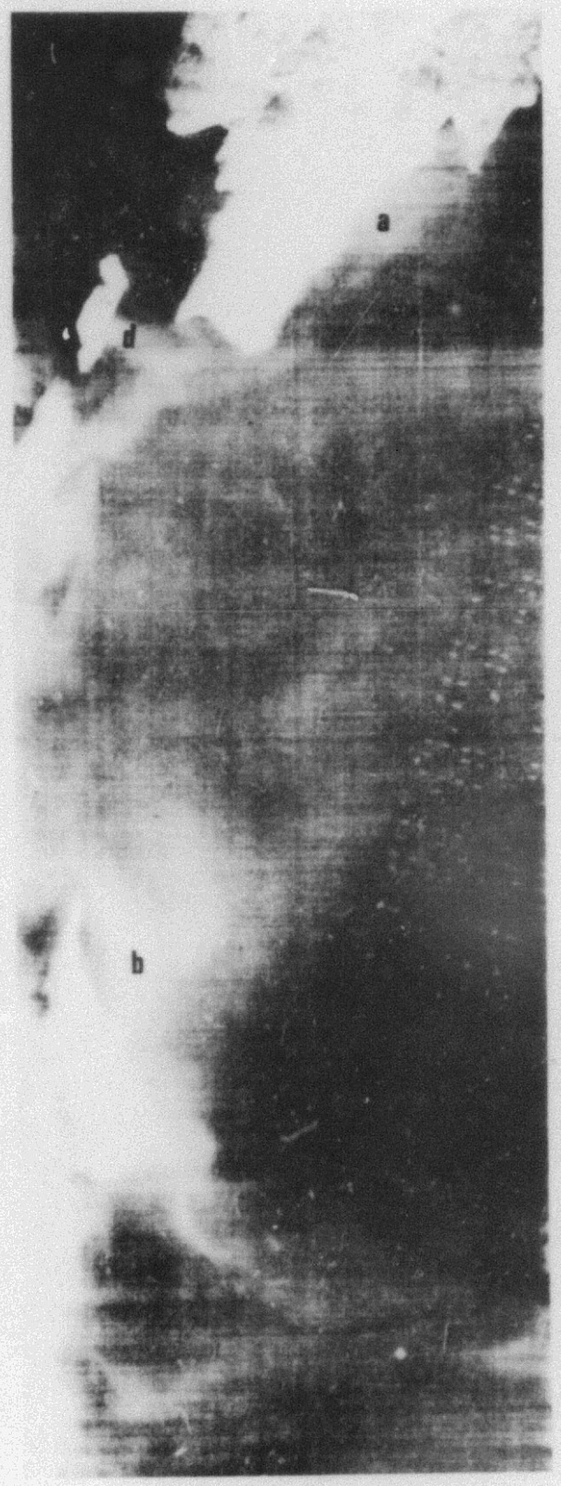
23 Novembre 72

PLANCHE XXXII bis

Etude des résurgences d'eau douce : enregistrement de jour par rapport aux précédents pris en saison chaude. Noter l'inversion de température.



Supercyclope

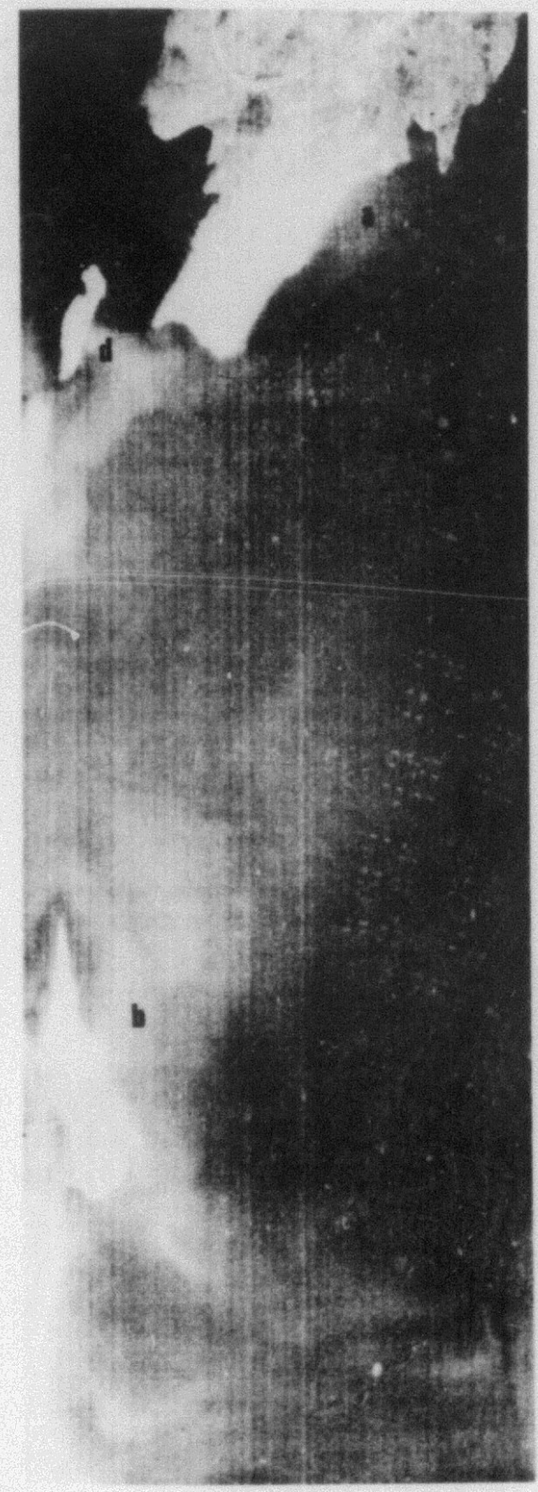


Cyclope

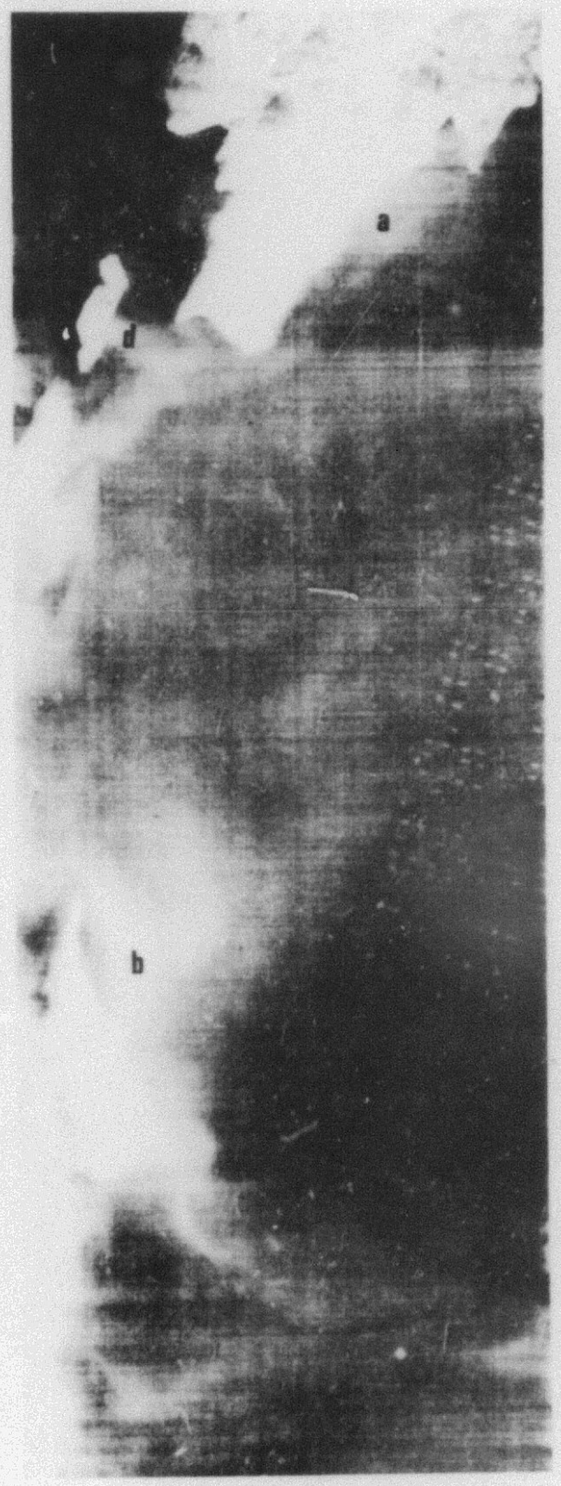
23 Novembre 72

PLANCHE XXXII bis

Etude des résurgences d'eau douce : enregistrement de jour par rapport aux précédents pris en saison chaude. Noter l'inversion de température.



Supercyclope



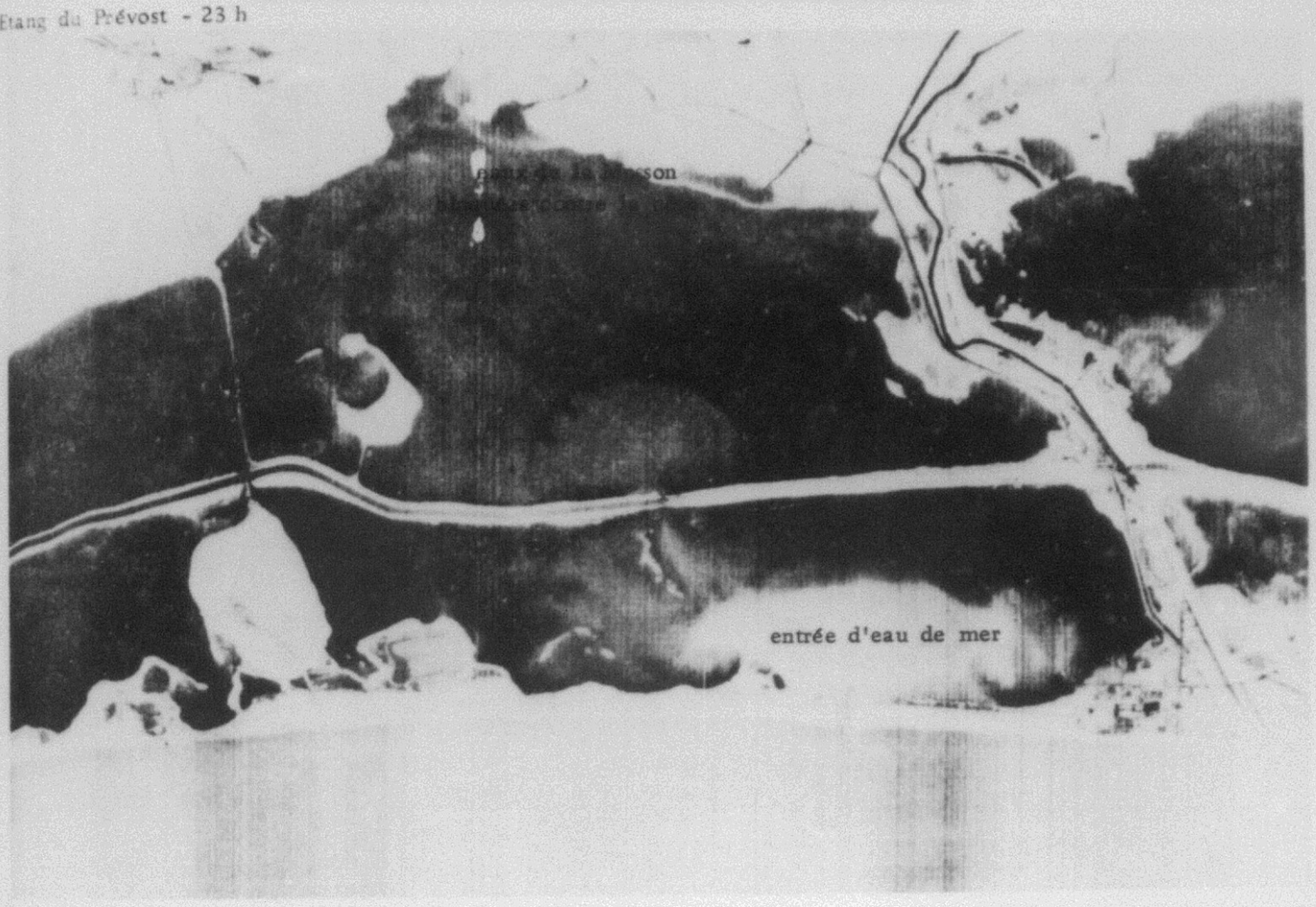
Cyclope

23 Novembre 72

PLANCHE XXXIII

Dynamique des échanges entre la mer et les étangs côtiers.

Etang du Prévost - 23 h



Etang du Prévost - 2 h - marée basse.

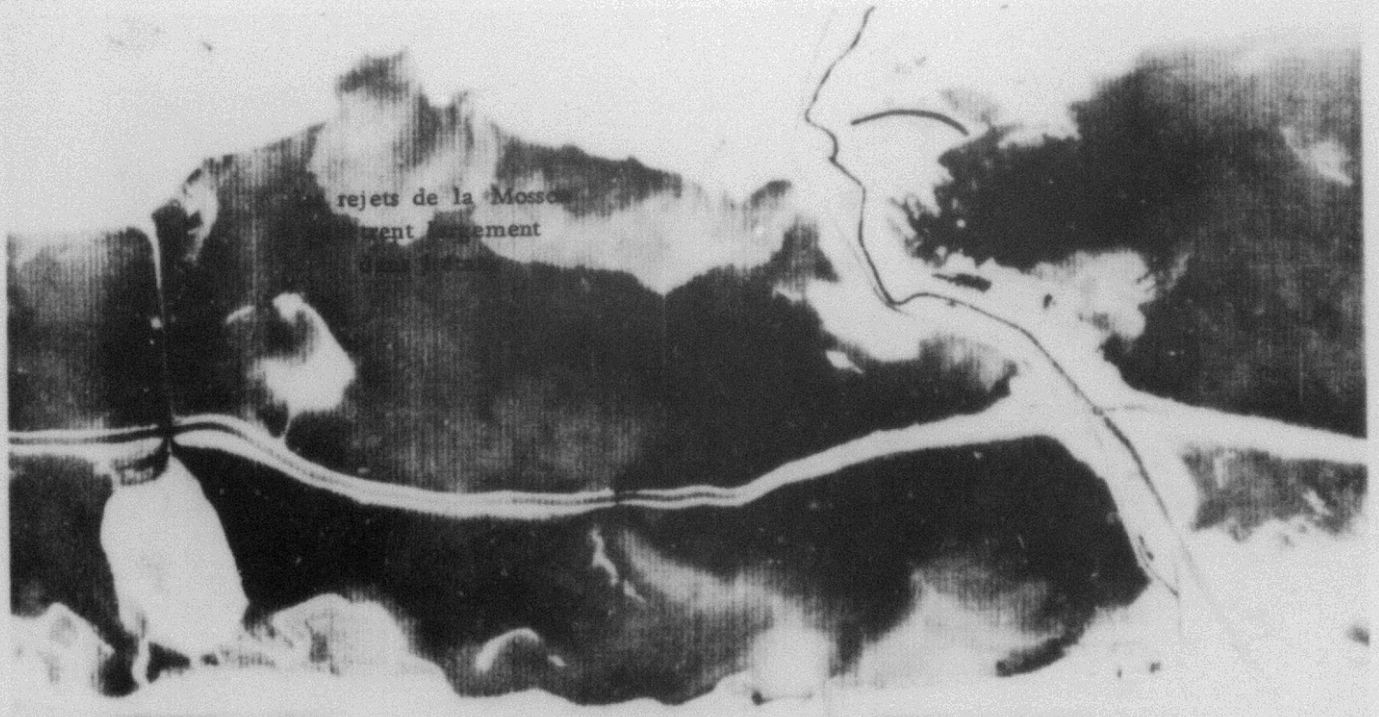
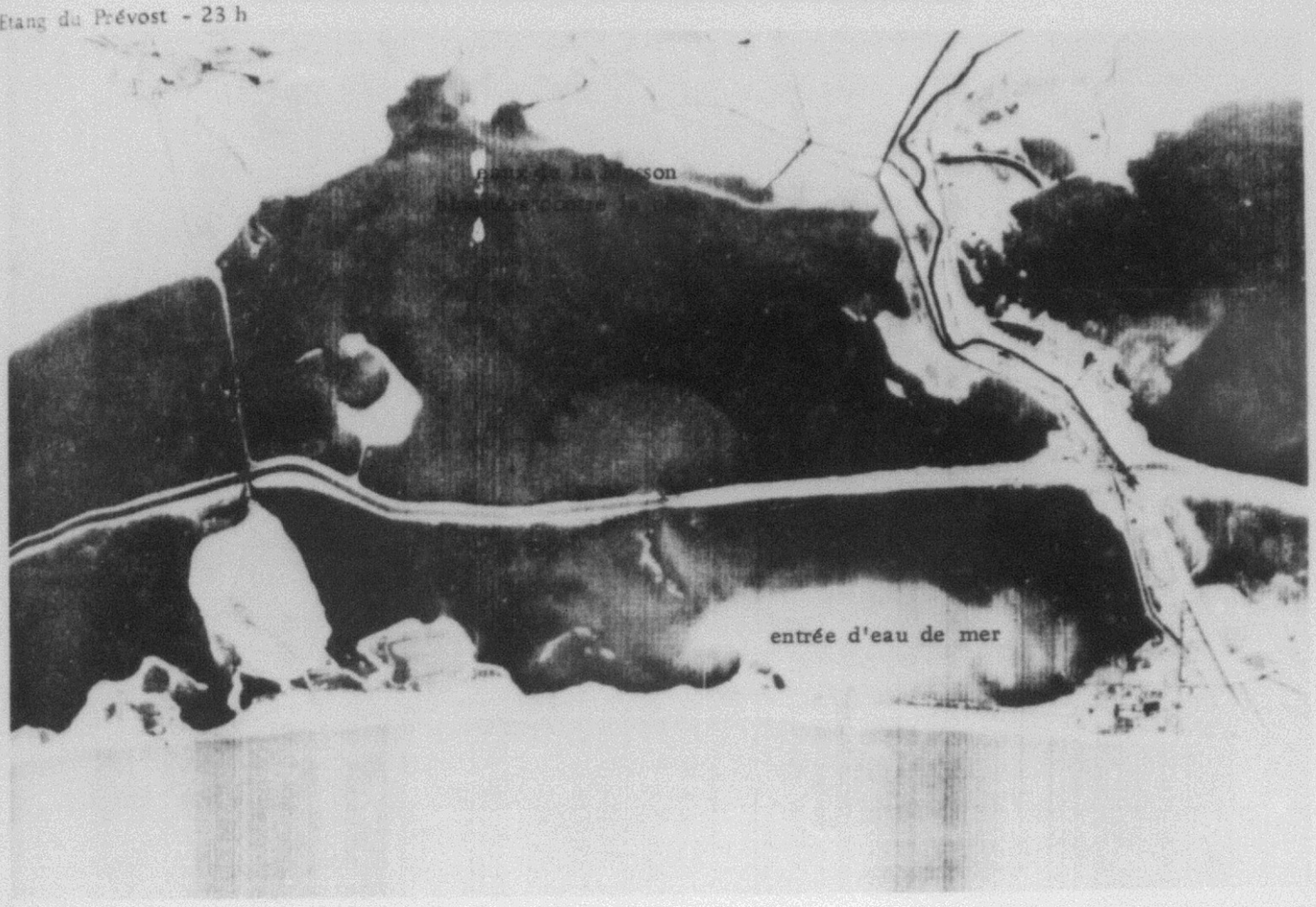


PLANCHE XXXIII

Dynamique des échanges entre la mer et les étangs côtiers.

Etang du Prévost - 23 h



Etang du Prévost - 2 h - marée basse.

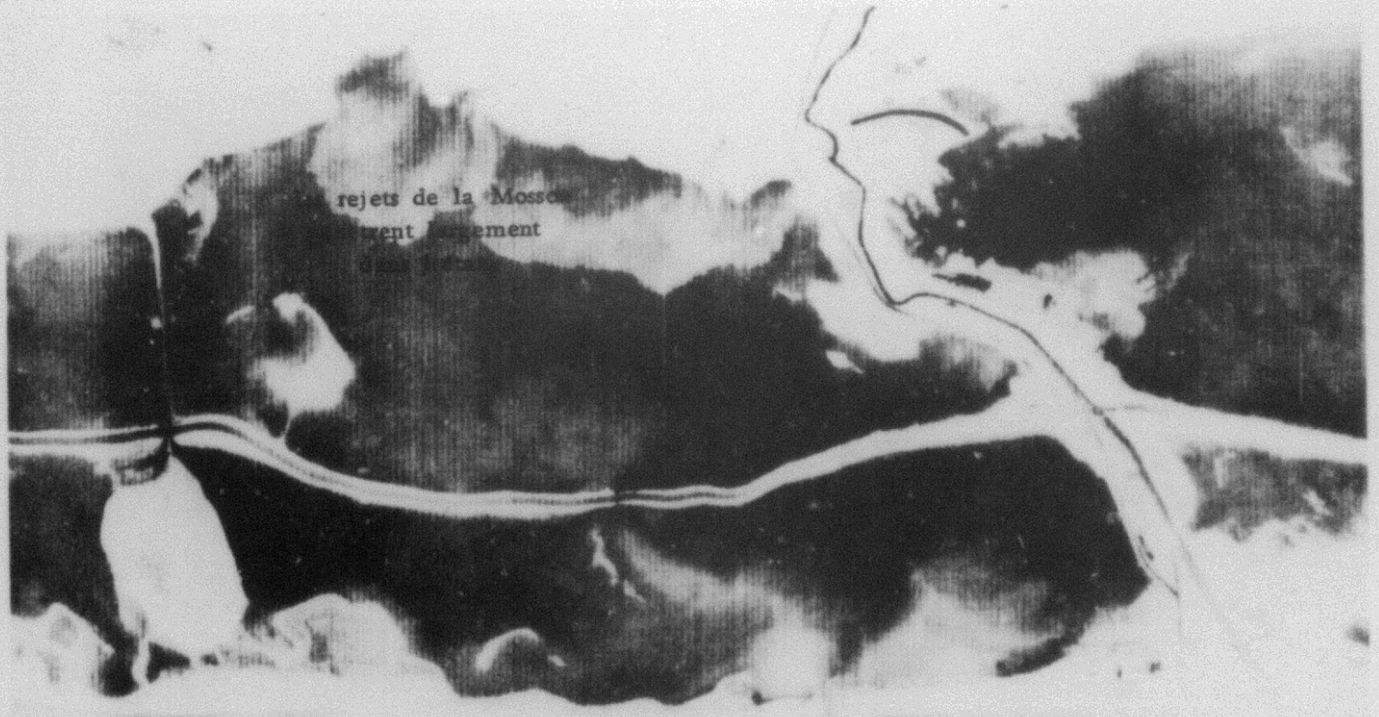
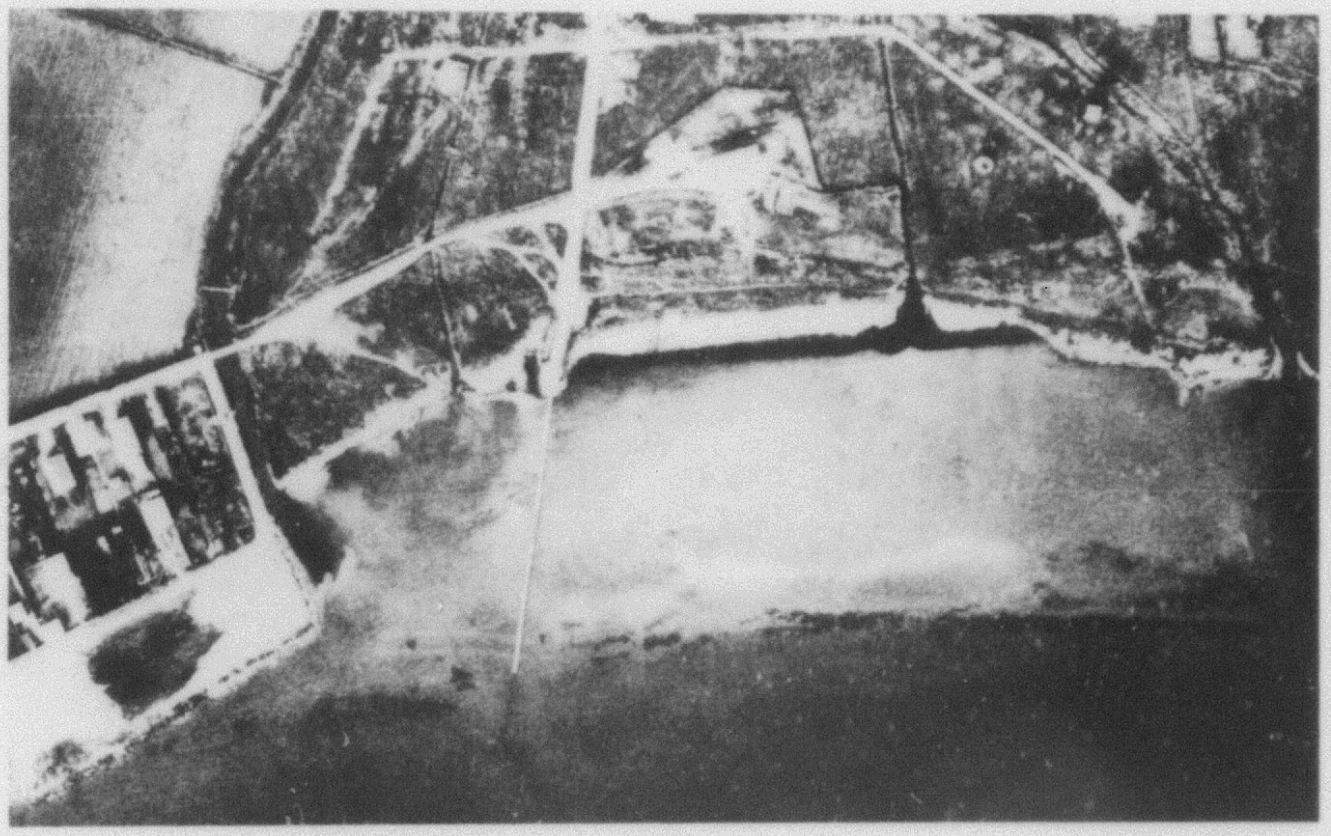
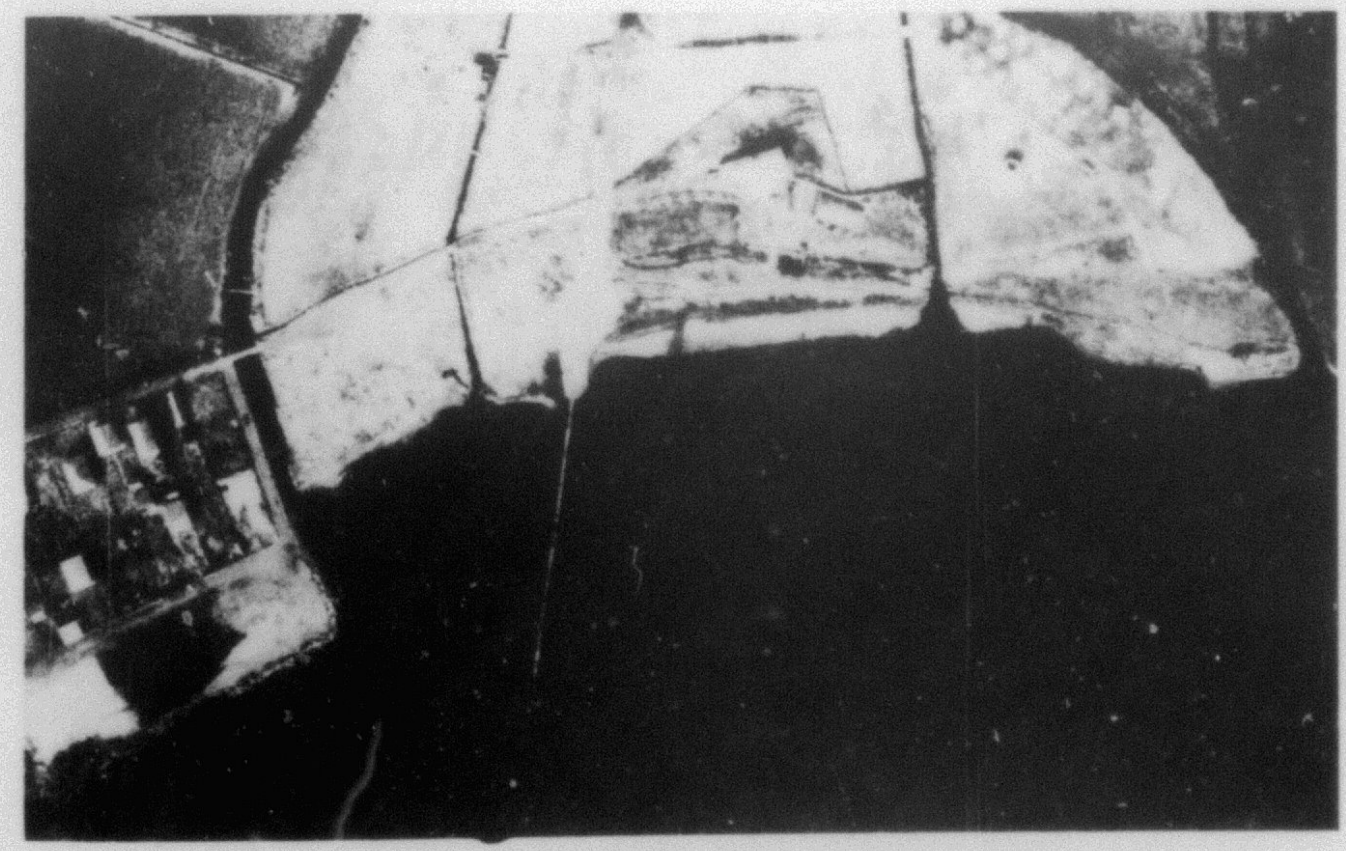


PLANCHE XXXIV

Utilisation d'émulsions différentes pour la cartographie des bordures d'étang.



Emulsion Panchromatique



Emulsion I.R noir et blanc

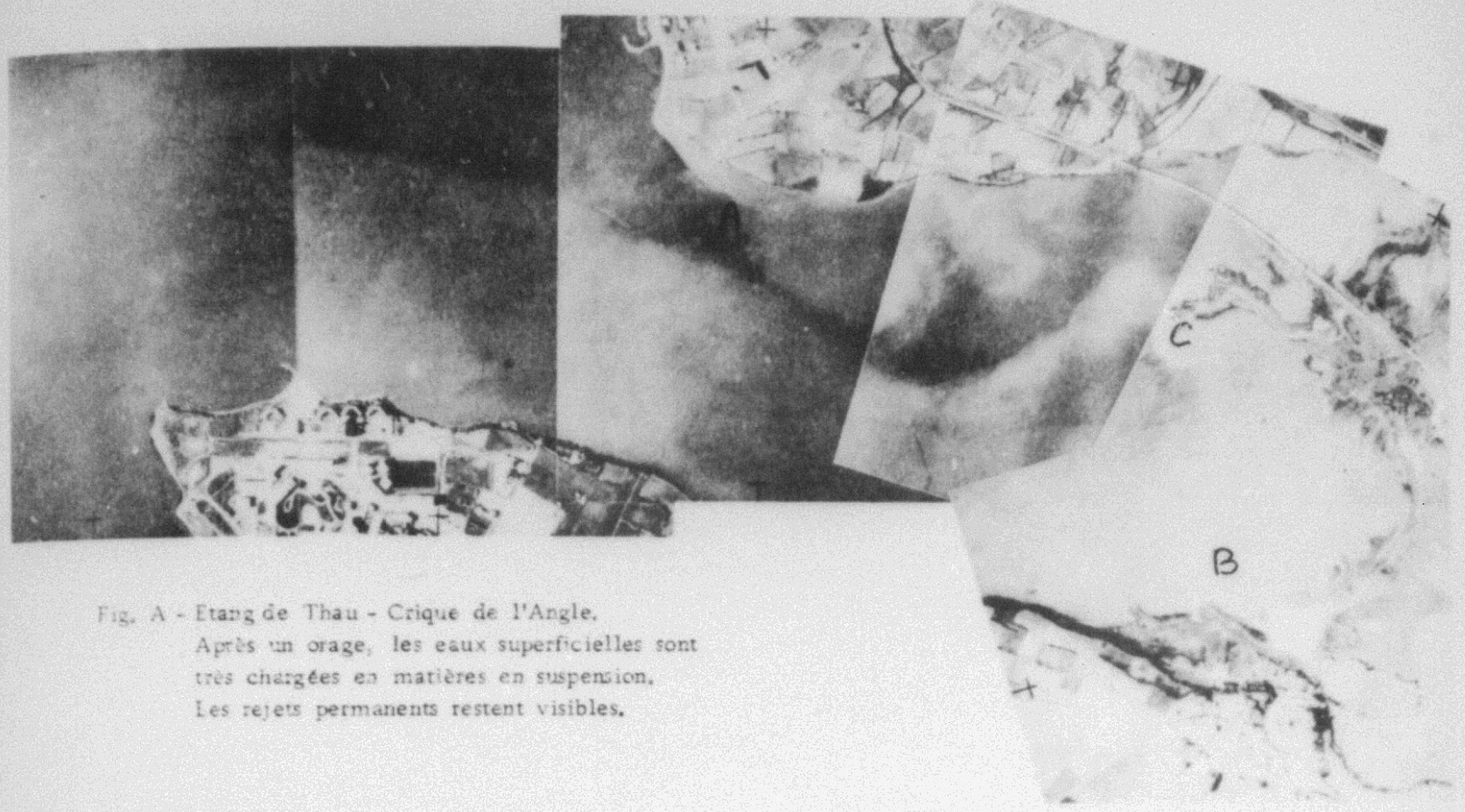


Fig. A - Etang de Thau - Crique de l'Angle.
Après un orage, les eaux superficielles sont très chargées en matières en suspension.
Les rejets permanents restent visibles.

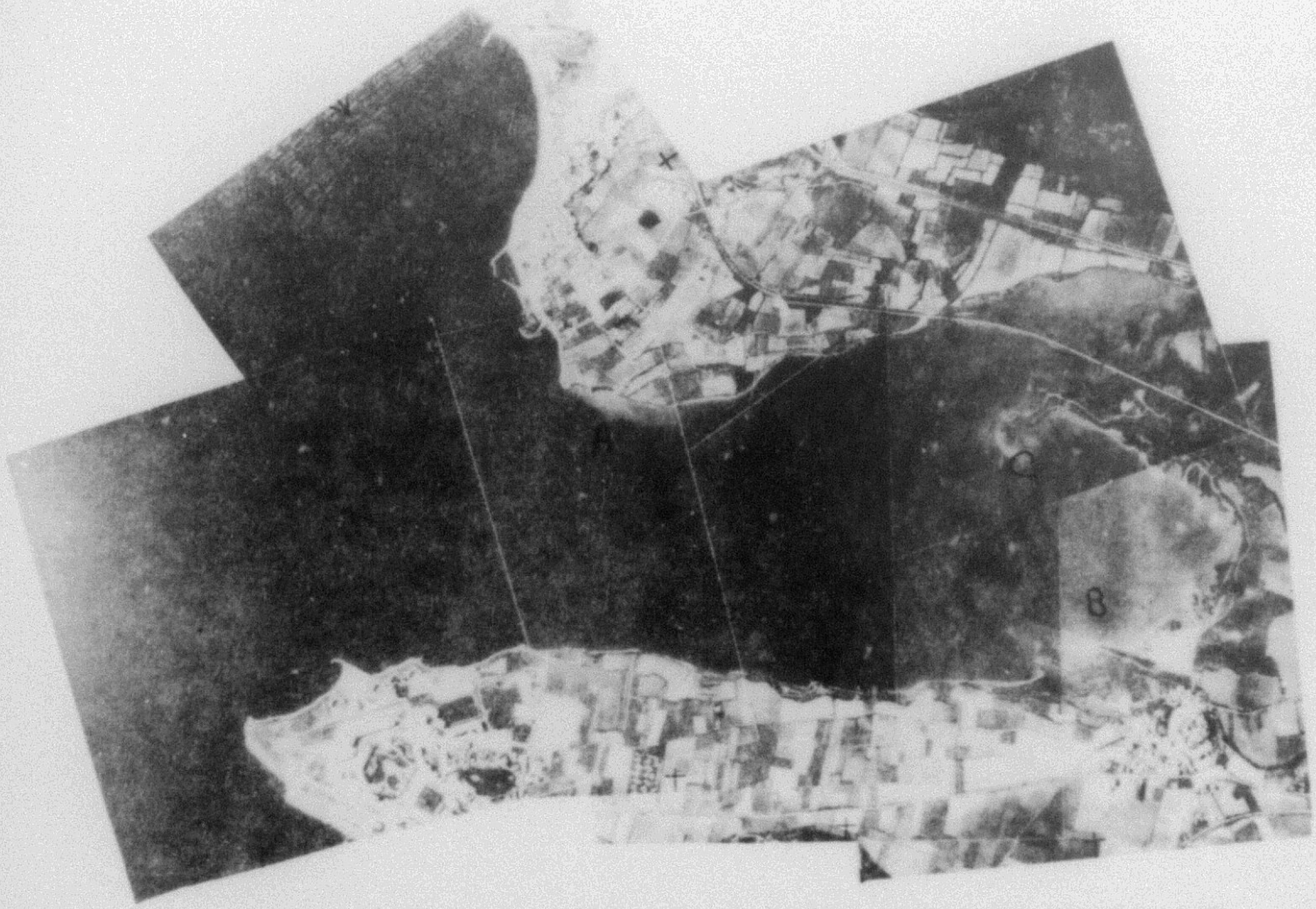
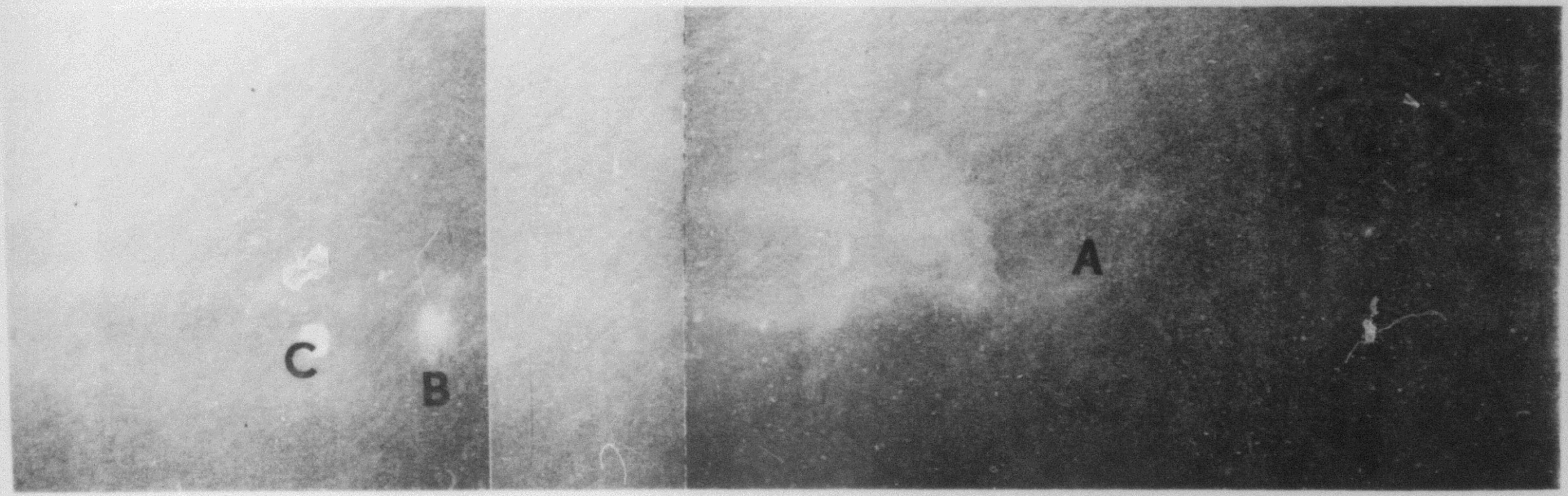


Fig. B - Etang de Thau - Crique de l'Angle. Par beau temps les rejets permanents restent visibles.



Photographie multispectrale - film panchro. + w 25 **Mission du 10/10/72**

Etude par coloration de la dispersion des eaux d'un émissaire sous-marin-Sortie à -13m de profondeur. La tache en A correspond à une sortie par bouffée identique à celle visible enC, mais ayant eu lieu 40 mn avant la prise de vue, en B bouffée produite 20MN avant la prise de vue.

PLANCHE XXXVI



Emulsion I. R. + filtre



Emulsion panchromatique

PLANCHE XXXVII

Détection de polluart par combinaisons émulsion-filtre.



Emulsion I. R. + filtre



Emulsion panchromatique

PLANCHE XXXVII

Détection de polluart par combinaisons émulsion-filtre.

Vu par le Centre National
de Documentation Agricole
00241

Séminaire de sensibilisation
LA TÉLÉDÉTECTION DES RESSOURCES TERRESTRES
Tunis, 29-30 octobre 1975

LE PROJET SAPHYR

par

Gérard HIEZ et Roger MAIGNIEN

CONVENTION DIRECTION GÉNÉRALE DE L'HYDRAULIQUE ET
DE L'ÉNERGIE DE LA RÉPUBLIQUE DU MALI –
O.R.S.T.O.M. / B.D.P.A. PARIS

S A P H Y R

—

SATELLITE PROJECT HYDROLOGIC RESEARCH.

SAPHYR est un programme de recherche qui tente de préciser l'apport des techniques de la télédétection dans une étude intégrée sur le delta central du fleuve Niger ; les objectifs scientifiques et techniques de l'opération couvrent trois domaines complémentaires :

1. En hydrologie : l'étude des mécanismes régissant l'équilibre hydrologique du delta intérieur, afin de découvrir les causes du déséquilibre constaté depuis 1962 ; l'évaluation des chances de maintien d'un nouvel équilibre, compte-tenu de l'influence des aménagements hydrauliques actuellement en cours d'exécution ou en projet ; enfin, la fourniture de données fondamentales pour tout projet d'aménagement.

2. En agriculture : la détermination des variations annuelles des surfaces soumises à l'inondation et cultivées en riz et celles des surfaces constamment exondées ensemencées seulement en saison des pluies, ceci en vue de l'amélioration des statistiques agricoles.

3. En écologie : une meilleure connaissance de la végétation naturelle, de ses changements saisonniers ; de son rôle sur le régime hydrologique du fleuve sur l'écologie du criquet pélerin, les circuits et les époques de transumances des troupeaux et, de façon générale, sur tout ce qui touche à la vie des populations.

1. PARTIES CONTRACTANTES.

Le projet a été étudié et lancé par le Ministère de l'Ind et des Travaux Publics de la République du Mali. Il groupe et coord activités complémentaires de trois contractants : le Service de l'I malien, l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-M Bureau pour le Développement et la Production Agricole, ces deux d étant des organismes français de coopération.

L'ORSTOM est plus particulièrement chargé des études hyd L'interprétation des couvertures aériennes et spatiales est confié Les documents satellite, en provenance de LANDSAT 1 et 2, seront f la NASA.

2 . PERIMETRE D'ETUDE.

La zone étudiée se situe au Mali, entre les latitudes 1 17°30 Nord et les longitudes 0°00 et 7°00 Ouest. Elle a la forme gone trapèzoïdal allongé et incliné vers l'Est, polygone qui regr grandes unités géographiques :

- une interne : le delta central du Niger;
- au nord-est et au nord-ouest le complexe des lacs,
- les zones sèches adjacentes.

2.1. Le delta central représente un immense marécage d'env - 500 kilomètres de long dans l'axe du fleuve, sur 120 km en sa plus large -.

C'est une vaste région d'épandage, fond d'une ancienne rieure, bordée au nord par le Sahara où l'ancien Niger se perdai ment par évaporation, avant que la capture du seuil de TOSSAYE vidange partielle en direction du Golfe du Benin vers le Sud-Est chement progressif de cette mer intérieure a donné le delta cent aspect actuel qui, en dehors du lit principal du fleuve, comport très complexe de bras secondaires, émissaires et lacs, sans com

S A P H Y R

—

SATELLITE PROJECT HYDROLOGIC RESEARCH.

SAPHYR est un programme de recherche qui tente de préciser l'apport des techniques de la télédétection dans une étude intégrée sur le delta central du fleuve Niger ; les objectifs scientifiques et techniques de l'opération couvrent trois domaines complémentaires :

1. <u>En hydrologie</u> : l'étude des mécanismes régissant l'équilibre hydrologique du delta intérieur, afin de découvrir les causes du déséquilibre constaté depuis 1962 ; l'évaluation des chances de maintien d'un nouvel équilibre, compte-tenu de l'influence des aménagements hydrauliques actuellement en cours d'exécution ou en projet ; enfin, la fourniture de données fondamentales pour tout projet d'aménagement.

2. <u>En agriculture</u> : la détermination des variations annuelles des surfaces soumises à l'inondation et cultivées en riz et celles des surfaces constamment exondées ensemencées seulement en saison des pluies, ceci en vue de l'amélioration des statistiques agricoles.

3. <u>En écologie</u> : une meilleure connaissance de la végétation naturelle, de ses changements saisonniers ; de son rôle sur le régime hydrologique du fleuve sur l'écologie du criquet pélerin, les circuits et les époques de transumances des troupeaux et, de façon générale, sur tout ce qui touche à la vie des populations.

1. PARTIES CONTRACTANTES.

Le projet a été étudié et lancé par le Ministère de l'Industrie et des Travaux Publics de la République du Mali. Il groupe et coordonne les activités complémentaires de trois contractants : le Service de l'Hydraulique malien, l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer et le Bureau pour le Développement et la Production Agricole, ces deux derniers étant des organismes français de coopération.

L'ORSTOM est plus particulièrement chargé des études hydrologiques. L'interprétation des couvertures aériennes et spatiales est confiée au BDPA. Les documents satellite, en provenance de LANDSAT 1 et 2, seront fournis par la NASA.

2 . PERIMETRE D'ETUDE.

La zone étudiée se situe au Mali, entre les latitudes 12°30 et 17°30 Nord et les longitudes 0°00 et 7°00 Ouest. Elle a la forme d'un polygone trapèzoïdal allongé et incliné vers l'Est, polygone qui regroupe trois grandes unités géographiques :

- une interne : le delta central du Niger,
- au nord-est et au nord-ouest le complexe des lacs,
- les zones sèches adjacentes.

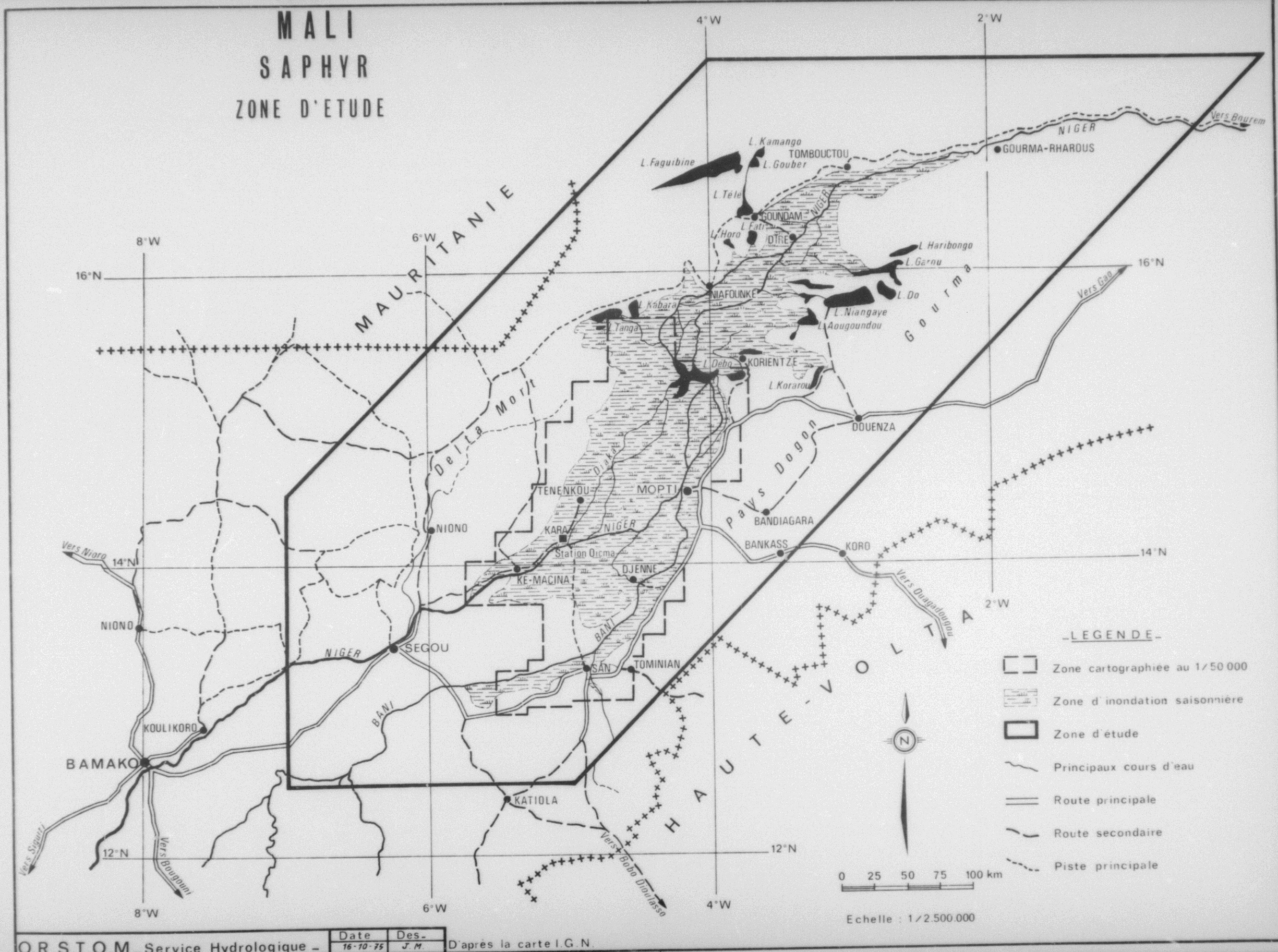
2.1. Le delta central représente un immense marécage d'environ 50 000 km^2 - 500 kilomètres de long dans l'axe du fleuve, sur 120 km en sa partie la plus large -.

C'est une vaste région d'épandage, fond d'une ancienne mer intérieure, bordée au nord par le Sahara où l'ancien Niger se perdait complètement par évaporation, avant que la capture du seuil de TOSSAYE amène une vidange partielle en direction du Golfe du Benin vers le Sud-Est. L'assèchement progressif de cette mer intérieure a donné le delta central avec son aspect actuel qui, en dehors du lit principal du fleuve, comporte un réseau très complexe de bras secondaires, émissaires et lacs, sans compter de vastes

MALI

SAPHYR

ZONE D'ETUDE



-LEGENDE-

- Zone cartographiée au 1/50 000
- Zone d'inondation saisonnière
- Zone d'étude
- Principaux cours d'eau
- Route principale
- Route secondaire
- Piste principale

0 25 50 75 100 km

Echelle : 1/2.500.000

O.R.S.T.O.M_Service Hydrologique_	Date	Des.	D'après la carte I.G.N.
	16-10-75	J.M.	

plaines régulièrement inondées tous les ans. La végétation est essentiellement graminéenne.

Le delta est entièrement exploité. Cultures, riz en particulier, élevage et pêche occupent une population d'environ 5.000.000 de personnes.

2.2. Le complexe des lacs est associé aux systèmes dunaires qui bordent les franges méridionales du désert. Les lacs de rive gauche sont les plus nombreux et les plus étendus. Le lac Faguibine, en particulier, est le plus grand lac de l'Afrique de l'Ouest. Le régime de ces lacs est directement lié à la crue du Niger. Ils sont reliés au fleuve par un système affluent-defluent et leur étude ne peut être séparée de celle du delta central.

Ces régions sont beaucoup moins peuplées que la précédente, surtout par des pasteurs.

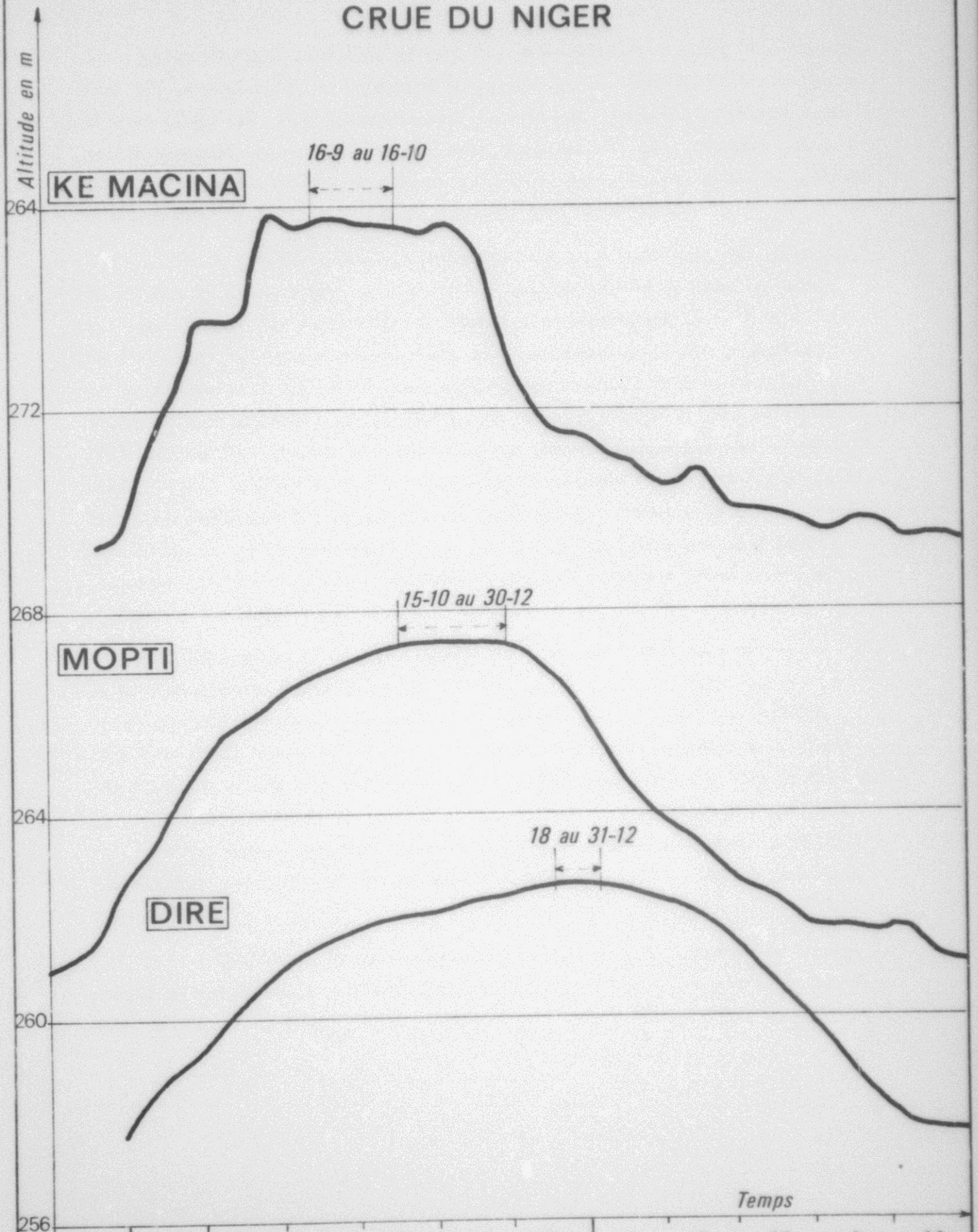
2.3. Les zones exondées cernent le delta de façons diverses. Au nord, les sables et les épandages argileux et limoneux sont le domaine de la steppe sahélienne très clairsemée ; au sud dominent les plateaux cuirassés par le fer (la latérite) qui supportent une savane arborée assez dense, le plus souvent dégradée par l'homme.

Ces régions sont toutes également peu peuplées. Les conditions de culture sont commandées par la hauteur des précipitations qui passe de 800 mm au sud à moins de 200 mm au nord. Ces pluies sont de régime tropical.

3. REGIME HYDROLOGIQUE DU MOYEN NIGER.

Le régime du Niger à l'aval du delta intérieur est conditionné par le régime du Niger supérieur en amont de SEGOU et du Bani, son affluent principal, au droit de Mopti, d'une part, et par la transformation que subit ce régime par suite du passage du fleuve dans le delta central, d'autre part. Les conditions hydrauliques d'écoulement sont assez faciles à saisir en amont du delta. Il entre en moyenne 35.000.000.000 de m^3/an pour un bassin versant de 280.000 km^2. La montée des eaux commence en pleine saison sèche dès le mois de mai. Ces eaux proviennent des précipitations qui débutent fin mars sur le Fouta Djallon en Guinée. Dès fin juin, début juillet, la crue qui cumule

CRUE DU NIGER



O.R.S.T.O.M. Service Hydrologique | date J.G. | des. J. B. J.

des apports du Niger supérieur [illegible] les précipitations, alors bien installées sur le périmètre, se dév[illegible]s énormes dans le delta. Le front de crue progresse alors lente[illegible] le nord-est, jusqu'en février dans la partie septentrionale. A Niamey, [illegible] l'aval du delta, la crue n'arrive qu'au début de l'année suivante, époque où les effets de la saison sèche se trouvent heureusement amortis par la montée des eaux dans la vallée.

Dans le Delta, les conditions hydrauliques sont très compliquées. Le partage du débit entre les multiples bras, les effets de stockage dans les lacs et dans les plaines d'inondations, les phénomènes de sédimentation et d'érosion, les variations de pente et de sections mouillées interfèrent de façon très difficile à dénouer. A ces phénomènes, il faut ajouter les infiltrations profondes qui peuvent ne pas être négligeables dans certains sols sableux et, surtout, l'évaporation qui absorbe couramment par km^2 de surface libre un débit de l'ordre de 100 l/s (soit une tranche de 8,6 mm/jour). Enfin les écoulements sont partiellement entravés, surtout à la décrue, par des séries de petits ouvrages dressés par les paysans pour protéger leurs cultures contre les poissons phytophages et pour conserver l'eau pour les animaux et les arrosages.

Au maximum de la crue, seuls les "toguérés" dépassent de l'eau. Ce sont des petits ilôts toujours exondés, pour la plupart habités, car le delta est très peuplé. La population se répartit schématiquement en BOZO pêcheurs, BAMBARA cultivateurs, parmi lesquels viennent se mêler à la décrue les éleveurs PEULHS à la recherche de pâturages pour leurs immenses troupeaux. La végétation naturelle de la zone inondable est essentiellement constituée de graminée, parmi lesquelles il faut citer une plante flottante, le BOURGOU (Edinochloa stagnina) qui est la base de l'alimentation des bovins en saison sèche.

A la décrue, le delta forme une masse verte au milieu d'un paysage marqué au sud du rouge des latérites et au nord du jaune des sables du Sahara tout proche.

5. LES RAISONS DU PROJET.

Le delta central pose de nombreux problèmes aux spécialistes intervenant dans les divers aspects des activités économiques le concernant. Ces problèmes sont difficiles à appréhender du fait de son immensité, et de la complexité du régime des eaux. Ses 50.000 km^2 couverts par la crue rendent les communications à terre impossibles pendant une grande partie de l'année. Et cependant cette région offre, de par ses richesses en eau, de multiples possibilités d'aménagement et de mise en valeur. Hydrologues, agronomes, ingénieurs du Génie Rural, acridologues, parcourent cette immense zone, ayant grand mal à dominer le phénomène d'ensemble que représentent la crue et la décrue du fleuve, d'autant plus que des faits récents ont prouvé que le système hydrographique continuait à évoluer de façon rapide.

4.1. Modification du régime hydrologique en aval du Delta.

Avant 1960, le bassin supérieur pouvait être considéré comme stable et le réseau hydrographique dans le delta central le semblait également. Les prévisions de crue à l'aval, à Niamey (Niger) en particulier, apparaissaient satisfaisantes. Mais les crues du Niger de février 1968 et 1970 ont mis en évidence une modification très nette du régime tel qu'il était défini. Il semblait probable que les marigots de rive droite, au nord-est à la sortie du delta, courtcircuitaient un débit de 10 à 20 % de celui observé dans le lit principal, ce qui paraissait lié à un creusement important de lits secondaires. Il n'est pas encore possible de dire si le phénomène est en voie de stabilisation ou s'il continue d'évoluer. Dans ce dernier cas, un débit de crue centenaire de 3.000 m/s à Niamey ne serait pas invraisemblable dans quelques années. Un tel chiffre amène à reconsidérer entièrement tous les aménagements prévus à l'aval du seuil. Il est donc impératif de déterminer quelle est la répartition du débit entre les différents lacs et dans quel sens cette répartition évolue.

4.2. Besoins en données de base.

4.2.1. Ces besoins sont principalement liés aux problèmes de l'économie de l'eau dans le sol et plus particulièrement à ceux liés à l'irrigation.

- irrigation libre :

C'est la forme ancestrale pratiquée par les agriculteurs sur leurs terres en l'absence de tout aménagement. Les résultats obtenus par cette voie sont extrêmement aléatoires car ils dépendent de plusieurs facteurs : l'amplitude de la crue, la date d'arrivée à la cote des cultures (les bourrelets des bords de cassiers ne dépassent pas trente centimètres), la vitesse de montée des eaux (le riz ne supporte pas plus de 5 cm/jour,

Pour que les cultivateurs réussissent leur culture de riz, il faut que la crue arrive début septembre et que l'amplitude ne dépasse pas de plus de 30 cm la cote envisagée. Il ne faut pas non plus que la crue soit trop faible et n'arrive pas à la cote des cultures. L'optimisation de ce type d'exploitation consiste à connaitre vers le 25 juillet, quelle sera la date d'arrivée de la crue et la probabilité de son amplitude cinq semaines plus tard. La connaissance de ces données au Génie Rural permet de prévoir les surfaces maximales irrigables dans les meilleures conditions.

- submersion contrôlée :

A l'heure actuelle, 80.000 ha sont équipés (ou en cours d'équipement) et 200.000 ha sont prévus dans un proche avenir. Les zones prioritaires sont celles dont on connait le mieux les données de base. La submersion contrôlée exige des ouvrages particulièrement importants, car les cotes des digues sont calculées pour des crues centenaires et les organismes de financement sont exigeants quant à la quantité et la qualité des données hydrologiques de base. De plus, il est demandé que soient incluses rapidement les études complémentaires concernant la cartographie des sols, des études agro-pédologiques et une enquête socio-économique du delta. Ces besoins concernent de nombreux périmètres, en particulier, entre SEGOU et MOPTI et dans la zone des lacs, au nord du delta. Ici le système affluent/défluent n'a jamais été étudié et les études actuelles concernant les ouvrages à réaliser sont basées sur des hypothèses. De plus, le système de mise en eau des lacs de rive droite n'a pas été élucidé à ce jour. D'une façon générale, le delta intérieur doit faire l'objet d'une étude de développement intégré (élevage, pêche, agriculture, etc..). Il est important dans ce but de pouvoir suivre l'évolution des surfaces cultivées, particulièrement en riz, et celle des pâturages. Enfin, il est nécessaire de contrôler la démographie et les migrations de population à l'intérieur du delta.

4.2.2. Les besoins en données de base concernent également d'autres domaines :

- la pêche :

La pêche constitue la troisième ressource du MALI. En 1970, le tonnage frêt contrôlé a atteint 135.000 tonnes , ce tonnage passant par MOPTI en provenance du delta central. Actuellement, les moyens modernes utilisés par les pêcheurs autorisent des pêches miraculeuses qui n'existaient pas autrefois. Conséquence de cette pêche trop active, la taille moyenne des prises diminue de plus en plus, ce qui est indicateur d'une surexploitation. Mais il n'existe aucune étude dans le cadre du recensement entre tailles, poids et nombre de prises. Il faut donc apporter une solution urgente à ce problème en vue de dresser une législation adéquate pour arriver à un équilibre rentable. La connaissance de la biomasse utilisable dans ce but doit être précisée en qualité et en quantité.

- Le problème du bourgou :

Cette graminée flottante est à la base de l'alimentation des bovins en saison sèche. La mauvaise utilisation par les propriétaires des troupeaux de ces "bourgoutières" entraine la disparition de celles-ci. Actuellement, le nombre de bovins évoluant dans la région de MOPTI se situe autour de 2.000.000 et a une forte tendance à se développer ; les pâturages de bourgou ne suffisent plus. Les Peulhs font entrer les animaux de plus en plus tôt dans les bourgoutières alors qu'elles ne sont pas mûres, c'est-à-dire que l'ensemencement n'est pas réalisé. Les animaux écrasent ou mangent les jeunes plantes qui ne peuvent plus se reproduire. C'est ainsi que le bourgou a pratiquement disparu au nord du lac DEBO.

Ce problème est directement lié à la pêche. En effet, le bourgou constitue également un des éléments essentiels de la nourriture du poisson. Lorsque les bourgoutières meurent les poissons désertent ces zones où la pêche disparait aussi.

- Les extensions des rizières :

Une espèce de poisson phytophage, qui est apparu depuis peu, s'attaque aux pousses de riz et les détruit. Pour limiter ces dégâts, les paysans interdisent l'accès des poissons aux rizières. Ces derniers ne disposant plus de la nourriture des terrains couverts par la crue tendent à s'éloigner des champs protégés. Les surfaces ainsi exploitées ne couvrent pas

4.2.2. Les besoins en données de base concernent également d'autres domaines :

- la pêche :

La pêche constitue la troisième ressource du MALI. En 1970, le tonnage frêt contrôlé a atteint 135.000 tonnes , ce tonnage passant par MOPTI en provenance du delta central. Actuellement, les moyens modernes utilisés par les pêcheurs autorisent des pêches miraculeuses qui n'existaient pas autrefois. Conséquence de cette pêche trop active, la taille moyenne des prises diminue de plus en plus, ce qui est indicateur d'une surexploitation. Mais il n'existe aucune étude dans le cadre du recensement entre tailles, poids et nombre de prises. Il faut donc apporter une solution urgente à ce problème en vue de dresser une législation adéquate pour arriver à un équilibre rentable. La connaissance de la biomasse utilisable dans ce but doit être précisée en qualité et en quantité.

- Le problème du bourgou :

Cette graminée flottante est à la base de l'alimentation des bovins en saison sèche. La mauvaise utilisation par les propriétaires des troupeaux de ces "bourgoutières" entraine la disparition de celles-ci. Actuellement, le nombre de bovins évoluant dans la région de MOPTI se situe autour de 2.000.000 et a une forte tendance à se développer ; les pâturages de bourgou ne suffisent plus. Les Peulhs font entrer les animaux de plus en plus tôt dans les bourgoutières alors qu'elles ne sont pas mûres, c'est-à-dire que l'ensemencement n'est pas réalisé. Les animaux écrasent ou mangent les jeunes plantes qui ne peuvent plus se reproduire. C'est ainsi que le bourgou a pratiquement disparu au nord du lac DEBO.

Ce problème est directement lié à la pêche. En effet, le bourgou constitue également un des éléments essentiels de la nourriture du poisson. Lorsque les bourgoutières meurent les poissons désertent ces zones où la pêche disparait aussi.

- Les extensions des rizières :

Une espèce de poisson phytophage, qui est apparu depuis peu, s'attaque aux pousses de riz et les détruit. Pour limiter ces dégâts, les paysans interdisent l'accès des poissons aux rizières. Ces derniers ne disposant plus de la nourriture des terrains couverts par la crue tendent à s'éloigner des champs protégés. Les surfaces ainsi exploitées ne couvrent pas

encore une superficie relative suffisamment importante pour que le problème présente un caractère d'urgence, mais il faudra lui trouver une solution en raison de l'extension rapide de l'opération "riz".

Un autre problème est celui de la compétition entre riz et bourgou. Les paysans pensent logiquement que les bourgoutières correspondent aux meilleures terres à riz, d'où de violents palabres entre cultivateurs et éleveurs. Dans ce domaine aussi, un équilibre est à trouver.

4.2.3. Les problèmes nombreux posés par l'évolution rapide des conditions hydriques et écologiques du delta central obligent d'entreprendre des études intensives variées et généralisées. De nombreuses données sont heureusement déjà disponibles. Elles concernent, plus particulièrement, le domaine hydrologique. Mais il s'agit de données ponctuelles faites au sol et il est difficile de les extrapoler. Déjà, l'exploitation des couvertures aériennes a permis une certaine approche du problème. Une démarche plus complète est maintenant possible grâce à l'interprétation des couvertures spatiales obtenues régulièrement par les satellites, en particulier par LANDSAT 1. et 2. La disposition de ces documents permet d'expérimenter la combinaison d'une approche globale grâce aux relevés pris à très haute altitude, et les observations et mesures détaillées, mais spatialement limitées, faites au sol. Les possibilités offertes par la documentation satellite, permettent de réduire la masse de travail à effectuer sur le terrain à des proportions raisonnables et, surtout, de donner des vues d'ensemble à des dates rapprochées sur tout le delta, permettant de suivre ainsi l'évolution de la crue, de la végétation naturelle et des cultures grâce à un canevas de points de mesures au sol. Tel est le projet SAPHIR. Rappelons que la saisie des données par satellite est facilitée sur le secteur par l'absence de nuages pendant une grande partie de l'année et que LANDSAT repasse sur les mêmes sites tous les 18 jours.

encore une superficie relative suffisamment importante pour que le problème présente un caractère d'urgence, mais il faudra lui trouver une solution en raison de l'extension rapide de l'opération "riz".

Un autre problème est celui de la compétition entre riz et bourgou. Les paysans pensent logiquement que les bourgoutières correspondent aux meilleures terres à riz, d'où de violents palabres entre cultivateurs et éleveurs. Dans ce domaine aussi, un équilibre est à trouver.

4.2.3. Les problèmes nombreux posés par l'évolution rapide des conditions hydriques et écologiques du delta central obligent d'entreprendre des études intensives variées et généralisées. De nombreuses données sont heureusement déjà disponibles. Elles concernent, plus particulièrement, le domaine hydrologique. Mais il s'agit de données ponctuelles faites au sol et il est difficile de les extrapoler. Déjà, l'exploitation des couvertures aériennes a permis une certaine approche du problème. Une démarche plus complète est maintenant possible grâce à l'interprétation des couvertures spatiales obtenues régulièrement par les satellites, en particulier par LANDSAT 1 et 2. La disposition de ces documents permet d'expérimenter la combinaison d'une approche globale grâce aux relevés pris à très haute altitude, et les observations et mesures détaillées, mais spatialement limitées, faites au sol. Les possibilités offertes par la documentation satellite, permettent de réduire la masse de travail à effectuer sur le terrain à des proportions raisonnables et, surtout, de donner des vues d'ensemble à des dates rapprochées sur tout le delta, permettant de suivre ainsi l'évolution de la crue, de la végétation naturelle et des cultures grâce à un canevas de points de mesures au sol. Tel est le projet SAPHYR. Rappelons que la saisie des données par satellite est facilitée sur le secteur par l'absence de nuages pendant une grande partie de l'année et que LANDSAT repasse sur les mêmes sites tous les 18 jours.

5. CONSISTANCE DES ETUDES.

Les opérations financées par le F.A.C. s'étendent sur deux années. Elles se répartissent comme suit :

5.1. L'ORSTOM est chargé des études hydrologiques. En complément des stations de base du réseau malien renforcé, l'Office a installé une trentaine de stations hydrométriques ou limnimétriques destinées à mieux cerner les modalités de l'écoulement dans le système deltaïque. Des observations précises sont effectuées sur la propagation et le retrait des inondations, les niveaux maximum atteints, les inversions éventuelles d'écoulement dans les bras secondaires, le remplissage et la vidange des lacs, etc. Il est également procédé à des mesures de transports solides et à les études de dynamique fluviale (vitesse d'écoulement ; érosion des berges ; influence des endiguements, des rizières, de la végétation naturelle, du pâturage ; profil en long et pente de la ligne d'eau, etc.). Ces études sont effectuées de façon extensive sur l'ensemble du delta. Elles seront par la suite intensifiées dans les secteurs de déséquilibre qui auront pu être détectés par les prospections au sol et par les travaux d'interprétation des documents de télédétection.

L'ORSTOM doit également installer et exploiter deux stations climatologiques complètes spécialisées pour les mesures d'évaporation.

Il lui incombe enfin d'organiser les campagnes de vérité-terrain :

- à chaque passage du satellite, dans les régions de SEGOU, de MOPTI, de DJENE, de DIRE au nord du lac DEBO et au lac ORO, dans la région de TOMBOUCTOU, enfin à la station de l'IRAT à KOGONI.

- lors des missions sur le terrain, sur des transects qui auront été préalablement identifiés sur les agrandissements au 1/200.000è des images LANDSAT.

- à l'occasion de survols en hélicoptère (une trentaine d'heures) de la zone du delta au cours desquels seront effectués des photographies en couleur.

- En outre, les chercheurs affectés au projet de la F.A.O. sur le "mange-mil", feront un descriptif systématique de l'environnement de leur lieu de prélèvements de graminées, qu'ils se sont bénévolement engagés à remettre au coordinateur du projet SAPHIR.

Les observations effectuées sur des parcelles ou des unités homogènes d'au moins 1 hectare sont consignées sur des questionnaires type où sont décrits :

- les éléments d'identification : repérage, coordonnées géographiques, etc.
- les éléments permanents ou semi-permanents du paysage : position topographique, substratum géologique, nature du sol, objets sur la parcelle, etc.
- les éléments détaillés de l'occupation végétale.
- les conditions climatiques et l'état d'humidité.
- l'environnement de la parcelle ou de l'unité : limites, voies d'accès, etc.
- les indicateurs de structures.

L'ensemble fera l'objet d'une codification et permettra ainsi de constituer un fichier opérationnel de "vérités-terrain" qu'il sera possible de comparer ultérieurement aux valeurs de réflectance observées à partir du satellite.

5.2. Le B.D.P.A. est chargé de l'exploitation des couvertures aériennes et spatiales. Leur interprétation est axée sur les thèmes suivants :

- localisation - par comparaison des couvertures aériennes de 1950-55 et de 1971, ainsi que de la carte des étages floristiques - des zones où la géomorphologie a varié et sur lesquelles seront intensifiées les études de terrain,
- progression du front de crue,
- étude de la queue de décrue,
- étude d'évolution des eaux prisonnières,
- étude des déplacements de dunes,
- étude des surfaces inondées et exondées à chaque passage de LANDSAT,
- évolution en cours d'année de la végétation du delta et de celle du Sahel,
- étude des pâturages (delta en saison sèche, Sahel en saison des pluies),
- évolution des cultures des zones inondées, par rapport à la carte des étages floristiques,
- étude des cultures de décrue,

- localisation des cultures dans le Sahel,
- recherches des zones humides en saison des pluies sur le Sahel (lutte anti-acridienne).

Le report des différents résultats sera fait sous forme thématique sur la base de la carte I.G.N. au 1/200.000 è.

5.3. SYNTHESE.

La synthèse de toutes les observations hydrométriques du Delta Central, des mesures de transports solides, des études au sol de dynamique fluviale ainsi que de l'ensemble du résultat d'interprétation obtenus par le B.D.P.A., sera effectuée par l'ORSTOM.

Elle comprendra :

- En premier lieu un exposé aussi détaillé que possible des modalités de l'écoulement dans les bras principaux, les chenaux secondaires, les plaines d'inondation et les lacs du système deltaïque.

- Un bilan hydraulique quantitatif des principales zones du Delta (les débits entrant et sortant, les volumes stockés, les volumes perdus par évapo-transpiration et infiltration).

- Une analyse des relations des hauteurs et débits observées aux stations principales, en vue de la prévision des apports à l'intérieur et à l'aval du Delta Central.

- Un exposé général de la dynamique fluviale sur l'ensemble du Delta et un exposé plus détaillé sur quelques secteurs clés (lignes d'eau, profil en long, transports solides, érosion, sédimentation, influence de la végétation et des endiguements, action éolienne, etc...).

- Des conclusions sur l'évolution possible du Delta Central dans l'avenir, ses incidences probables sur le régime des crues, l'influence des aménagements hydrauliques.

C'est à la suite de cette phase préliminaire qu'est envisagée l'intervention des disciplines autres qu'hydrologiques pour mener à bien les compléments d'études souhaitables.

6. MOYENS MIS EN OEUVRE.

6.1. Pour les recherches hydrologiques.

Les travaux in-situ incombent à l'équipe hydrologique présente au Mali, aussi bien aux hydrologues de la Direction Générale de l'Hydraulique et de l'Energie du Mali, qu'à leurs collègues de la Mission Hydrologique de l'ORSTOM au Mali, soit un effectif d'au moins trois ingénieurs et six techniciens.

Cette équipe est dotée en propre de tous les moyens techniques nécessaires, aussi bien en équipement (appareils enregistreurs, matériel de mesures hydrométrique, etc...), qu'en logistique pour l'installation des stations d'observations (plus de trente postes nouveaux), ou qu'en moyens de transport (véhicules, bateaux, utilisation d'avions et même, disponibilité de 30 heures d'hélicoptère).

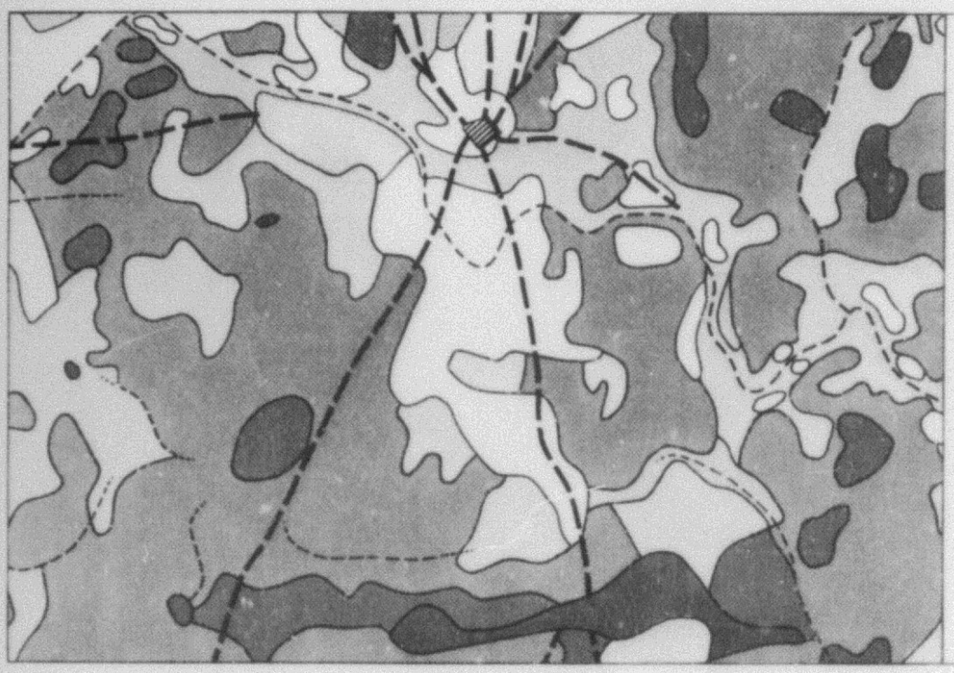
Les travaux d'interprétation hydrologique et de recherche des causes du déséquilibre du régime du Niger, seront effectués au Bureau Central du Service Hydrologique de l'ORSTOM, dans le département de la recherche appliquée ; ce département regroupe un noyau de chercheurs et de techniciens ayant tous une bonne expérience des pays tropicaux et disposant de tous les moyens informatiques nécessaires à l'analyse (atelier mécanographique, lecteur de courbes, programmathèque, accès à deux ordinateurs I.B.M. 370 soit en direct, soit par terminal).

Il utilisera comme documents de base la Monographie Hydrologique du Bassin du Niger publiée en trois parties par l'ORSTOM en 1970 sous la signature de trois auteurs : J. RODIER, CAUVRAY et P. DUBREUIL, ainsi qu'un certain nombre d'études antérieures et notamment une note technique sur les "Modifications du régime hydrologique à Niamey depuis 1961" par J. RODIER et P. CHAPERON.

6.2. Pour les travaux d'interprétation, le B.D.P.A. se basera sur la documentation suivante :

- photographies aériennes,
  . couverture au 1/50.000è de l'Institut Géographique National (I.G.N.) des années 1950-55.

extrait de la CARTE DES ETAGES FLORISTIQUES DANS L'AIRE GREGARIGENE DU DELTA CENTRAL DU NIGER BDP cartogrAphie



TOPOGRAPHIE

Piste

Sentier

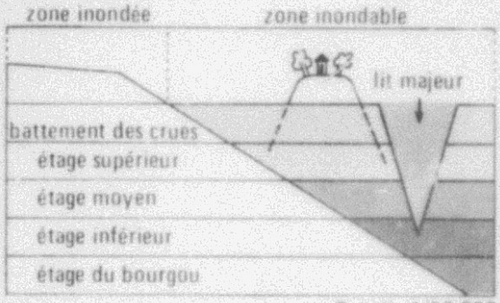
Lieu habité

Culture { en zone inondable / en zone exondée

Hydrographie

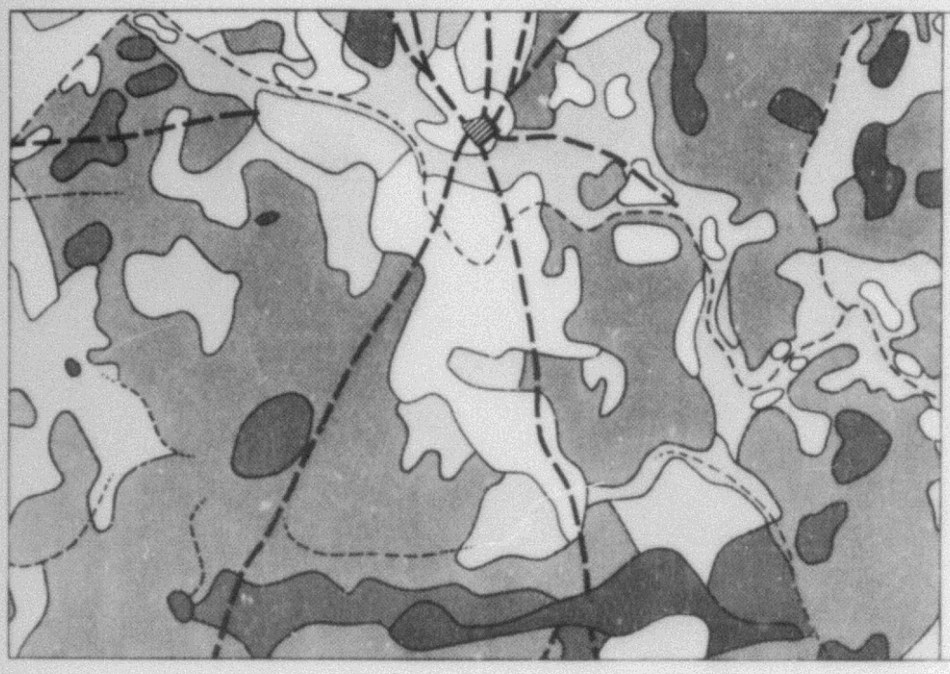
Mare

ETAGES FLORISTIQUES



Echelle 1/50.000

extrait de la CARTE DES ETAGES FLORISTIQUES DANS L'AIRE GREGARIGENE DU DELTA CENTRAL DU NIGER BDP cartogrAphie



TOPOGRAPHIE

Piste

Sentier

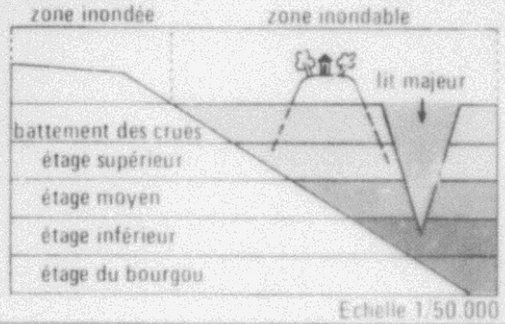
Lieu habité

Culture { en zone inondable / en zone exondée

Hydrographie

Mare

ETAGES FLORISTIQUES



Echelle 1/50.000

. couverture au 1/50.000è du projet PNUD "Lutte Anti-acridienne de 1971, couvrant une partie du delta (35.000 km^2).

. Si nécessaire des compléments de couverture aérienne pourront être demandés à l'I.G.N.

- Cartographies :

. cartes au 1/200.000 de l'I.G.N.,

. carte au 1/50.000 dite "des étages floristiques", issue de la photographie de 1971 et établie par le B.D.P.A.

- Imagerie spatiale :

. toute l'imagerie d'ERTS-1 recueillie depuis le lancement du satellite en juillet 1972 qu'il est possible d'acquérir auprès de la NASA,

. l'imagerie de LANDSAT 2 que la NASA sera en mesure de fournir avant l'achèvement des travaux et plus particulièrement :

- les transparents négatifs, noir et blanc, 70 x 70 mm des canaux 4-5-6-7 du scanner multispectral.
- les transparents positifs, noir et blanc, 240 x 240 mm, des mêmes canaux et les mêmes documents sur papier,
- les bandes digitalisées MSS.

Pour le traitement informatique de l'imagerie spatiale il sera fait appel au concours du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), ou, éventuellement, à d'autres spécialistes du traitement d'images.

7. RESULTATS ATTENDUS.

La République du Mali et aussi la République du Niger attendent beaucoup de cette étude. Les enseignements seront également précieux pour les chercheurs et spécialistes chargés dans l'avenir de problèmes comparables.

Les travaux sur le delta central seront menés suivant deux optiques complémentaires :

- des recherches essentiellement méthodologiques,
- des interprétations spécifiques à la zone d'étude .

TRAITEMENT DE PHOTOGRAPHIE LANDSAT

Équidensités colorées par système vidéo : DIGICOL

CANAL 7 ≙ 1/600000

La scène englobe une partie du complexe hydrographique de rive droite du Niger juste en aval du lac Débo. Il s'agit d'un système hydrographique marqué par un tracé en baïonnette du réseau entre des alignements dunaires orientés approximativement E/W , ces formations dunaires apparaissant en orange, vert, jaune et bleu.

Ce qui doit retenir l'attention ici est la différenciation qui s'établit dans le réseau hydrographique et qui est imperceptible à la lecture des clichés N et B.

Les talwegs ou lacs en eau libre apparaissent en violet/magenta. Les zones encore très humides mais sans eau libre ont une couleur marron.



gris

bleu | + clair
jaune
vert
orange
rouge
brun
violet
magenta | + foncé

réalisé par le B.D.P.A.

SAPHIR devrait ainsi fournir :

- une méthodologie applicable au contrôle des grands systèmes hydrologiques à zones inondées et en équilibre géomorphologique peu stable.

- une connaissance approfondie du système deltaïque du bassin du Niger.

- un nouveau modèle de prévision des apports et des crues.

- des règles hydrologiques pour la planification d'aménagements agricoles.

- des éléments nouveaux pour une meilleure connaissance de cette région dans les domaines de l'agronomie, de l'écologie et des productions végétales,

- et, d'une façon plus générale, l'élaboration de méthodes optimalisées d'utilisation de l'information spatiale pour la connaissance, la mise en valeur et la gestion de l'espace rural en milieu tropical.

SAPHIR devrait ainsi fournir :

- une méthodologie applicable au contrôle des grands systèmes hydrologiques à zones inondées et en équilibre géomorphologique peu stable.

- une connaissance approfondie du système deltaïque du bassin du Niger.

- un nouveau modèle de prévision des apports et des crues.

- des règles hydrologiques pour la planification d'aménagements agricoles.

- des éléments nouveaux pour une meilleure connaissance de cette région dans les domaines de l'agronomie, de l'écologie et des productions végétales,

- et, d'une façon plus générale, l'élaboration de méthodes optimalisées d'utilisation de l'information spatiale pour la connaissance, la mise en valeur et la gestion de l'espace rural en milieu tropical.

Vu par le Centre National
de Documentation Agricole
00243

Séminaire de sensibilisation
"TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"
Tunis, 29-30 octobre 1975

ESSAI DE SYNTHESE SUR LES POSSIBILITES DE LA TELEDETECTION NOTAMMENT EN RAPPORT AVEC LES BESOINS DES PAYS MEDITERRANEENS EN COURS DE DEVELOPPEMENT

par

Gilbert LONG

Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques
Louis Emberger

C. N. R. S.

Montpellier

Montpellier, octobre 1975

Séminaire de sensibilisation
LEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES"
Tunis, 29-30 octobre 1975

ESSAI DE SYNTHESE SUR LES POSSIBILITES DE LA TELEDETECTION NOTAMMENT EN RAPPORT AVEC LES BESOINS DES PAYS MEDITERRANEENS EN COURS DE DEVELOPPEMENT

par

Gilbert LONG

Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques
Louis Emberger

C. N. R. S.

Montpellier

Montpellier, octobre 1975

PLAN

Page

Préambule.....

1. Les territoires écologiques homogènes ou entités majeures de l'écosphère..... 4

2. Les niveaux de perception écologique, les niveaux d'intégration et les échelles d'expression cartographique... 10

3. Les nations..... 14

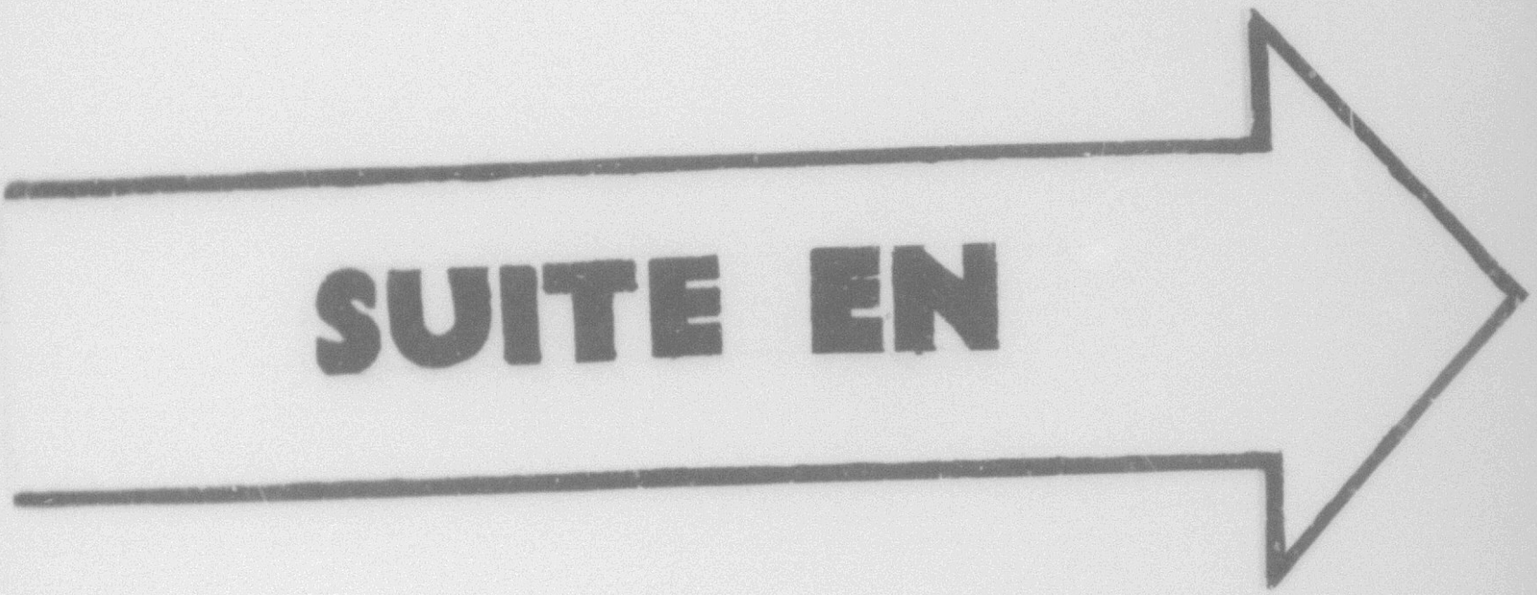
4. Les solutions applicables et les moyens généraux à mobiliser..... 19

5. Définition des priorités..... 23

6. Planification des projets..... 26

7. Possibilités et limitations de la télédétection, en particulier pour le recensement et le suivi des ressources agricoles..... 28

Références bibliographiques citées..... 30



F 6

MICROFICHE N°

00230

République Tunisienne

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

CENTRE NATIONAL DE

DOCUMENTATION AGRICOLE

TUNIS

الجمهورية التونسية

وزارة الفلاحة

المركز القومي
للتوثيق الفلاحي

تونس

F 6

ESSAI DE SYNTHESE SUR LES POSSIBILITES DE LA TELEDETECTION, NOTAMMENT EN RAPPORT AVEC LES BESOINS DES PAYS MEDITERRANEENS EN COURS DE DEVELOPPEMENT

par
Gilbert LONG
CEPE/CNRS, Montpellier

PREAMBULE

Je m'efforcerai d'aborder cet essai de synthèse en essayant de me placer dans la position d'un utilisateur réel des techniques de télédétection des ressources terrestres, déjà convaincu de l'impact de ces techniques pour la connaissance et l'évaluation des ressources, mais désireux de définir *les éléments d'une stratégie propre aux pays qui ne disposent pas directement de telles techniques*, et qui peuvent être amenés à décider d'en bénéficier, dans le cadre de la mise en oeuvre de programmes de coopération scientifique et technique, ou pour satisfaire des objectifs strictement opérationnels.

L'expérience que j'ai de certains pays en cours de développement, ou de certaines régions peu développées des pays industrialisés, ou de pays et de régions à faible potentiel technologique avancé mobilisable, me conduira à faire des observations générales destinées principalement à alimenter le débat sur l'applicabilité et l'intérêt de la télédétection dans de tels pays ou de telles régions.

Dans la mesure du possible, j'essaierai d'adopter une attitude très pragmatique, en ne négligeant pas cependant de développer des considérations générales aptes à esquisser les contours d'une politique d'action en cette matière.

Etant donné la complexité même du sujet -qui concerne un grand nombre de ressources et de techniques- je souhaiterais tout d'abord éclairer

le débat, dans un souci de rationalité sans doute discutable, d'un faisceau *d'hypothèses et de propositions simplificatrices et hiérarchisées*. J'utiliserai dans ce but l'approche bien connue qui consiste à déterminer à priori *divers niveaux ou diverses classes* d'une variable, d'une propriété ou d'une caractéristique définie.

Ainsi, si l'on part de l'hypothèse que les frontières des nations n'existent pas, mais que l'on tienne compte cependant du fait écologique, historique et actuel, le plus important de la biosphère, l'*Homme*, on sera conduit, en tout premier lieu, à tenter de *définir des territoires écologiques homogènes*, présentant pour leurs attributs des caractéristiques générales identiques -à quelques nuances près- et reproductibles ; ces territoires seront caractérisés succinctement dans le *chapitre 1* ci-après.

Ils pourront être examinés à leur tour à divers *niveaux de perception écologique* et être décrits, pour chacun des niveaux considérés, grâce à la mise en oeuvre de divers moyens techniques d'observation et de mesure, *dont la télédétection*, d'analyse et de synthèse. Ces moyens, employés à bon escient, permettront de caractériser des *niveaux d'intégration* pour les variables et les unités considérées et conduiront à des *expressions cartographiques polythématiques aux diverses échelles*. L'ensemble de ces questions sera examiné succinctement dans le *chapitre 2* ci-après.

Mais il est raisonnable d'admettre le *fait politique*. En conséquence, les territoires -grandes entités écologiques relativement homogènes de l'écosphère- seront souvent *compartimentés* par le jeu des limites politiques (frontières) des *territoires nationaux et de leurs subdivisions administratives historiques ou actuelles*. Il est évident, en effet, que les *conditions socio-économiques et culturelles* qui ont conduit à l'appropriation progressive des terres et au développement rural ou régional, s'inscrivent aussi dans *les modes de répartition des variables "ressources terrestres"* que nous souhaitons recenser, décrire et évaluer. Par conséquent, nous essaierons de voir comment la variable *"nation"* peut conduire à une problématique particulière pour la définition d'une stratégie ayant recours à la télédétection. Dans ce but, nous proposerons au *chapitre 3* une typologie des "nations" basée sur des considérations très pratiques et réelles : niveaux de développement, démographie, besoins socio-économiques, état général des ressources, objectifs possibles de développement.

le débat, dans un souci de rationalité sans doute discutable, d'un faisceau *d'hypothèses et de propositions simplificatrices et hiérarchisées*. J'utiliserai dans ce but l'approche bien connue qui consiste à déterminer à priori *divers niveaux ou diverses classes* d'une variable, d'une propriété ou d'une caractéristique définie.

Ainsi, si l'on part de l'hypothèse que les frontières des nations n'existent pas, mais que l'on tienne compte cependant du fait écologique, historique et actuel, le plus important de la biosphère, l'*Homme*, on sera conduit, en tout premier lieu, à tenter de *définir des territoires écologiques homogènes*, présentant pour leurs attributs des caractéristiques générales identiques -à quelques nuances près- et reproductibles ; ces territoires seront caractérisés succinctement dans le *chapitre 1* ci-après.

Ils pourront être examinés à leur tour à divers *niveaux de perception écologique* et être décrits, pour chacun des niveaux considérés, grâce à la mise en oeuvre de divers moyens techniques d'observation et de mesure, *dont la télédétection*, d'analyse et de synthèse. Ces moyens, employés à bon escient, permettront de caractériser des *niveaux d'intégration* pour les variables et les unités considérées et conduiront à des *expressions cartographiques polythématiques aux diverses échelles*. L'ensemble de ces questions sera examiné succinctement dans le *chapitre 2* ci-après.

Mais il est raisonnable d'admettre le *fait politique*. En conséquence, les territoires -grandes entités écologiques relativement homogènes de l'écosphère- seront souvent *compartimentés* par le jeu des limites politiques (frontières) des *territoires nationaux et de leurs subdivisions administratives historiques ou actuelles*. Il est évident, en effet, que les *conditions socio-économiques et culturelles* qui ont conduit à l'appropriation progressive des terres et au développement rural ou régional, s'inscrivent aussi dans *les modes de répartition des variables "ressources terrestres"* que nous souhaitons recenser, décrire et évaluer. Par conséquent, nous essaierons de voir comment la variable *"nation"* peut conduire à une problématique particulière pour la définition d'une stratégie ayant recours à la télédétection. Dans ce but, nous proposerons au *chapitre 3* une typologie des "nations" basée sur des considérations très pratiques et réelles : niveaux de développement, démographie, besoins socio-économiques, état général des ressources, objectifs possibles de développement.

le débat, dans un souci de rationalité sans doute discutable, d'un faisceau *d'hypothèses et de propositions simplificatrices et hiérarchisées*. J'utiliserai dans ce but l'approche bien connue qui consiste à déterminer à priori *divers niveaux ou diverses classes* d'une variable, d'une propriété ou d'une caractéristique définie.

Ainsi, si l'on part de l'hypothèse que les frontières des nations n'existent pas, mais que l'on tienne compte cependant du fait écologique, historique et actuel, le plus important de la biosphère, l'*Homme*, on sera conduit, en tout premier lieu, à tenter de *définir des territoires écologiques homogènes*, présentant pour leurs attributs des caractéristiques générales identiques -à quelques nuances près- et reproductibles ; ces territoires seront caractérisés succinctement dans le *chapitre 1* ci-après.

Ils pourront être examinés à leur tour à divers *niveaux de perception écologique* et être décrits, pour chacun des niveaux considérés, grâce à la mise en oeuvre de divers moyens techniques d'observation et de mesure, *dont la télédétection*, d'analyse et de synthèse. Ces moyens, employés à bon escient, permettront de caractériser des *niveaux d'intégration* pour les variables et les unités considérées et conduiront à des *expressions cartographiques polythématiques aux diverses échelles*. L'ensemble de ces questions sera examiné succinctement dans le *chapitre 2* ci-après.

Mais il est raisonnable d'admettre le *fait politique*. En conséquence, les territoires -grandes entités écologiques relativement homogènes de l'écosphère- seront souvent *compartimentés* par le jeu des limites politiques (frontières) des *territoires nationaux et de leurs subdivisions administratives historiques ou actuelles*. Il est évident, en effet, que les *conditions socio-économiques et culturelles* qui ont conduit à l'appropriation progressive des terres et au développement rural ou régional, s'inscrivent aussi dans *les modes de répartition des variables "ressources terrestres"* que nous souhaitons recenser, décrire et évaluer. Par conséquent, nous essaierons de voir comment la variable *"nation"* peut conduire à une problématique particulière pour la définition d'une stratégie ayant recours à la télédétection. Dans ce but, nous proposerons au *chapitre 3* une typologie des "nations" basée sur des considérations très pratiques et réelles : niveaux de développement, démographie, besoins socio-économiques, état général des ressources, objectifs possibles de développement.

1. LES TERRITOIRES ECOLOGIQUES HOMOGENES OU ENTITES MAJEURES DE L'ECOSPHERE (Milieux terrestres seulement)*

Nous proposons de retenir ici la typologie suivante (T pour "Territoire") dont l'essentiel est schématisé dans la *figure 1.*

T1 - TERRITOIRES NON DEVELOPPES OU INACCESSIBLES A FORT POTENTIEL BIOTIQUE (BIOTIQUE DE RESERVE)

On considère deux sous-types :

T1a. *Territoires volontairement laissés en réserve, proches des conditions climaciques (climax) mais cependant aptes à être mis en production en raison de leur accessibilité*

Caractères principaux :

- . zonalité écologique générale très perceptible ;
- . ordre naturel dominant (homéostase, qualité, structure et information élevées, entropie faible...) ;
- . généralement : écosystèmes de protection et de réserve.

Commentaire :

ces territoires sont faciles à détecter et identifier dans la mesure où ils recouvrent des superficies suffisantes.

T1b. *Territoires relativement vierges, très peu artificialisés (cueillette), à potentiel biotique intéressant, mais souvent inacessibles.*

Caractères principaux :

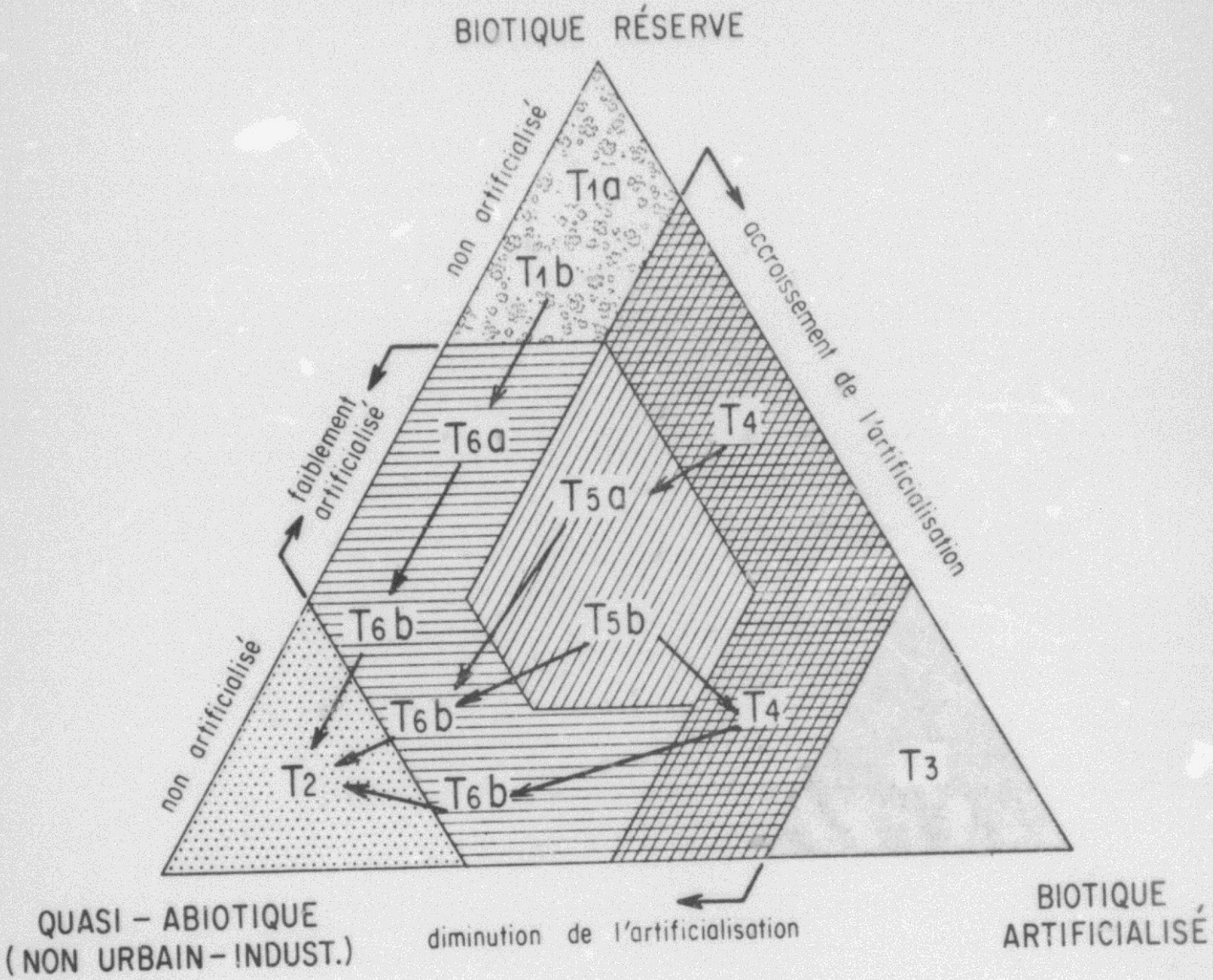
- . zonalité écologique très forte ; ou azonalité nette ;
- . ordre naturel dominant dû à l'impact prépondérant du climat, ou du sol, ou de l'eau, ou d'une combinaison de 2 ou 3 de ces variables prépondérantes ;
- . écosystèmes de protection, ou de réserve, ou de "cueillette" ("scientifique", ou pour des usages domestiques locaux).

Commentaire :

certains de ces territoires sont caractérisés par des couvertures nuageuses importantes et fréquentes rendant inopérantes les techniques classiques de télédétection dans le visible (cf. Amazonie).

---

* Les milieux strictement urbains-industriels et les milieux aquatiques ne sont pas examinés dans la typologie qui est proposée ici. Il y aurait donc lieu de faire des adaptations pour de tels milieux.



(Les flèches situées à l'intérieur du triangle suggèrent le sens de la dynamique régressive, tendant à réduire la valeur biotique du milieu)

Figure 1 – Les territoires écologiques majeurs de la biosphère

T2 - TERRITOIRES PEU DEVELOPPES, SAUF LOCALEMENT, QUASI ABIOTIQUES, A FAIBLE PRODUCTIVITE BIOLOGIQUE GENERALE, NON URBAINS-INDUSTRIELS

Caractères généraux :

Ces territoires correspondent aux zones écologiques où la *loi des extrêmums* joue un grand rôle (absence d'eau ; excès de froid, de chaleur, etc...).

Sont compris dans ce type : les hauts étages des montagnes, les vrais déserts, la périphérie des zones glaciaires actuelles. Ces territoires sont généralement peu développés, non artificialisés sur le plan des productions biologiques végétales et animales. Une exception cependant, *les oasis*, dans les zones désertiques, qui bénéficient d'apports d'eau exogènes, rendant la production primaire à haut rendement possible (sous certaines réserves).

Commentaire :

la télédétection est assez efficace pour l'étude des variables physiques de ces milieux ; elle se révèle plus difficile, dans certains cas, quand on tient compte du fait que la couverture végétale, à l'exception des systèmes "oasis", est plutôt faible, sauf en certaines saisons ; le développement général est de type souvent *très extensif* (exploitation pastorale et agricole "saisonnière").

T3 - TERRITOIRES DEVELOPPES, FORTEMENT ARTIFICIALISES, A FORTE PRODUCTIVITE BIOLOGIQUE, NON URBAINS-INDUSTRIELS

Caractères généraux :

. zonalité écologique générale non immédiatement perceptible ;

. ordre artificiel dominant (nécessité de connaître et de comprendre les activités humaines), généralement le reflet de bonnes conditions d'exploitation des ressources en terres, en eaux et biologiques (végétales et animales), mais assez souvent le siège de déséquilibres écologiques graves (érosion anthropique, salinisation, eutrophisation...) ;

. écosystèmes de production, de type agro-industriel ;

. parcellaires très complexes et changeants, de petites dimensions et polymorphes (pays de vieille tradition agricole), ou de grandes dimensions et plutôt à structure simple (pays ayant maîtrisé leur structure foncière).

Commentaire :

il est évident que c'est, *a priori*, pour de tels territoires que la télédétection est susceptible de rendre les plus éminents services (suivi de l'état des cultures, des sols, des eaux de surface etc...) ; toutefois, c'est également dans ce cas qu'elle présentera le coût le plus élevé, en raison même de la complexité et de l'instabilité des phénomènes de la surface à recenser et, consécutivement, de la nécessité de mettre en oeuvre une approche complexe, facilitant des opérations simultanées à l'aide de plateformes spatiales et aéroportées, accompagnées de contrôles au sol très méticuleux (stations de mesure de paramètres micrométéorologiques, physiologiques...). Là plus qu'ailleurs, semble-t-il, le rapport coût/bénéfice devra être déterminé avec précision.

T4 - TERRITOIRES DEVELOPPES, MOYENNEMENT ARTIFICIALISES, A PRODUCTIVITE BIOLOGIQUE OPTIMALE

Caractères généraux :

. zonalité écologique générale relativement perceptible ;

. ordre artificiel dominant, mais visiblement ajusté par rapport à l'ordre naturel détectable, ce qui est le reflet d'une utilisation rationnelle des ressources ;

. écosystèmes de production prédominants, mais non exclusifs, de type "agriculture semi-extensive" ;

. parcellaires complexes, épousant les particularités des milieux naturels, avec tendance aux grandes dimensions.

Commentaire :

La télédétection des unités de tels territoires s'avère plus facile que dans le cas précédent et, en tous cas, elle est moins onéreuse. Les indicateurs bio-écologiques de la surface ne manquent pas et sont souvent détectables avec une bonne persistance dans le temps. La priorité peut être donnée à la mise en place d'un système réellement opérationnel de contrôle permanent de l'état des ressources.

T5 - TERRITOIRES PEU DEVELOPPES, IRREGULIEREMENT ARTIFICIALISES, A PRODUCTIVITE BIOLOGIQUE GENERALE EN REGRESSION NOTABLE

On considère deux sous-types :

T5a. *Territoires en cours de déshumanisation dans les pays industrialisés*

Caractères principaux :

- zonalité écologique générale en partie *masquée* par le fait que des seuils d'irréversibilité ont été atteints dans la succession écologique ;
- anarchie relative de la dynamique végétale, avec cependant prépondérance d'un ordre naturel commandé par les espèces les plus sociales, spontanées ou subspontanées (introduites) ;
- écosystèmes à utilisation polyvalente, en conditions d'exploitation agro-sylvo-pastorale extensive, aptes à être ré-aménagés, notamment dans une perspective d'intégration urbaine-rurale ;
- territoires subissant des atteintes localisées dues à l'urbanisation "sauvage", aux feux de végétation ou aux grands ouvrages (autoroutes, etc...) ; parcellaires hérités, en partie masqués.

Commentaire :

La télédétection nécessite des opérations complexes faisant intervenir différentes plateformes, différents senseurs et des analyses à diverses saisons ; les activités de vérité-terrain sont importantes. Bien souvent, de tels territoires sont situés à proximité de territoires très artificialisés qui justifient également une approche lourde et complexe de la télédétection.

T5b. *Territoires ayant été plus ou moins développés dans le passé, mais usés par suite de l'appropriation ancienne des terres et de l'absence de restitutions organiques et minérales, subissant encore de nos jours une pression humaine soutenue.*

Caractères principaux :

- zonalité écologique générale masquée par la dégradation quasi totale des systèmes écologiques ; substrats physiques assez apparents ;
- ordre naturel anarchique, confrontant l'ordre artificiel selon des modes imprévisibles ;

2. LES NIVEAUX DE PERCEPTION ECOLOGIQUE, LES NIVEAUX D'INTEGRATION ET LES ECHELLES D'EXPRESSION CARTOGRAPHIQUE

Les territoires que nous venons de définir sont surtout caractérisés sur la base de leur *degré d'artificialisation* du milieu ou de la couverture végétale et, corrélativement, sur la base d'une *évaluation de la capacité de production primaire* (végétale). Ces deux groupes de variables sont considérées par rapport aux *activités et à l'impact de l'homme*, ce dernier jouant un rôle écologique majeur dans la nature, et la distribution de certaines ressources essentielles (terres, eaux, ressources agricoles, forestières, pastorales) en dépendant.

Dans ce chapitre, nous ferons apparaître une typologie de type holistique, plus globalisante : toutes les variables physiques et biotiques peuvent participer à la définition des niveaux qui sont proposés. Toutefois, nous avons donné un sens *écologique* à notre démarche, ce qui exclut du tableau ci-joint des variables qui ressortissent à certaines ressources (par ex. minérales) n'ayant pas un rôle écologique évident.

Il conviendrait par conséquent de compléter ce tableau pour de telles variables, en s'inspirant, si possible, de la même approche hiérarchisée que nous proposons.

Un même territoire écologique homogène (cf. *chapitre 1*), peut contenir toutes les conditions et les unités décrites dans le *tableau 1* (pour plus de détails, se reporter à (G. LONG, 1974 (1)). Il peut donc être ausculté avec plus ou moins de finesse et de précision. A chaque niveau (lignes du tableau), la nature des variables qui entrent en jeu peut changer, de même que leur définition. Ainsi, si l'on considère la variable synthétique "*sol*", une perception *régionale* pourrait se suffire de l'indication des *catégories lithologiques* (calcaire, non calcaire ...), alors que le niveau *stationnel* implique une caractérisation des *conditions hydriques et trophiques* (fertilité) du profil du sol.

L'intérêt essentiel de la démarche proposée réside principalement dans le fait que l'on dispose ainsi d'un moyen rationnel :

- *pour établir un plan d'échantillonnage stratifié des variables à recenser, donc pour réaliser des inventaires ;*
- *pour généraliser des résultats interprêtés.*

(1) LONG, G., 1974 - Diagnostic phyto-écologique et aménagement du territoire. Masson édit. Paris, tome 1.

Tableau 1 — NIVEAUX DE PERCEPTION ÉCOLOGIQUE [in G. LONG, 1974]

Niveaux de perception écologique	*Unités de végétation concrètes*	*Variables écologiques prépondérantes* (non exhaustif)	*Niveaux d'intégration ou d'organisation*	*Echelles d'expression cartographique* (région tempérée-France) ordres de grandeur
ZONE ÉCOLOGIQUE	GRANDS TYPES DE VÉGÉTATION (ex. zone des forêts sclérophylles sempervirentes...)	latitude : positions relatives des masses continentales et marines et des grands massifs montagneux ; climat général	écosystèmes zonaux ; biomes	1/10 000 000 et + petit (très petite échelle)
RÉGION ÉCOLOGIQUE	TYPES DE VÉGÉTATION (ex. maquis, garrigues...)	relief général ; climat régional ; unités géomorphologiques majeures ; homme	écosystèmes régionaux ; domaines de l'utilisation du sol	1/1 000 000, 1/500 000 (petite échelle)
SECTEUR ÉCOLOGIQUE	GRANDES FORMATIONS VÉGÉTALES (ex. divers maquis ou garrigues...)	positions topographiques ; climats locaux ; types de formations superficielles ; conditions d'exploitation des ressources	écosystèmes au niveau du secteur ; unités de l'occupation des terres	1/250 000 à 1/50 000 (moyenne échelle)
STATION ÉCOLOGIQUE	FORMATIONS VÉGÉTALES en pays *faiblement* influencé par l'homme et/ou FORMES DE VÉGÉTATION en pays *fortement* influencé par l'homme	micro-relief ; variables édaphiques ; action de l'homme et des animaux	écosystèmes stationnels ; unités de l'occupation des terres et des sols	1/25 000, 1/10 000... et + grand (grande échelle)
ELÉMENT DE STATION ÉCOLOGIQUE	portions de formations végétales ou de formes de végétation	variables micro-climatiques et micro-édaphiques ; variables biotiques (y compris action des micro-organismes)	portions d'écosystèmes stationnels ; éléments d'occupation des terres et des sols	1/500-1/1 (très grande échelle)

Ainsi, les activités de télédétection qui auront été conduites avec succès sur telle ou telle zone-test d'une région écologique donnée, ou d'un secteur écologique donné, pourront conduire à la définition correcte d'une stratégie applicable à l'ensemble des territoires présentant les mêmes caractéristiques, au niveau de précision requis.

On pourrait démontrer en outre qu'en ce qui concerne *l'expression cartographique des résultats*, le problème du *choix des échelles* (cf. dernière colonne du *tableau 1*), dans l'optique que nous avons envisagée, est une question importante qui doit être examinée en ayant clairement en vue *la valeur relative de la notion d'échelle*. Ainsi, telle échelle, applicable par exemple au *thème des ressources pastorales*, qui peut être considérée comme une "*grande* échelle" dans un cas (ex : dans les zones désertiques, où le mode de distribution des unités se satisfait d'expressions au 1/100 000, 1/250 000, 1/500 000) sera une "échelle *moyenne*" ou une "*petite* échelle" ailleurs (ex : dans les zones à précipitations plus élevées du N. de la Tunisie). Autrement dit, le *même thème conçu avec le même niveau de précision pour les unités qui l'expriment, peut faire l'objet de représentations équivalentes à des échelles différentes, selon l'hétérogénéité spatiale des unités ainsi recensées et les modes de distribution des variables qui permettent de les identifier.*

C'est en effet la nature même des "cibles de la télédétection" et de leur mode d'agrégation qui imposent le choix d'une échelle de représentation cartographique et, par contre coup, commandent les opérations éventuelles de télédétection. En raison du fait que l'exploitation efficace des données de la télédétection est *limitée par la qualité globale des signaux enregistrés* et, entre autres, par les résolutions spectrale et surtout, spatiale, des systèmes mis en oeuvre, il est bon de se souvenir que la cartographie thématique a, elle aussi, des limites pratiques d'expression graphique. L'on considère, en effet, qu'une carte thématique qui ne serait que l'accumulation de toutes petites unités cartographiques de moins de 1/4 de cm^2 sur la carte ou, au contraire, qui exprimerait la juxtaposition de vastes unités cartographiques de plus de 5 ou 10 cm^2 sur la carte, devrait être jugée comme une oeuvre à propos de laquelle l'auteur de la carte aurait commis une erreur dans le choix de l'échelle. Le *tableau 2* rassemble les données, au demeurant assez banales, qui permettent de prendre une décision raisonnable.

. Rappelons que la résolution spatiale annoncée, par exemple pour le MSS de LANDSAT 1 ou 2, ne doit pas faire illusion ; en effet, il est assez

Tableau 2 — CORRESPONDANCE DES « SURFACES CARTE » ET DES « SURFACES TERRAIN » AUX DIVERSES ÉCHELLES (in G. LONG, 1974)

Rapports entre les surfaces sur la carte et les surfaces réelles en fonction des échelles des cartes

	1/4 cm2	1/2 cm2	1 cm2	100 cm2	1/4 m2	1/2 m2	1 m2
très grandes							
1/1 000	25 m2	50 m2	100 m2	1 ha	25 ha	50 ha	100 ha
1/2 000	100 m2	200 m2	400 m2	4 ha	100 ha	200 ha	400 ha
1/2 500	156,25 m2	312,5 m2	625 m2	6,25 ha	156,25 ha	312,50 ha	625 ha
grandes							
1/5 000	625 m2	1250 m2	2500 m2	25 ha	625 ha	1250 ha	2500 ha
1/10 000	2500 m2	5000 m2	1 ha	100 ha	2500 ha	5000 ha	10000 ha
1/15 000	5675 m2	1,125 ha	2,25 ha	225 ha	5675 ha	11250 ha	22500 ha
1/20 000	1 ha	2 ha	4 ha	400 ha	10000 ha	20000 ha	40000 ha
1/25 000	1,5625 ha	3.125 ha	6,25 ha	625 ha	15625 ha	31250 ha	62500 ha
moyennes							
1/50 000	6,25 ha	12,5 ha	25 ha	2500 ha	62500 ha	125000 ha	250000 ha
1/100 000	25 ha	50 ha	100 ha	10000 ha	250000 ha	500000 ha	1000000 ha
1/200 000	100 ha	200 ha	400 ha	40000 ha	1000000 ha	2000000 ha	4000000 ha
1/250 000	156,25 ha	312,5 ha	625 ha	62500 ha	1562500 ha	3125000 ha	6250000 ha
petites							
1/500 000	625 ha	1250 ha	2500 ha	250000 ha	6250000 ha	12.5 M.ha	25 M.ha
1/1 000 000	2500 ha	5000 ha	10000 ha	1000000 ha	25 M.ha	50 M.ha	100 M.ha
très petites							
1/5 000 000	62500 ha	125000 ha	250000 ha	25 M.ha	6,25 M.km²	12.5 M.km²	25 M.km²
1/10 000 000	250000 ha	500000 ha	1000000 ha	100 M.ha	25 M.km2	50 M.km²	100 M.km²

Remarque : les séparations entre catégories d'échelles (très grandes, grandes...) sont données à titre indicatif

improbable d'avoir une "*réponse thématique unique*" (1 seule cible détectée) avec la résolution proposée (80 m x 80 m = 6400 m^2), en raison même de la variabilité des systèmes écologiques autant que des paramètres d'acquisition des données. Dans cet ordre d'idées, un projet de relevé systématique des signatures spectrales ne présente que peu d'intérêt, sauf cas très particuliers.

3. LES NATIONS

Comme nous l'avons dit, il ne serait pas raisonnable de déterminer les grands axes d'une stratégie applicable à la télédétection des ressources terrestres en ignorant certaines réalités politiques. Dans le présent chapitre nous proposons une typologie qui présente l'intérêt de souligner le *fait politique* de l'écosphère, c'est-à-dire son compartimentage en fonction des limites des nations ou des ensembles de nations reconnus comme tels en raison de l'identité générale de leurs choix socio-économiques ou culturels.

Les *contraintes* à prendre en considération seront indiquées succinctement pour chaque cas ; elles sont de nature à conditionner largement la *prise de décision*, nationale ou internationale, en matière de télédétection des ressources terrestres, notamment en considérant le fait essentiel que les moyens proposés, pour la télédétection à partir de l'espace, le sont à partir des propositions d'un très petit nombre de nations qui sont considérées, à tort ou à raison, comme susceptibles de profiter de leur avance technologique en la matière. Chacun est libre de raisonner à sa manière sur ce thème qui, de toute évidence, conditionne la décision de certains pays à coopérer, ou non, aux programmes proposés par des organismes étrangers, nationaux, multinationaux ou internationaux.

Voici la typologie proposée (N pour "Nations") :

N1 - NATIONS DEVELOPPEES AYANT FAIT LEUR DECOLLAGE AGRO-INDUSTRIEL, INDIVIDUELLEMENT POURVUES DES MOYENS MODERNES DE LA TELEDETECTION OU CAPABLES DE LES OBTENIR ± FACILEMENT PAR VOIE DE COOPERATION

Selon la configuration de l'espace national, le niveau d'utilisation des ressources et l'orientation des modèles de croissance de ces nations, on peut caractériser les territoires de ces nations par leur valeur d'usage actuelle ou potentielle. Le contenu propre de chacun de ces territoires et

l'affectation de nouvelles valeurs d'usage de l'espace imposent des *choix technologiques* divers susceptibles de conduire à des *décisions variées*, que nous ne pouvons pas expliciter ici, en raison des nombreux cas particuliers en cause.

On pourrait cependant distinguer les *4 sous-types* suivants :

N1a - *Nations développées du "Nouveau Monde" (en général), avec de grands espaces en réserve*

- vastes espaces en réserve, ou sous-exploités, juxtaposés à des espaces où les productions agro-sylvo-pastorales sont intensifiées (type agro-industriel) ;
- zone de loisirs de masse largement disponibles et très dispersées sur le territoire national ;
- ressources naturelles (terres, eaux, forêts...) maîtrisées chaque fois qu'elles présentent un intérêt socio-économique évident.

N1b *Nations développées du "Vieux Monde" (en général), avec de faibles espaces en réserve*

- déshumanisation de l'espace rural anciennement approprié et appauvri ; coexistence de ces espaces déshumanisés avec des espaces très intensifiés (type agro-industriel) ;
- zones de loisirs de masse disponibles en quantités limitées et localisées ;
- ressources naturelles non complètement maîtrisées.

N1c *Nations développées très artificialisées, sans espace en réserve*

- forte urbanisation générale, y compris de l'espace rural, coexistant avec une agriculture très artificialisée ;
- zones de loisirs de masse très limitées mais fortement équipées ;
- ressources naturelles très intensivement maîtrisées

N1d *Nations développées très artificialisées, sans espace agricole ou de réserve*

- forte urbanisation générale, y compris de l'espace rural, avec une agriculture moyennement intensive (agriculture amalgamée) ;
- zones de loisirs de masse très limitées, peu diversifiées et faiblement équipées ;
- ressources naturelles incomplètement maîtrisées.

N2 - NATIONS EN COURS DE DEVELOPPEMENT SITUEES A PROXIMITE DE NATIONS DEVELOPPEES, APTES A LEUR FOURNIR EVENTUELLEMENT UNE CLIENTELE LOISIRS DE MASSE

Quelle que soit leurs options socio-économiques fondamentales (par ex. indépendance économique totale, ou liaisons privilégiées avec certains marchés extérieurs ; ou satisfaction prioritaire des besoins alimentaires ; ou développement industriel prioritaire...) , ces nations *occupent naturellement une position géographique particulière* en ce qui concerne le développement de leurs ressources naturelles.

En effet, même si les ressources minières, hydrauliques, agro-pastorales, etc. sont analogues à celles des territoires des nations développées, à quelques nuances près, il n'en reste pas moins que ces nations sont appelées à considérer le rôle important de leur espace national en tant que zone d'accueil des loisirsde masse.

On doit d'ailleurs se demander si, dans les perspectives des prochaines décennies, une politique de décollage industriel autonome à tout prix est la seule qui soit concevable pour quelques-unes de ces nations. On connaît déjà des nations *développées* qui ont pour première industrie celle du tourisme ou du secteur tertiaire. Il est sans doute prématuré de porter un jugement valable sur ce débat, mais il vaut la peine d'y penser pour des projets de développement régional dans telle ou telle partie *attractive* des territoires nationaux où il serait possible de faire coexister des formes complémentaires, intégrées, d usage général des ressources naturelles classiques et de "*consommation de l'espace pour ses aménités*" liée aux paysages, aux modes de vie, etc.

Il est rare qu'une formulation de cette nature, soit *librement proposée*, malgré l'évidence des faits dans de nombreux cas. Une télédétection capable d'apporter des résultats pour ces deux groupes de valeurs d'usage à la fois serait de nature à faciliter la mise en oeuvre de programmes de coopération en jouant sur la complémentarité des intérêts des parties concernées.

N3 - NATIONS EN COURS DE DEVELOPPEMENT, MAL RELIEES OU SITUEES LOIN DES NATIONS DEVELOPPEES POURVOYEUSES EVENTUELLES D'UNE CLIENTELE LOISIRS DE MASSE

Ces nations sont réputées ne pas avoir fait leur décollage industriel. On peut même dire que certaines d'entre elles n'ont même pas encore fait leur décollage agricole.

Nous proposons de considérer les 5 *sous-types* suivants :

N3a - Nations à faible croissance démographique, susceptibles de satisfaire facilement leurs besoins alimentaires primaires, pourvues de vastes espaces en réserve

Ces nations pourraient accéder au développement dans la mesure :

. où l'exploitation de leurs ressources est réalisée ;

. où les moyens de communication avec les nations développées sont améliorés ;

. où des plans de développement à intérêt multinational ou international sont mis en oeuvre.

Dans une telle problématique, la télédétection des ressources terrestres est appelée à être un atout déterminant pour la prospection des ressources et leur mise en valeur.

N3b - Nations à forte croissance démographique, poltiquement orientées vers la satisfaction des besoins de la consommation interne par le jeu de leur appartenance à des zones de marchés extérieurs, avec espaces en réserve

Ces nations ont tendance à profiter des nouvelles technologies offertes (télédétection...) et à en faire le meilleur usage, dans l'optique du meilleur profit. Ces technologies avancées étant disponibles, il reste à convaincre ces nations de les utiliser aussi pour le contrôle de l'utilisation rationnelle des ressources, et pas seulement pour leur exploitation "minière".

N3c - Nations à forte croissance démographique, politiquement orientées vers la satisfaction des besoins de la consommation interne par le

jeu de leur appartenance à des zones de marchés extérieurs, sans espace en réserve à valeur potentielle élevée, ou avec des réserves inaccessibles

Le comportement de ces nations est le même que dans le cas précédent. Toutefois, l'utilisation des ressources est faite sur un espace limité ; il en résulte une tendance à dépasser les normes, en demandant *plus de ressources par unité de surface (ou de volume)* et en ayant recours à des techniques plus sophistiquées et plus onéreuses pour la prospection et pour l'exploitation des ressources.

De telles nations peuvent donc être appelées à faire un usage intensif des techniques de télédétection dans un certain nombre de cas particuliers (ressources minières surtout) ressortissant à une démarche sectorielle (par discipline ou par nature de ressources).

N3d - *Nations à forte croissance démographique, politiquement orientées vers la satisfaction des besoins de la consommation interne principalement à partir des seules productions nationales, avec espaces en réserves ou sous-exploités*

Ces nations se contentent généralement des méthodes traditionnelles ou conventionnelles de prospection, de mise en valeur et d'exploitation des ressources.

Elles savent se passer des techniques de la télédétection si les contraintes imposées par les nations développées qui en disposent, paraissent contrarier leur indépendance nationale.

N3e - *Nations à forte croissance démographique, politiquement orientées vers la satisfaction des besoins de la consommation interne principalement à partir des seules productions nationales, sans espaces en réserve*

Ce sont des nations qui se soucient fort peu généralement des progrès technologiques du type de ceux proposés dans le domaine de la télédétection, accaparées qu'elles sont à résoudre des problèmes apparemment insolubles (famine, misère, catastrophes naturelles...).

Des circonstances exceptionnelles existent cependant (programmes d'assistance internationale) qui conduisent à la mise en oeuvre, à des fins humanitaires, de programmes dans lesquels les techniques sophistiquées comme celles de la télédétection peuvent être utilisées. Là, plus qu'ailleurs, une *bonne volonté mondiale*, est nécessaire pour aider de telles nations qui espèrent cependant "s'en sortir" par le recours aux technologies alternatives ou aux technologies douces (écotechniques de I. SACHS).

Commentaire général :

A l'intérieur de la *même* nation, des raisons particulières peuvent conduire à "mêler les genres" dans la typologie qui est proposée ici. Un libéralisme de bon aloi dans le système économique n'exclut pas toujours des mesures contraignantes en ce qui concerne l'importation et l'usage des techniques avancées (par ex. interdiction qui est faite, par certaines nations, de diffuser l'information photographique aérienne du territoire national).

4. LES SOLUTIONS APPLICABLES ET LES MOYENS GENERAUX A MOBILISER

Il n'est pas désirable d'indiquer ici toutes les solutions possibles, chaque cas méritant sans conteste une analyse spécifique appropriée. Toutefois, il nous paraît intéressant de considérer les 5 solutions générales suivantes, les deux extrêmes caractérisant d'une part, la solution la plus conventionnelle et, d'autre part, la plus sophistiquée.

S1 - Prospection directe sur le terrain à partir des moyens conventionnels; recours aux photographies aériennes généralement disponibles en priorité pour l'établissement et la révision des cartes topographiques (cartes de base), c'est-à-dire non optimisées pour les besoins de la cartographie thématique.

S2 - Recours intensif (atelier de photogrammétrie et de photo-interprétation) à toutes les couvertures photographiques aériennes de toutes natures (émulsions, échelles...) disponibles, optimisées ou non en fonction des thèmes ; prospection directe sur le terrain limitée au strict minimum selon une approche sectorielle ou par discipline élémentaire (levés géomorphologiques, pédologiques, végétation, utilisation du sol... séparés).

S3 - Prospection directe sur le terrain convenablement balancée par l'emploi de couvertures photographiques aériennes optimisées (choix des échelles, des émulsions, des dates de prises de vues). Approche intégrée, interdisciplinaire.

S4 - Utilisation "tous azimuts" des données de la télédétection aéroportée et spatiale avec possibilités de travailler sur des bandes spectrales particulières du visible et de l'infra-rouge ; travaux au sol (vérité-terrain) souvent limités à l'identification taxinomique des cibles Z dans l'espace XY du territoire considéré.

S5 - Utilisation intensive et optimisée, à plusieurs niveaux, des données de la télédétection aéroportée et spatiale ; vérité-terrain plus intensive et plus complète, comportant non seulement l'identification taxinomique des cibles (des ressources de la surface), mais aussi l'étude de leurs relations spatiales et temporelles, de leur structure, de leur organisation, de leur fonctionnement, de leur production et de leur évolution.

Ces solutions peuvent trouver un champ d'application pour tout ou partie des territoires (cf. chap. 1) des espaces écologiques homogènes (cf. chap. 2) ou des nations (cf. chap. 3) considérés.

La *mobilisation des moyens généraux* sera évidemment de nature variable selon la solution choisie et les objectifs arrêtés. Là aussi, il est difficile d'être exhaustif. Tout au plus, pouvons-nous aider le planificateur à se poser les questions essentielles. On trouvera ci-après un aide-mémoire, présenté sous forme de questionnaire, qui contribuera à clarifier le débat et à vérifier rapidement dans quelle mesure le recours à des solutions sophistiquées est possible.

QUESTIONNAIRE

MOBILISATION DES MOYENS

OBJECTIFS (Description détaillée)

1) ACQUISITION DES DONNEES — REPONSES *

Satellite des ressources terrestres.....
Porteurs aériens hautes altitudes.....
Porteurs aériens moyennes altitudes.....
Porteurs aériens basses altitudes.....
Prospection conventionnelle au sol.....
Stations de mesure au sol.....
. non automatiques.....
. automatiques.....

2) SENSEURS

. Senseurs conventionnels au sol
. appareils de mesure classiques de type micro/méso-climatique.....
. appareils photographiques au sol.....
. spectromètres et spectroradiomètres.....
. etc.

. Senseurs à bord
. caméras aériennes panchromatique
. caméras aériennes IR/BN.....
. " " Couleurs.....
. " " IR/FC.....
. caméras multi-bandes.....
. caméras multi-objectifs.....
. balayeurs optiques visible et proche IR.....
. balayeurs optiques visible et proche IR et IR thermique.....
. senseurs plus évolués.....
. radiomètres de calibration.....
. etc.

3) SUPPORTS DES DONNEES

. films (détailler).....
. bandes magnétiques (détailler)..

4) FACILITES TECHNIQUES POUR LE TRAITEMENT DES DONNEES

. Pré-traitement des données.....

---

* Nature des réponses :

- Disponible	ou	Non disponible
- Possible	ou	Impossible
- Utile	ou	Inutile
- Accessible	ou	Non accessible
- etc.		

. conditionnement des produits primaires (photo, bandes magnétiques) : à détailler.....
. manipulation sur les images photographiques.....
  . labo conventionnel B/N
  . labo conventionnel + FC
  . labo conventionnel + FC + équi-densités + couleurs composites.....
  . micro-densitométrie.....
  . etc.
. Manipulations sur les bandes magnétiques.....
  . ordinateurs et périphériques
  . programme de calcul et de gestion (logiciel)...

5) FACILITES TECHNIQUES POUR LA VERITE TERRAIN

. Accessibilité générale (détailler).....
. Moyens de transport (avion, hélicoptère, voiture...).....
. Moyens d'observation et de mesure.....
. Technique de levés et de reproduction cartographiques.....
. Stations permanentes de mesure
. etc.

6) PERSONNEL

. Spécialistes compétents dans le pays.....
. Spécialistes mobilisables hors du pays.....
. Techniciens compétents dans le pays.....
. Techniciens mobilisables hors du pays.....
. Formation et perfectionnement (dans le pays ; à l'extérieur)

7) DOCUMENTATION

. générale.....
. spécialisée.....
. conditions d'accès.....
. échanges.....

8) BUDGET

. Ressources budgétaires immédiatement mobilisables.....
. Ressources budgétaires à dégager.....
. Aide extérieure (coopération).

9) ORGANES D'INCITATION ET DE COORDINATION

. Comités, commissions.....
. Plan.....

La confrontation des "solutions" et des "moyens" peut alors donner une idée de la *possibilité technique* de réaliser certains objectifs assignés à un programme donné. Encore faut-il calculer la *possibilité économique* des solutions retenues. Dans ce but, un calcul *côut/bénéfice* peut être appliqué en rapportant cet indice à *l'unité de surface* prospectée. De tels calculs ont éte faits dans la perspective de la mise en oeuvre de vastes programmes de télédétection des ressources terrestres. A titre d'exemple, nous retiendrons ici (*tableau 3*) les propositions présentées dans un rapport de A.I.D. (1974) relatif au Sahel (pays au Sud du Sahara). On a ainsi une idée du coût relatif de chaque solution. Nous attirons l'attention sur le fait que ces côuts peuvent être modifiés par un *meilleur usage de la connaissance du terrain* et par l'emploi de *généralistes* ayant reçu une formation appropriée.

Solutions possibles, moyens... débouchent sur les inévitables questions de la définition des priorités.

5. DEFINITION DES PRIORITES

Nous essaierons de nous placer dans l'optique de la plupart des pays en cours de développement. Mais, bien entendu, il serait nécessaire de procéder cas par cas.

Précisons que nous avons en vue la télédétection des ressources terrestres à l'aide des données ERTS-LANDSAT complétées, dans la mesure du possible, par des données plus convientionnelles, et que nous donnons volontairement la priorité générale au *développement des ressources agricoles*, ce qui peut être contesté dans certains cas particuliers .

TABLEAU 3

COUT RELATIF DE LA CARTOGRAPHIE
DE L'UTILISATION DU SOL

(Source : Remote Sensing Applications to Resources Management Problems in the Sahel, A.I.D., Washington, 1974)

Niveau de précision	Echelle du produit final	Données de base	Côut/km^2
Niveau I	1/500 000 à 1/250 000	Imagerie ERTS à 1/250 000	60
		Photo aérienne haute alti. à ≃ 1/50 000	800
Niveau II	1/250 000 à 1/50 000	Imagerie ERTS seulement	100*
		Photo aérienne haute alti. à ≃ 1/100 000	900
	1/50 000 1/50 000	Imagerie ERTS, photo aérienne haute alt., vérité-terrain	300
Niveau III	1/50 000 à 1/25 000	Photo aérienne commerciale ≃ 1/100 000	1100
	≃ 1/25 000	Photo aérienne commerciale ≃ 1/25 000	2300

*100 = base de référence arbitraire pour faciliter la comparaison des coûts.

PRIORITE N°1 . VARIABLES LES PLUS PERMANENTES DE L'ECOSPHERE

1.1. Accélérer les *inventaires topographiques de base*, à petite et moyenne échelles, portant sur les *variables les plus stables* de la surface terrestre.

échelles : 1/5000 000, 1/1000 000, 1/500 000, 1/250 000
1/100 000

1.2. Mettre à jour les cartes *topographiques existantes*

1.3. Réaliser à petite et moyenne échelles des *cartes thématiques générales* dans les thèmes fondamentaux suivants :

1.3.1. cartes *géologiques* générales
1.3.2. cartes *hydrologiques* générales
1.3.3. cartes *géomorphologiques* générales
1.3.4. cartes *pédologiques* générales

PRIORITE N°2 . VARIABLES EXPRIMANT LA PRODUCTIVITE BIOLOGIQUE GENERALE A L'INSTANT T

2.1. Réaliser à petite et moyenne échelles des *cartes générales de l'utilisation du sol* (5 à 10 unités majeures)

2.2. Réaliser à moyenne échelle des cartes de *l'occupation des terres* (20 à 50 unités majeures)

2.3. Réaliser à moyenne et grande échelles des cartes combinées de *l'utilisation du sol et de l'occupation des terres*, avec indications plus détaillées sur la *végétation, spontanée ou cultivée.*

PRIORITE N° 3 . VARIABLES EXPRIMANT LES VARIATIONS DIACHRONIQUES DES PRINCIPAUX FACTEURS PHYSIQUES (Terres, Eaux) ET BIOLOGIQUES (Production végétales spontanées et cultivées), TEMPS T, T1, T2 ... Tn.

3.1. Réalisation de *cartes phyto-écologiques*, avec expression de la *dynamique*

3.2. Cartes de *l'état des cultures*

3.3. Cartes de *l'état des terrains de parcours*

3.4. Cartes de *l'état des ressources forestières*

3.5. Cartes de *l'état des ressources en terres et en eaux*

PRIORITE N° 4. DETECTION, CONTROLE ET SURVEILLANCE DE CERTAINES VARIABLES-CLES DE LA DYNAMIQUE GENERALE DE L'ECOSPHERE. EVALUATION DES DESEQUILIBRES

4.1. Déforestation, érosion hydrique, érosion éolienne, feux de végétation

4.2. Savanisation, steppisation, désertisation

4.3. Inondation, sédimentation

PRIORITE N° 5. ACQUISITION DE CONNAISSANCES SCIENTIFIQUES

Sans souci d'applications pratiques immédiates.

6. PLANIFICATION DES PROJETS

L'incorporation des techniques de télédétection dans les études qui accompagnent les "projets de développement de l'espace rural et de mise en valeur des ressources" doit faire l'objet d'une PLANIFICATION appropriée.

Voici quelques questions que le planificateur pourrait être amené à se poser et à proposer à la discussion avec ses partenaires.

1. Qui fournit les données de la télédétection ?
2. Ces données seront-elles à la disposition de tous ? dans quelles conditions ?

3. Quelles mesures faut-il prendre pour s'assurer que ces données seront utilisées par tous les services intéressés afin de réduire le rapport côut/bénéfice ?
4. Existe t-il une institution chargée de centraliser l'information disponible, de la gérer et de la traiter à la demande des utilisateurs ? Existe-t-il des facilités de traitement (photographiques, informatiques) ? une base de données ? du personnel technique qualifié ?
5. Est-il envisagé de donner une certaine publicité aux résultats ? quels sont les moyens de reproduction et de diffusion ?
6. Existe-t-il des spécialistes compétents ? Où se fera la formation des experts ? dans le pays ? hors du pays ? solution mixte ? Moyens nécessaires ?
7. Pour économiser les moyens, n'est-il pas souhaitable de diminuer les exigences des experts quant à la qualité et la précision des données ? Quelles solutions peuvent être proposées ? Choix des données ? Choix des variables ? Choix des échelles des cartes ? Dispositifs d'échantillonnage par zones-test ?
8. Quelles solutions sont disponibles pour faire face au côut relativement élevé de l'utilisation des données ERTS-LANDSAT selon une périodicité élevée ?
   Une couverture totale de la Tunisie à un instant t représente une trentaine "d'images MSS" (en 4 canaux) ; le côut d'une "image" s'établit à 600 $ la bande magnétique correspondante, qu'il est possible d'acheter à la Société Telespazio à Rome. Il en résulte pour chaque "passage" un coût total de l'ordre de 15000 à 20 000 $ US
   Or, le satellite effectue un "passage" tous les 18 jours, soit une vingtaine de passages par an !
   Comment donc effectuer un choix optimisé des "dates les plus favorables" ?
9. Quels sont les moyens aéroportés disponibles pour des missions simultanées ? Porteurs ? Senseurs ?
10. Quels sont les moyens disponibles pour la vérité-terrain? Equipes chargées des observations et des mesures ? Stations de mesure ? Représentativité des zones-test, des sites-test ? Aptitudes à la généralisation par voie automatique ? selon des procédures plus conventionnelles ? Etc.

7. POSSIBILITES ET LIMITATIONS DE LA TELEDETECTION, EN PARTICULIER POUR LE RECENSEMENT ET LE SUIVI DES RESSOURCES AGRICOLES

Les possibilités d'utilisation de la télédétection spatiale avec les systèmes ERTS-LANDSAT actuellement disponibles sont identifiables à partir des travaux les plus avancés de quelques équipes de pointe de nombreux centres de recherche aux Etats-Unis, au Canada, en URSS, et dans quelques pays européens.

Pour tenter de dresser une liste de ces *possibilités*, nous nous inspirerons de certains éléments de la synthèse présentée par G. THORLEY (1974). Il est utile de faire remarquer que cette synthèse ne mentionne pas les ressources géologiques, minières,... Il est maintenant devenu évident pour beaucoup que le caractère *répétitif* de la télédétection spatiale constitue surtout un atout majeur pour l'étude des *phénomènes les plus dynamiques*, donc changeants, de la surface, aussi bien en ce qui concerne les milieux terrestres que les milieux aquatiques. Toutefois - et tout particulièrement dans les pays insuffisamment explorés sur le plan des ressources physiques - elle peut rendre de grands services, avec peu de données initiales (pas ex. une prise "d'images" dans la saison où la végétation ne masque pas la surface) ; en conséquence, elle mérite très sérieusement d'être prise en considération, notamment pour la mise à jour et la révision des inventaires et des cartes thématiques correspondantes.

Les commentaires qui suivent extraits du rapport de G. THORLEY sont en principe applicables au territoire des Etats-Unis ; ils montrent avec quelle prudence les experts compétents s'engagent dans la voie de la télédétection des ressources terrestres à partir des plateformes spatiales.

1) *Utilisation du sol et cartes topographiques de base*

- production de photo cartes du 1/1 000 000 au 1/250 000 et révision des cartes topographiques ;
- identification de 14 à 18 catégories d'utilisation du sol des niveaux I et II (échelles) ;
- identification des interfaces urbain/rural ; et définition de 3 catégories urbaines.