

MEMOIRE DE D.E.A.

Marc LOINTIER

PRINCIPAUX SYSTEMES DE TRAITEMENT DES DONNEES SATELLITES
(avantages et inconvénients)

POSSIBILITES ACTUELLES ET FUTURES DES
SATELLITES DANS LE DOMAINE DE L'HYDROLOGIE

Département de GEOLOGIE DYNAMIQUE, PARIS

Université P. et M. CURIE

S O M M A I R E

	Pages
INTRODUCTION	1
<u>CHAPITRE 1</u> : DESCRIPTION DES PRINCIPALES PLATEFORMES	2
A - Généralités sur les données satellite	4
B - Caractéristiques des orbites	6
C - Description des plateformes et de leurs capteurs ...	6
1 - LANDSAT 1 et 2	6
2 - LANDSAT 3	6
3 - LANDSAT D	8
4 - TIROS N - N.O.A.A.	88
5 - S.P.O.T.	10
6 - H.C.M.M.	12
7 - NIMBUS G	14
8 - SEASAT	16
9 - METEOSAT	18
<u>CHAPITRE 2</u> : LES PRINCIPAUX TRAITEMENTS EN TELEDETECTION	21
A - Traitements analogiques	23
1 - Traitements photochimiques	23
- traitement géométrique	24
- traitement photochimique au sens strict	24
2 - Traitements optiques	27
B - Traitements numériques	30
1 - Traitements utilisant l'information radio- métrique	32
- la méthode par dictionnaire	32
- la méthode non supervisée	33
- la méthode supervisée	33
- la méthode supervisée interactive	34

2 - Traitements utilisant l'information spatiale et spectrale	34
3 - Traitements utilisant l'information spectrale et temporelle	35
C - Principaux algorithmes utilisés	35
1 - La classification	35
2 - Le classement	36
3 - La recherche de "signatures"	36
Conclusions	36
<u>CHAPITRE 3</u> : POSSIBILITES ACTUELLES ET FUTURES DANS LE DOMAINE DE L'HYDROLOGIE	38
A - Gestion de l'eau	39
1 - Surfaces en eau libre	39
2 - Crues et inondations	40
3 - Physiographie des bassins versants	44
4 - Irrigation	44
5 - Neige et glaciers	45
6 - Eaux souterraines	46
B - Qualité des eaux	48
C - Etude des composantes du bilan hydrique des sols ...	52
1 - Les précipitations	52
2 - Humidité du sol	53
3 - Evapotranspiration	55
D - Contribution aux modèles hydrologiques	57
<u>CONCLUSIONS</u>	59
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	64

La Télédétection des ressources terrestres par satellite entre dans une phase opérationnelle, après les nombreuses expérimentations réalisées à l'aide des satellites LANDSAT, dont le premier fut lancé en 1972 par les ETATS-UNIS. La résolution au sol du LANDSAT, quoique faible (un demi hectare), avait déjà posé des problèmes politiques dès les premières utilisations des données. La construction de nombreuses stations de réception dans le monde accentua l'inquiétude des pays ne possédant pas de satellites, et les ETATS-UNIS choisirent de pratiquer une politique des "cieux ouverts". Celle-ci repose sur le principe selon lequel les bénéfices offerts à l'ensemble de l'humanité, par la mise à disposition de toute nation ou de tout individu des données recueillies, sont supérieurs à tous les préjudices que pourrait provoquer une utilisation mal intentionnée. Le risque est en fait bien faible pour le LANDSAT, mais les performances prévues pour les futurs satellites - en particulier le programme français SPOT, dont la résolution atteindra 20, puis 10 m - imposera certainement la constitution d'un code déontologique et de sérieuses conventions avec les militaires.

La poursuite de cette politique, depuis 8 ans, semble s'être étendue aux autres satellites d'observation de la terre et de nombreux organismes ont pu ainsi acquérir, non seulement les données concernant le spectre visible et proche infrarouge, mais également des informations en infrarouge thermique et micro-ondes. Dans ces derniers domaines, la technologie est très poussée et, bien souvent, les données recueillies sont compliquées à interpréter, du fait de notre manque de connaissance dans le processus d'interaction entre le sol et les ondes électromagnétiques.

Poursuivant une logique d'utilisation des données satellites, la première partie est consacrée à la nature de ces données : elle décrit les principales caractéristiques spectrales et spatiales des capteurs. Les informations obtenues doivent être ensuite traitées par des moyens appropriés à leur structure analogique ou digitale. La seconde partie fait un tour d'horizon des possibilités de traitement utilisées à ce jour et dans un proche avenir, compte tenu de l'augmentation importante du nombre de données à traiter. Les deux principales qualités du satellite sont la vision d'ensemble des phénomènes et la répétitivité. L'étude des phénomènes hydrologiques nécessite fréquemment l'emploi de telles qualités et les applications décrites dans la troisième partie montrent la diversité des problèmes que l'on peut aborder par télédétection spatiale.

CHAPITRE I

DESCRIPTION DES PRINCIPALES PLATEFORMES

Dans un souci de mise au point, il nous est apparu important de consacrer une première partie à l'étude des possibilités des capteurs déjà mis sur orbite classique ou géostationnaire. Il est apparu utile, sous un angle pragmatique, de faire un panorama des plateformes supportant ces capteurs afin de bien décrire toutes les utilisations actuelles en Hydrologie et d'en imaginer les futures, en fonction des programmes scientifiques des organisations qui gèrent ces satellites.

A - GENERALITES SUR LES DONNEES SATELLITE

Le principe de la télédétection électromagnétique est d'appréhender certaines caractéristiques de surface du sol et du proche sous-sol, par l'analyse des propriétés du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par le sol.

- la luminance d'une surface est la puissance émise par unité d'angle solide et par unité de surface perpendiculaire à la direction d'émission (en $W/m^2.sr$).
- la réflectance est le rapport de la radiation solaire réfléchi par la radiation solaire incidente.

Du fait d'une importante absorption des radiations solaires par la vapeur d'eau atmosphérique, les capteurs embarqués à bord des satellites ne fonctionnent que dans certaines bandes du spectre correspondant à ce que l'on appelle les "fenêtres atmosphériques", au travers desquelles la radiation solaire peut être reçue au sol et donc réfléchi vers les capteurs. Sur l'ensemble du spectre, les principales "fenêtres" se situent dans les zones de longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,7 μm pour le visible et entre 0,7 et 1,3 μm pour le proche infrarouge. L'infrarouge thermique est capté, en général, dans la zone des 10 à 13 μm . Le domaine des micro-ondes compris entre 1 mm et 1 mètre de longueurs d'onde (300 GHz à 0,3 GHz) ne subit pas d'effet atmosphérique. Pour ce dernier cas, on distingue les systèmes passifs où l'on enregistre les radiations naturelles réfléchies par l'objet, des systèmes actifs (radar) pour lesquels on enregistre les radiations provoquées par un émetteur.

Les capteurs enregistrent, pour une longueur d'onde choisie, l'énergie réfléchi par le sol, puis convertissent cette quantité en nombres (digitalisation) sur la base d'une mesure faite sur une unité de surface nommée pixel (contraction de picture element). Le pixel permet d'apprécier la résolution au sol du satellite.

Suivant la nature des capteurs, pour chaque pixel, on obtient une ou plusieurs mesures d'énergie dans une ou plusieurs longueurs d'onde (canaux). Cette énergie est codée par un nombre de 0 à 128 ou 0 à 256 selon les cas (fig. 1).

B - CARACTERISTIQUES DES ORBITES

Pour les satellites à défilement, qui gravitent en général à 900 km d'altitude ou moins, on calcule les trajectoires, de façon à ce qu'elles soient héliosynchrones, c'est-à-dire que l'observation d'un même lieu se fasse toujours à la même heure solaire (suivant la saison, l'élévation change tout de même, mais pas l'azimuth). Ainsi, on dote la plateforme de la propriété de répétitivité de passage au-dessus du même point. Par exemple, pour un LANDSAT, la répétitivité est de 18 jours, pour deux, elle est de 9 jours, etc ...

Pour les satellites géostationnaires, la période est de 24 heures, donc, en plaçant l'engin dans un plan équatorial, on observe toujours le même point, quelle que soit l'heure solaire (METEOSAT par exemple).

C - DESCRIPTION DES PLATEFORMES ET DE LEURS CAPTEURS

LANDSAT 1 et 2.

: lancement	: 22.07.1972 et 22.01.1975	:
: radiomètre multispectral	: 0,5 - 0,6 μm canal 4	:
: (M.S.S.)	: 0,6 - 0,7 μm canal 5	:
:	: 0,7 - 0,8 μm canal 6	:
:	: 0,8 - 1,1 μm canal 7	:
: résolution	: 80 m x 56 m = 0,44 hectares	:
: scène	: 185 x 185 km	:
: répétitivité	: 18 jours	:
: héliosynchrone		:

LANDSAT 3 (fig. 2)

: lancement	: octobre 1977	:
: radiomètre multispectral	: idem LANDSAT 1 et 2	:
: radiomètre à infrarouge		:
: thermique	: 10,5 - 12 μm (résolution 240 m)	:
: 2 caméras RBV	: panchromatiques - caméras de télévision	:
:	: à retour de faisceau (return beam vidicon)	:
:	: résolution 40 m	:
: répétitivité	: 18 jours	:
: héliosynchrone		:

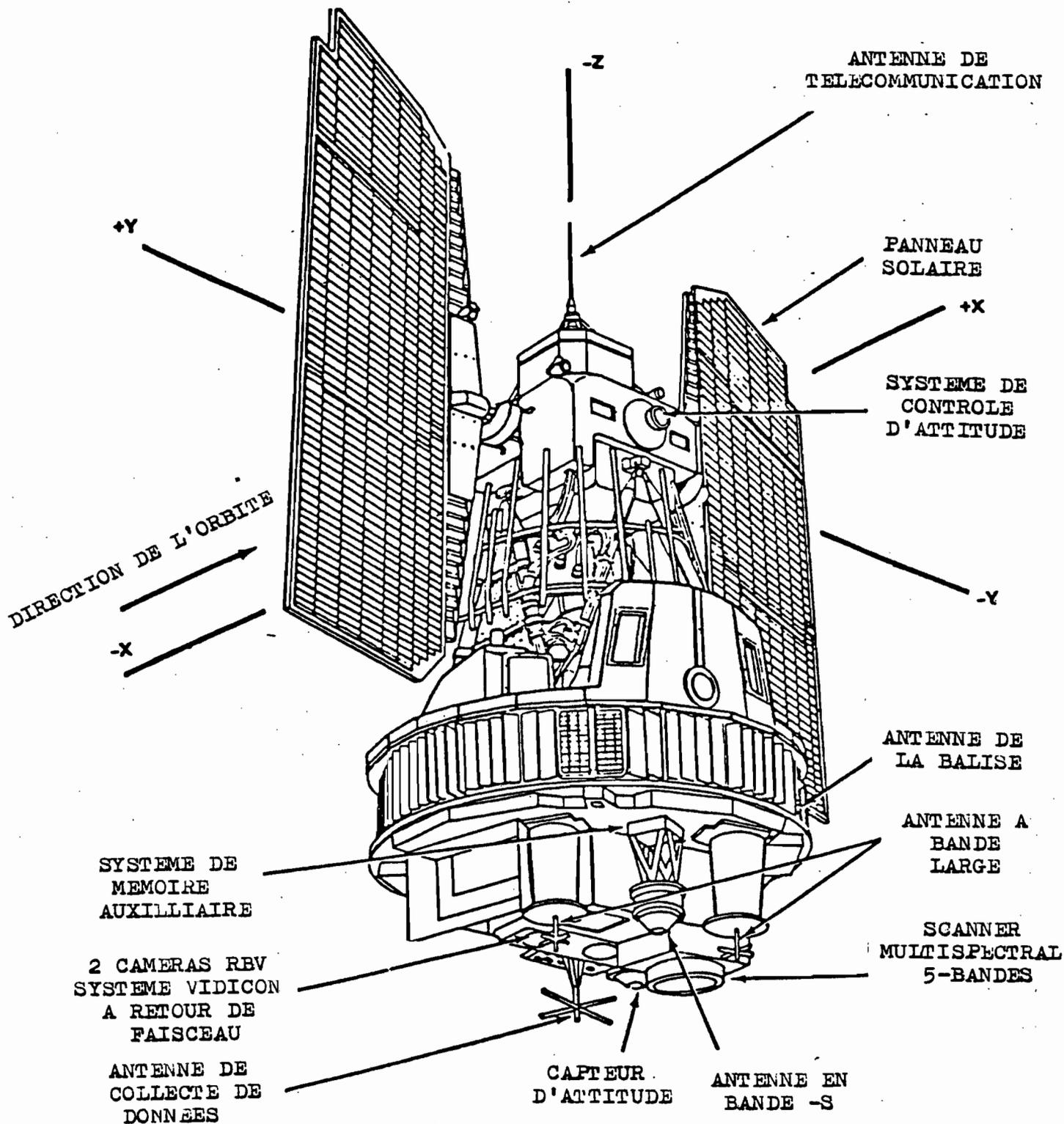


FIG. 2

LANDSAT 3

LANDSAT D

lancement	: prévu le 1er trimestre 1981
radiomètre multispectral	: M.S.S. identique aux précédents
radiomètre "Thematic Mapper"	: 0,45 - 0,52 μ m résolution 30 m
	: 0,52 - 0,60 μ m
	: 0,63 - 0,69 μ m
	: 0,75 - 0,90 μ m
infrarouge thermique	: 10,5 - 12,5 μ m résolution 120 m
scène	: 180 km x 180 km
répétitivité	: 15 jours
héliosynchrone	

Remarque : 2ème génération de satellites multitemporaux, ils sont conçus d'une façon modulaire pour être mis en orbite et récupérés par la navette spatiale.

TIROS N*/NOAA**6

lancement	: 27.06.1979
radiomètre à balayage	: 0,52 μ m résolution 4 km
sondage stratosphérique	: résolution 150 km
sondage à micro-ondes	: 4 canaux de 50 à 57 GHz
	: résolution 100 km
radiomètre à très haute résolution	: (AVHRR)
	: 0,58 - 0,68 μ m résolution 1,1 km
	: 0,73 - 1,1 μ m
	: 3,55 - 3,93 μ m
	: 10,3 - 11,3 μ m
	: 11,5 - 12,5 μ m
répétitivité	: 12 heures
héliosynchrone	: à orbite quasi-polaire

* Television and Infra Red Observation System.

** National Oceanic and Atmospheric Administration

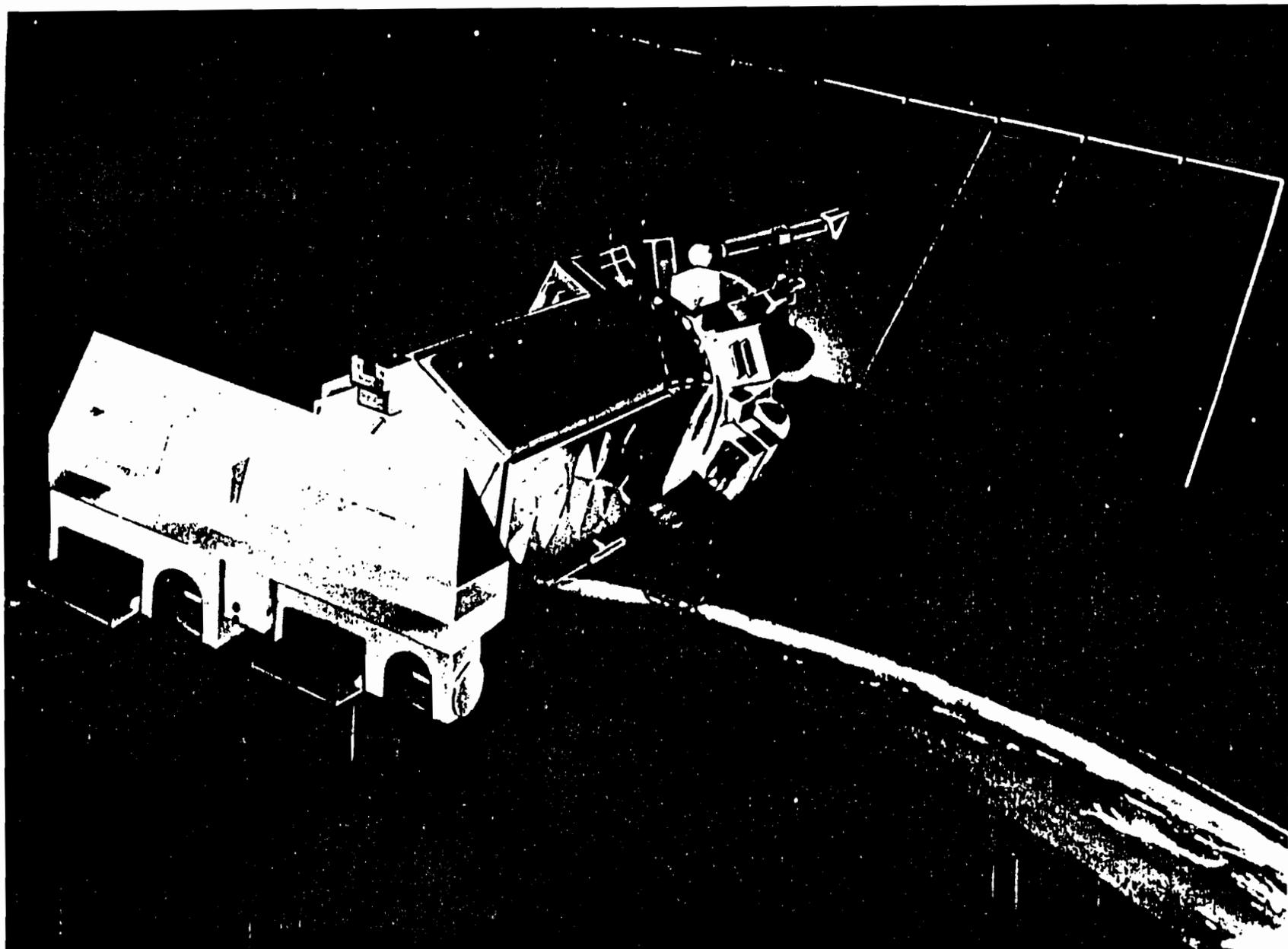


FIG.3 TIROS-N/NOAA Spacecraft

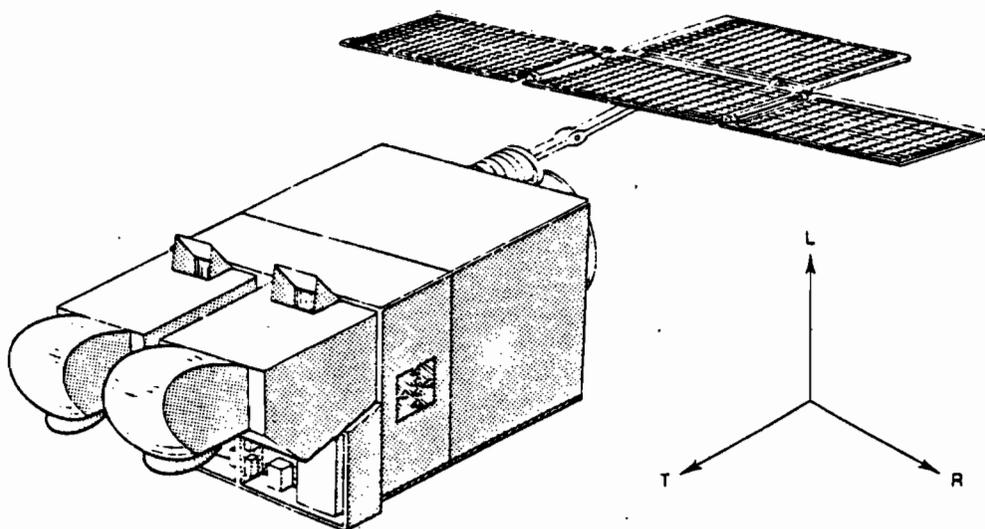
SPOT * (fig. 4)

: lancement	: octobre 1983	:
: radiomètre multispectral	: 0,5 - 0,6 μ m	: résolution 20 m
:	: 0,6 - 0,7 μ m	:
:	: 0,7 - 0,9 μ m	:
: ou panchromatique	: 0,6 - 0,9 μ m	: résolution 10 m
: scène	: 60 x 60 km	:
: répétitivité	: 26 jours	:
: héliosynchrone		:
:		:

Remarque : possibilité de dépointage des visées de $\pm 26^\circ$, donc données stéréoscopiques éventuellement, ou observation de la zone survolée le jour précédant nuageux.

* Système probatoire d'observation de la terre.

SATELLITE SPOT PREMIERE MISSION



SPOT : VUE ECLATEE PLATEFORME

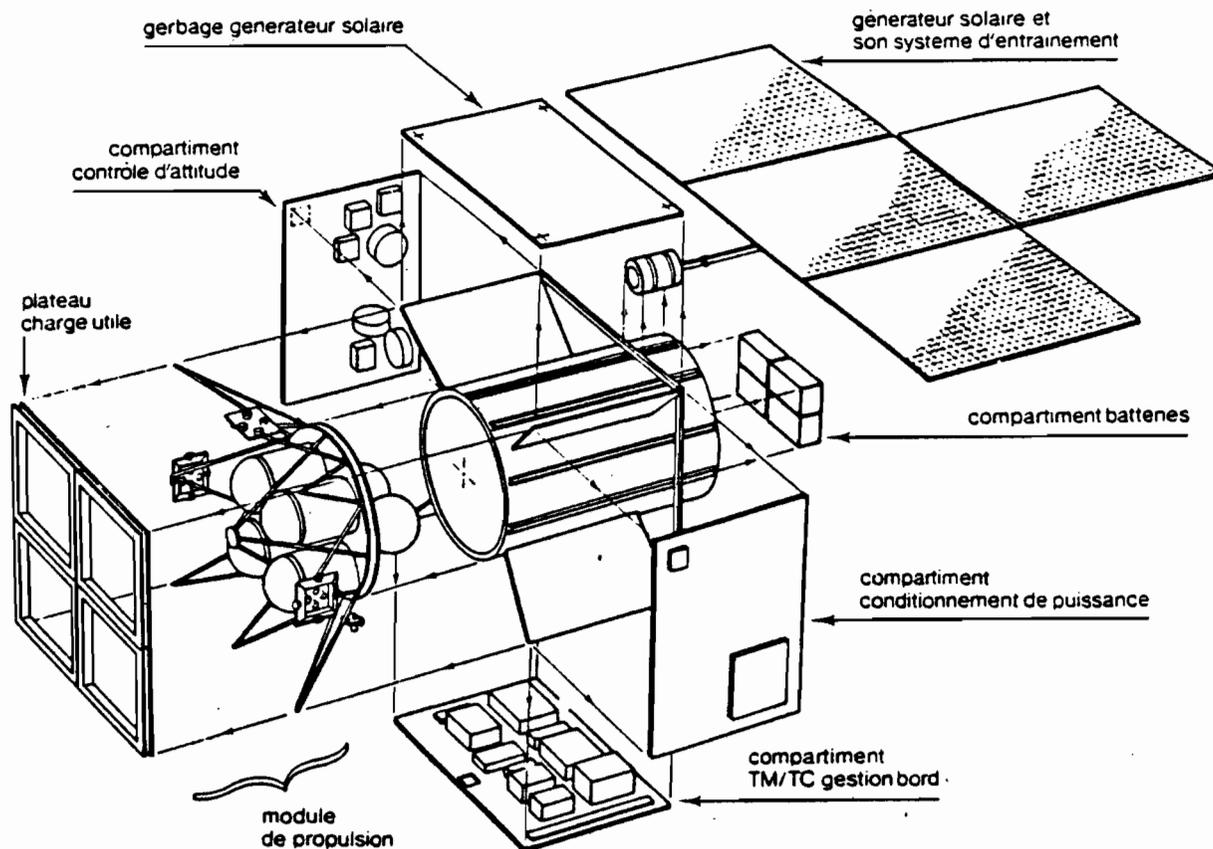


FIG. 4

SPOT

H C M M * (fig. 5)

: lancement	: avril 1978 (durée de vie : 1 an)	:
: radiomètre à balayage	: 0,5 - 1,1 μ m résolution 500 m	:
:	10,5 - 12,5 μ m " 500 m, 0,4°K	:
: scène	: 700 km x 700 km	:
: répétitivité	: 2 passages à 12 heures d'intervalle tous	:
:	les 8 jours.	:
: héliosynchrone	: à orbite circulaire.	:
:		:

Remarque : fonctionne encore (le 01.06.1980).

* Heat capacity mapping mission.

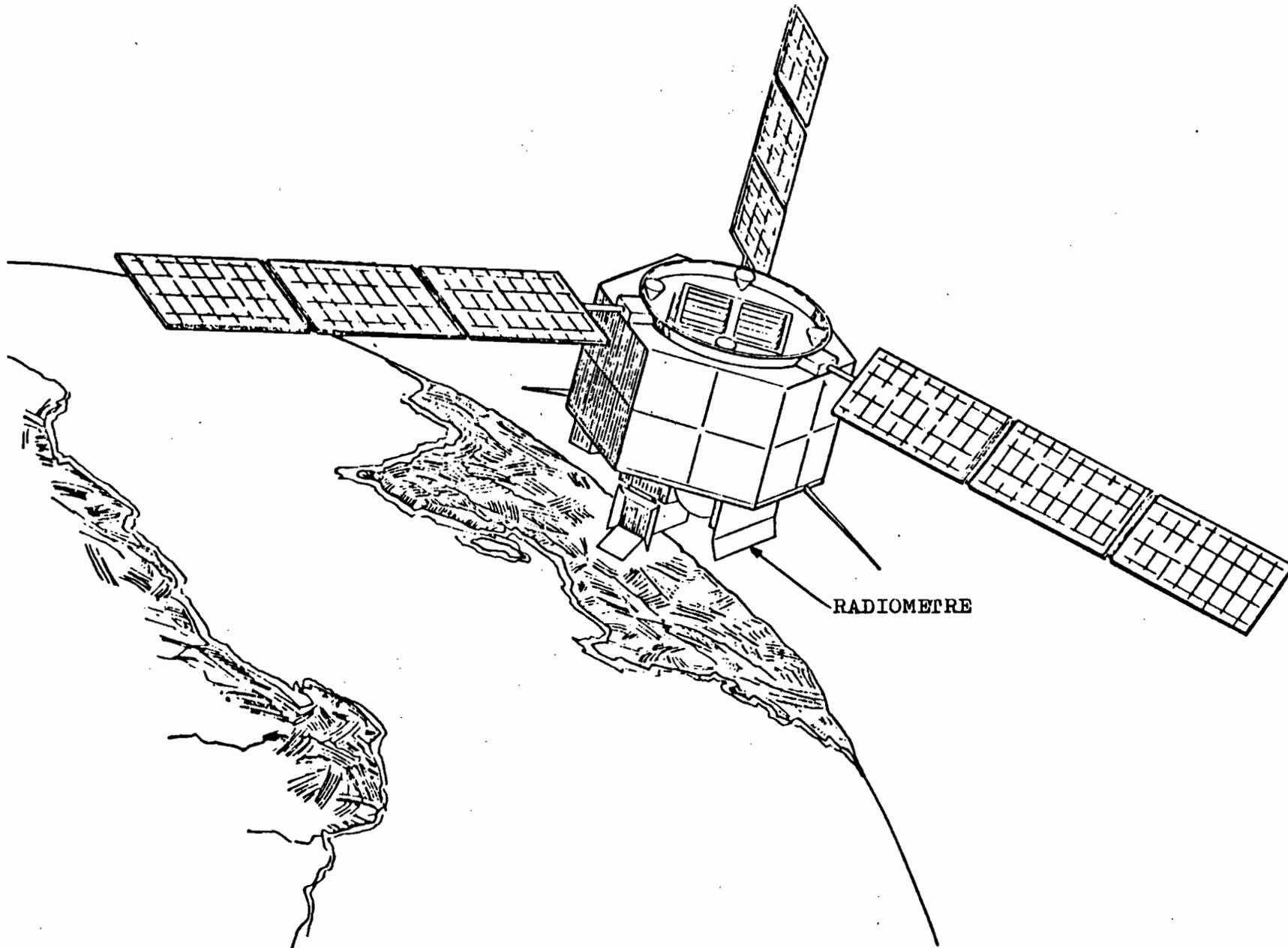


FIG.5 SATELLITE HCMM (HEAT CAPACITY MAPPING MISSION)

NIMBUS G (fig. 6)

:	:	:	:	:	:
:	lancement	:	14 mai 1979	:	:
:	:	:	:	:	:
:	radiomètre multispectral	:	0,44 μ m	0,01 μ m	résolution 820 m
:	:	:	0,55	"	:
:	:	:	0,75	"	:
:	:	:	0,52	"	:
:	:	:	0,67	"	:
:	:	:	:	:	:
:	radiomètre à micro-ondes	:	:	:	:
:	(S M M R)	:	6,6 GHz	Scanning multichannel	:
:	:	:	10,7	"	microwave radiometer
:	:	:	18,0	"	:
:	:	:	21	"	résolution de 150 à 250 km
:	:	:	37	"	:
:	:	:	:	:	:
:	radiomètre en infrarouge	:	:	:	:
:	thermique	:	4,7 μ m	à 2°K près	:
:	:	ou	8	"	:
:	:	ou	11	"	:
:	:	:	:	:	:
:	scène	:	1200 km x 1200 km	:	:
:	:	:	:	:	:
:	répétitivité	:	6 jours, orbite quasi-polaire	:	:
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:

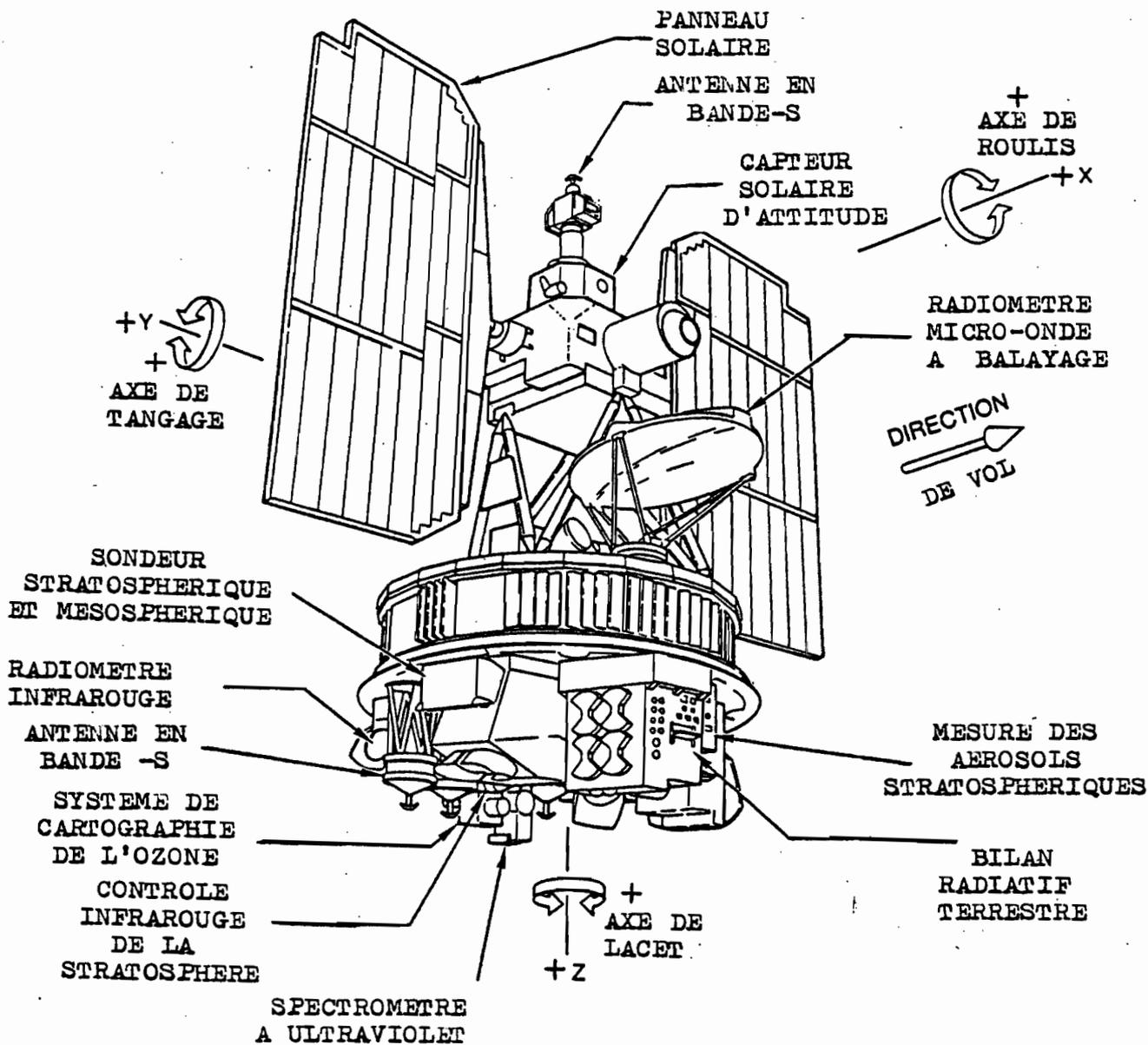


FIG.6 NIMBUS - G

SEASAT (fig. 7)

:	:	:	:
:	:	:	:
:	lancement	: 26 juin 1978	:
:	:	:	:
:	radiomètre multispectral	: 0,49 - 0,94 μ m (visible) résolution 3 km	:
:	:	10,5 - 12,5 μ m (infrarouge thermique) " 5 km	:
:	:	:	:
:	radiomètre à micro-ondes	: idem Nimbus G	:
:	:	:	:
:	scatteromètre	: 14,5 GHz	résolution 50 km
:	:	:	:
:	radar à antenne synthétique	: 1,3 GHz	résolution 25 m
:	(S.A.R.)	: Synthetic Aperture Radar	:
:	:	:	:
:	répétitivité	: 36 heures, orbite circulaire polaire	:
:	:	:	:
:	:	:	:
:	:	:	:
:	:	:	:
:	:	:	:

Remarque : Premier satellite à disposer d'un émetteur d'un KW pour le radar à antenne synthétique : ceci signifie que l'antenne est constituée, en fait, par le déplacement de la plateforme et mesure une longueur $x = vt$. On obtient ainsi la "radar-image" (v = vitesse du satellite, t = temps de mesure).

En panne depuis le 10 octobre 1978.

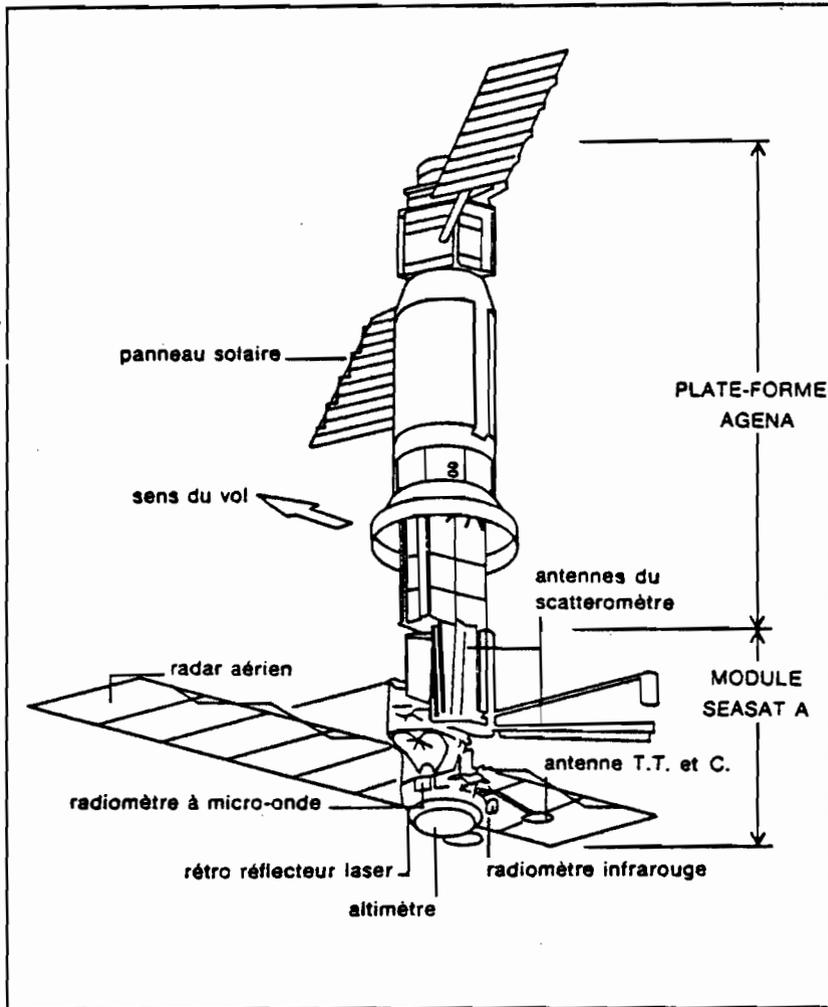


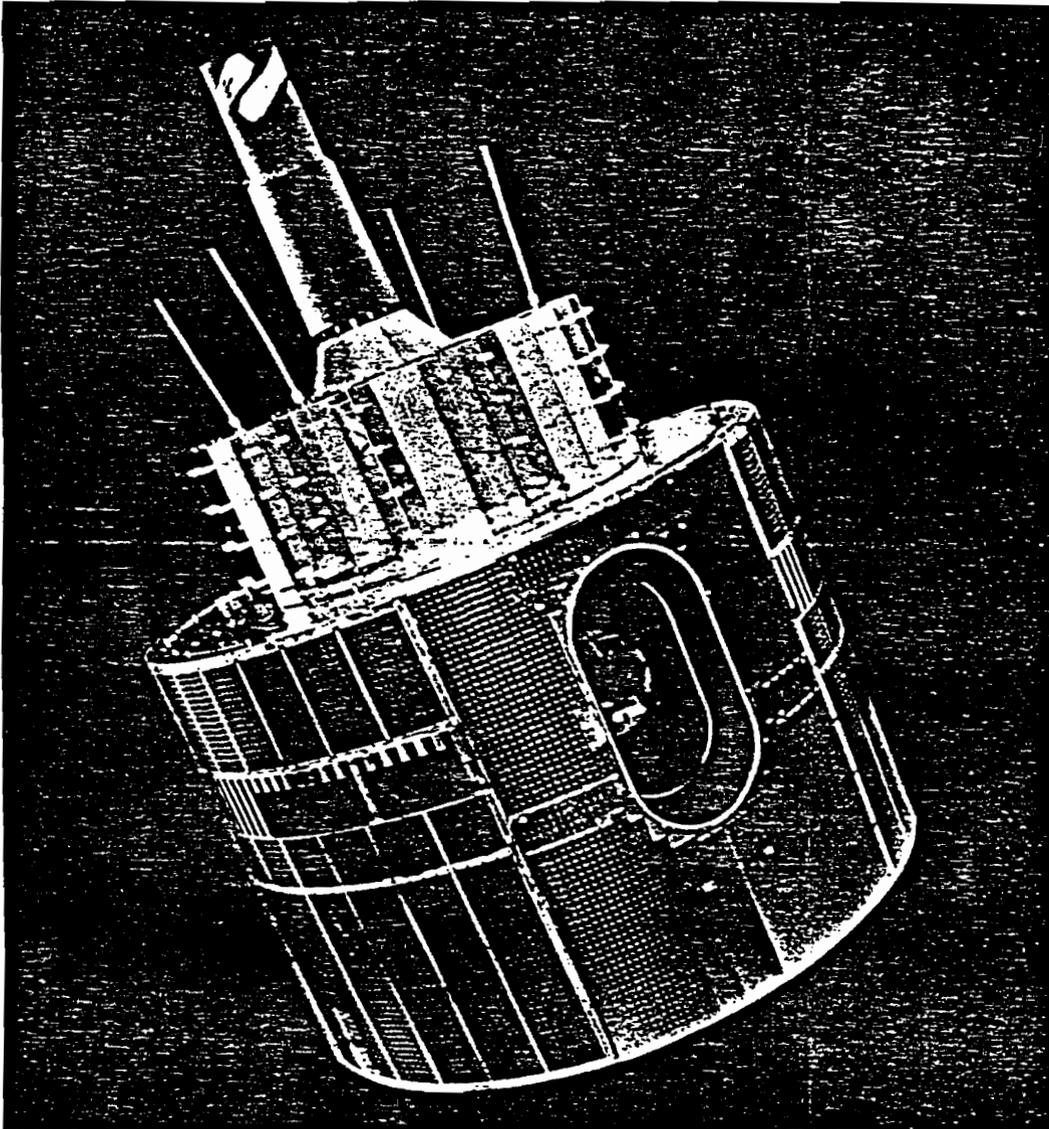
FIG.7

SEASAT (La Recherche, 9I)

METEOSAT (fig. 8)

lancement	: 23 novembre 1977	
radiomètre 3 canaux	: 0,7 - 1,1 μm	résolution 2,5 km
	: 5,7 - 7,1 μm	(canal "vapeur d'eau") résolution 5 km
	: 10,5 - 12,5 μm	résolution 5 km
scène	: terre entière	
géostationnaire	: à 36.000 km	
répétitivité	: 1 image toutes les 30 minutes, en théorie	
	: 2 par jour, en pratique.	

Remarque : en panne depuis août 1979.



LE SATELLITE METEOSAT

FIG.8

CHAPITRE II

LES PRINCIPAUX TRAITEMENTS EN TELEDETECTION

Les traitements en télédétection ont pour objectif la mise en forme des données saisies par les capteurs, afin de permettre l'interprétation et la traduction de ces données, en informations adaptées aux besoins des utilisateurs.

On distingue les traitements analogiques et les traitements numériques. Pour les premiers, on travaille avec une traduction sur film des données numériques brutes, en distinguant les traitements photochimiques classiques - très utilisés - des traitements optiques et électro-optiques en optique de FOURIER, moins utilisés pour des raisons techniques. Le traitement numérique utilise largement les possibilités actuelles de l'informatique et les nuances faites dans leurs fonctions sont dues principalement au choix de l'algorithme de traitement et du volume des données. Dans certains cas particuliers et pour répondre à des besoins spécifiques, on effectuera sur les données brutes des prétraitements composés de corrections géométriques et radiométriques, de façon à compenser les imperfections technologiques du capteur ou les perturbations atmosphériques.

Les nombreuses expériences, menées depuis le lancement du premier satellite LANDSAT (1972), montrent qu'il n'y a pas de bons ou de mauvais traitements, mais que le succès dépend surtout des hypothèses de travail qui sont faites, vis-à-vis de l'objectif. Dans tous les cas, la contribution humaine est importante : dans le traitement photochimique, on fait par exemple appel aux qualités de photo-interprétation de l'utilisateur et, dans le traitement numérique, on fait toujours une hypothèse sur la répartition de l'information.

A - TRAITEMENTS ANALOGIQUES

1 - Traitements photochimiques

Le traitement photochimique est, en général, considéré comme une étape précédant le traitement numérique. Néanmoins, pour certaines applications, l'outil photochimique peut apporter la même réponse, à un coût plus faible, que le traitement numérique.

Les données satellite sont obtenues sur film, en négatif, par traduction de la bande magnétique contenant les données brutes, en 16 niveaux de gris.

On distingue deux types de traitements :

- traitement géométrique qui permet de corriger les distorsions introduites lors de la saisie des données. On rétablit ainsi la correspondance bi-univoque entre chaque point de l'image et l'espace lui correspondant réellement au sol. Les systèmes optiques utilisés permettent de faire de simples translations, des rotations, des homothéties ou des anamorphoses (fig. 9).

Deux objectifs sont alors visés : recalage de l'image par rapport à une carte, ou superposition de données saisies à des dates différentes. Dans la pratique, les qualités géométriques des données (principalement celles du LANDSAT) permettent des superpositions de cartes ou d'images pour des zones dont la surface représente 1/5^è ou 1/10^è de la scène, et la correction géométrique ne se justifie pas. C'est pour cette raison que les corrections géométriques de ce type sont peu utilisées.

- traitement photochimique au sens strict (fig. 10) :

- . Le traitement le plus simple consiste à faire un agrandissement du négatif au millionième, pour atteindre des échelles comprises entre le 1/500.000^è et le 1/100.000^è. Le tirage sur film est, en général, préféré au tirage papier, car on peut compléter l'examen des zones au rétroprojecteur (avec des agrandissements de 5 à 10 supplémentaires) et faire éventuellement des mesures de densité photochimique sur des parcelles test.

De tels documents sont adaptés au zonage, à l'analyse de texture ou de structure, au repérage de phénomènes intéressant des zones vastes et dont la saisie des données, par les moyens classiques, pose des problèmes tactiques.

- . La composition colorée est une synthèse que l'on réalise à partir des canaux ($n \geq 3$) fournis par les systèmes détecteurs des satellites. Par exemple, pour le LANDSAT, on superpose 3 des 4 canaux d'une même scène en utilisant, pour chaque canal, un pigment coloré : en général, la couleur cyan est attribuée au canal 7 (infrarouge), le magenta au canal 5 (visible-rouge) et le jaune au canal 4, en réalisant ainsi une synthèse dite soustractive (à l'inverse de la synthèse additive utilisée dans un téléviseur couleur).

Ce traitement est simple à réaliser et ne comporte pas d'écueil technique puisqu'il utilise le procédé classique de la photographie couleur ou un autre procédé, également simple, dit diazoïque (superposition de films colorés et observation par transparence).

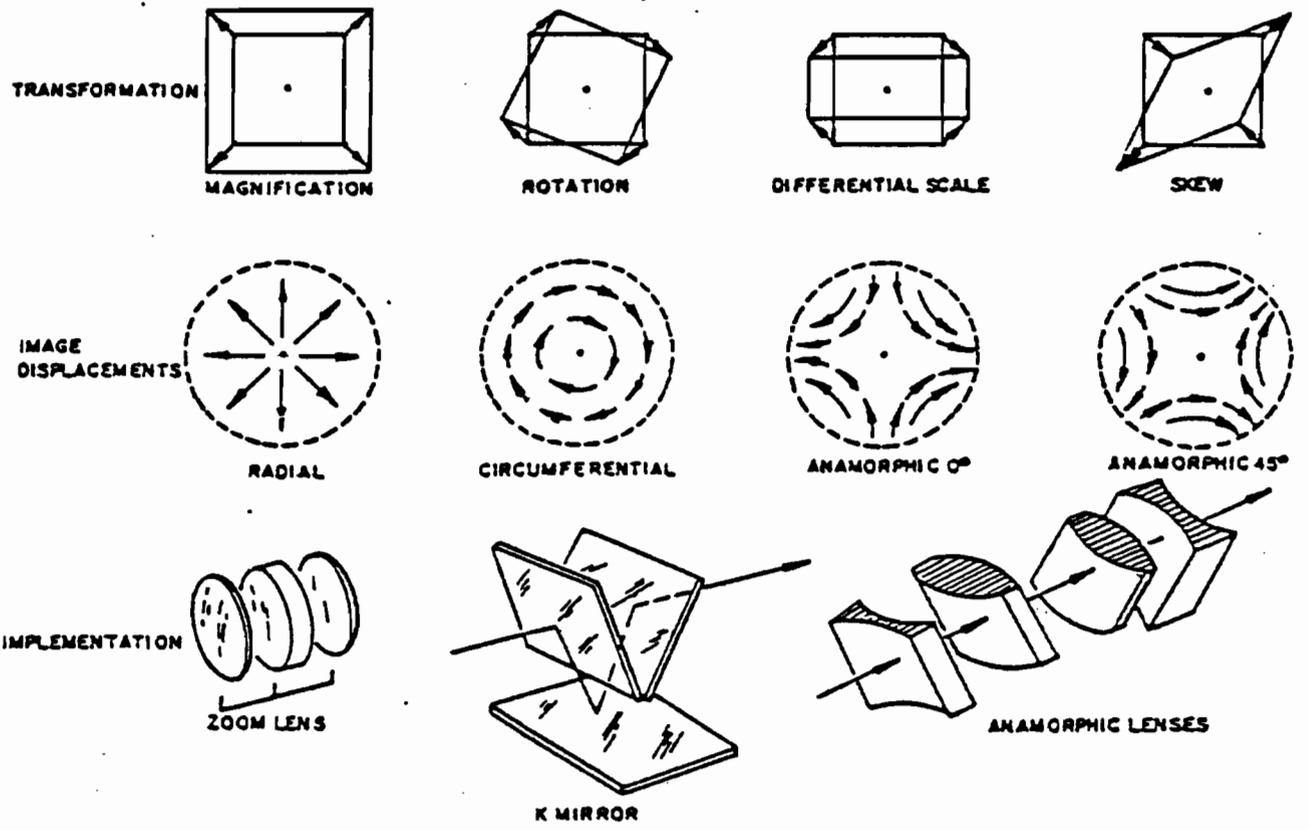


FIG.9

Traitement Géométrique , d'après MONTRICHER G.
et al. 1979.

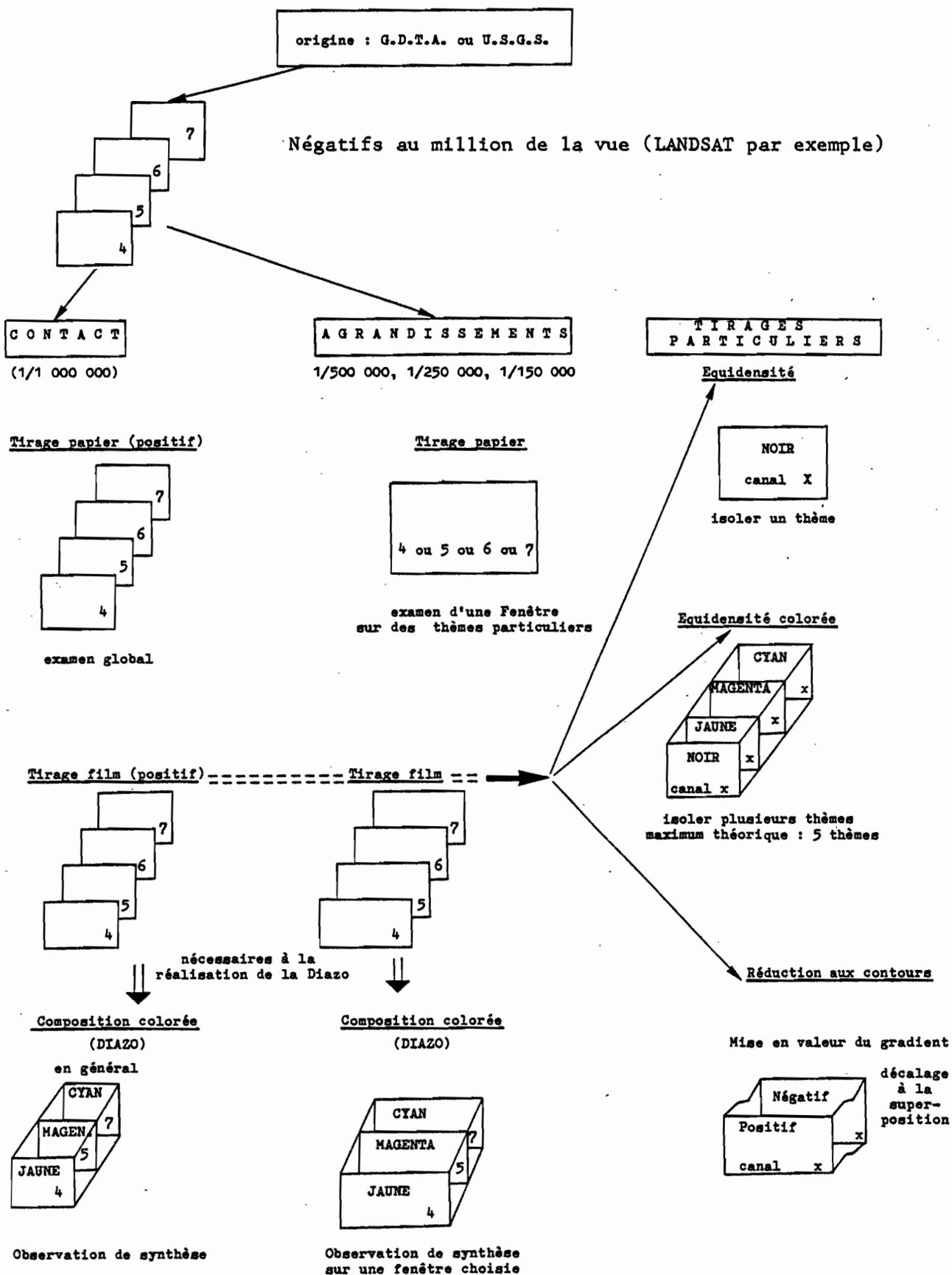


FIG.10

Principaux traitements photochimiques
(D'après LOINTIER M. ; PIEYNS S., 1979)

- La modification du facteur de contraste (δ) (cf. fig. 11 A) permet de réaliser un document visant à répondre à un objectif déjà bien défini.

En effet, à partir du "standard", c'est-à-dire du film négatif dont les niveaux de gris sont choisis avec un écart de densité constant, on peut "favoriser" une plage de densité au détriment du reste de l'information en modifiant les paramètres photochimiques tels que : qualité du papier, temps d'exposition, température, vitesse de révélation (BEST.R.G. et SMITH J.R. 1978). Ce traitement est très simple et à la portée de tout laboratoire classique.

- L'équidensité est un traitement qui permet de faire un classement des valeurs radiométriques lorsque l'objectif est clairement défini et que l'opérateur s'est assuré, par les mesures de densité photochimique, qu'il existe une bonne corrélation entre le problème posé et la radiométrie des canaux choisis. On utilise dans ce traitement un film-trait (réponse binaire) qui permet d'obtenir l'apparition (ou la disparition) des pigments pour une valeur précise de densité (fig. 11 B et C).

A l'aide de films-trait à pigments noirs et colorés, on peut réaliser une équidensité colorée (fig. 12) et obtenir, par superposition de 4 films, 5 plages de densité qui, bien choisies, peuvent correspondre à des thèmes recherchés : eau, feuillus, résineux, etc...

Cette méthode demande également peu de matériel et permet de traiter, pour un coût modeste, une partie ou l'ensemble d'une scène.

- La réduction aux contours est un procédé créé dès les débuts de la photographie. Il permet de mettre en valeur les différences de gradient des données radiométriques. La superposition rigoureuse d'un négatif et de son positif, puis le tirage de l'ensemble, par contact, à l'aide d'un éclairage oblique, met en évidence toute orientation privilégiée d'éléments linéaires, ou toute variation rapide de la radiométrie dans l'espace étudié.

Comme le traitement précédant, la réduction aux contours ne peut être exécutée qu'à partir de l'observation des films "standard", pour lesquels la relation "problème posé - radiométrie" est définie.

2 - Traitements optiques

Les méthodes optiques ont fait l'objet d'une étude mathématique et technique importante, il y a une vingtaine d'années environ, surtout lors de l'introduction des sources de lumière cohérente (laser). Ces systèmes permettent le traitement des données analogiques, avec des algorithmes aussi performants que ceux utilisés en numérique avec les ordinateurs. Ces dernières années, on a préféré faire ces traitements par ordinateur, du fait que la donnée satellite fournie par les centres de réception d'images est sur support magnétique et digitalisée en général.

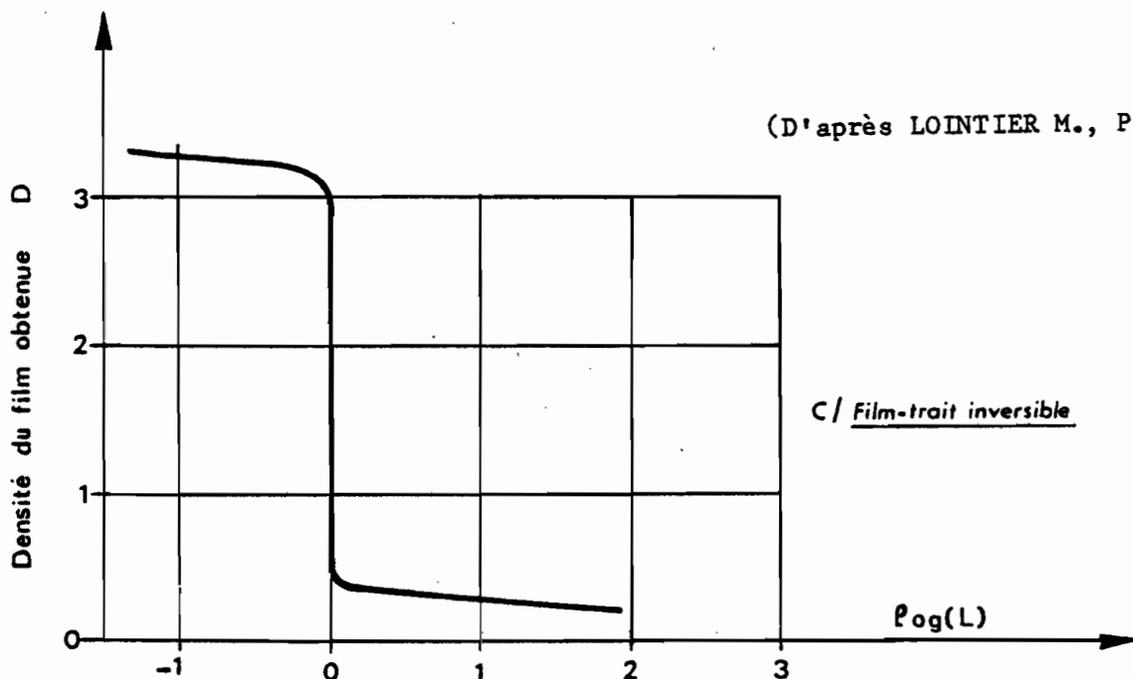
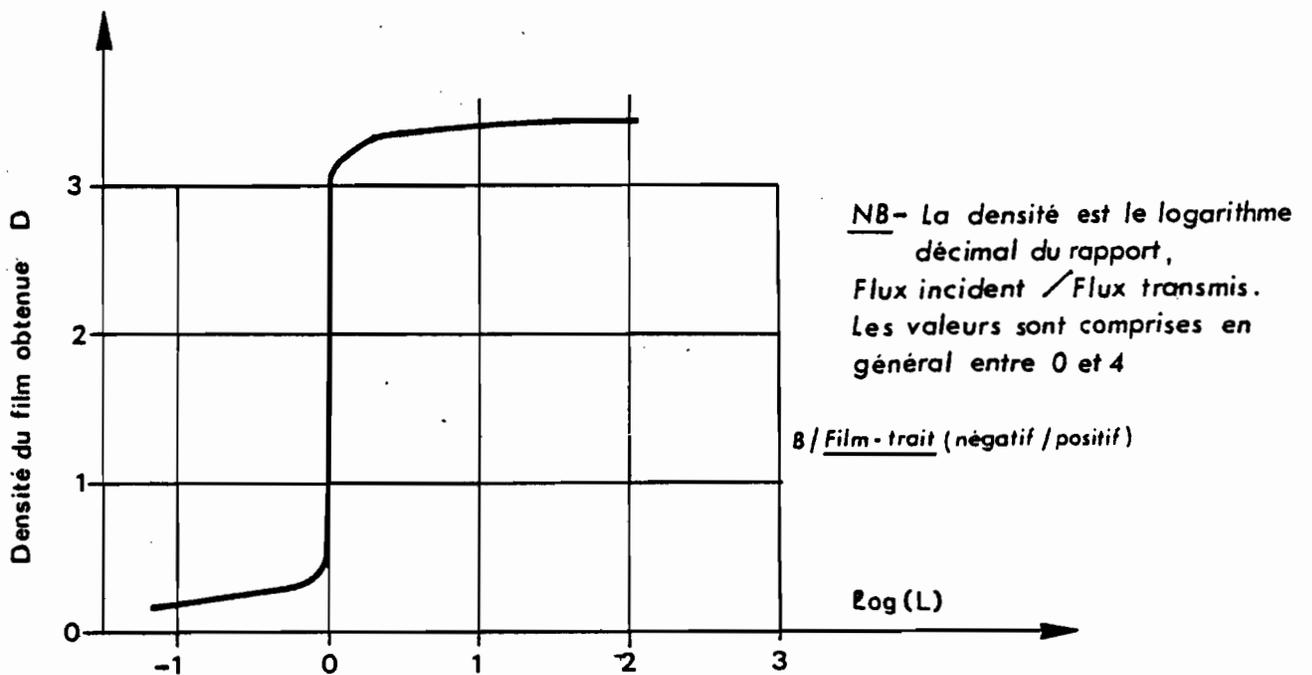
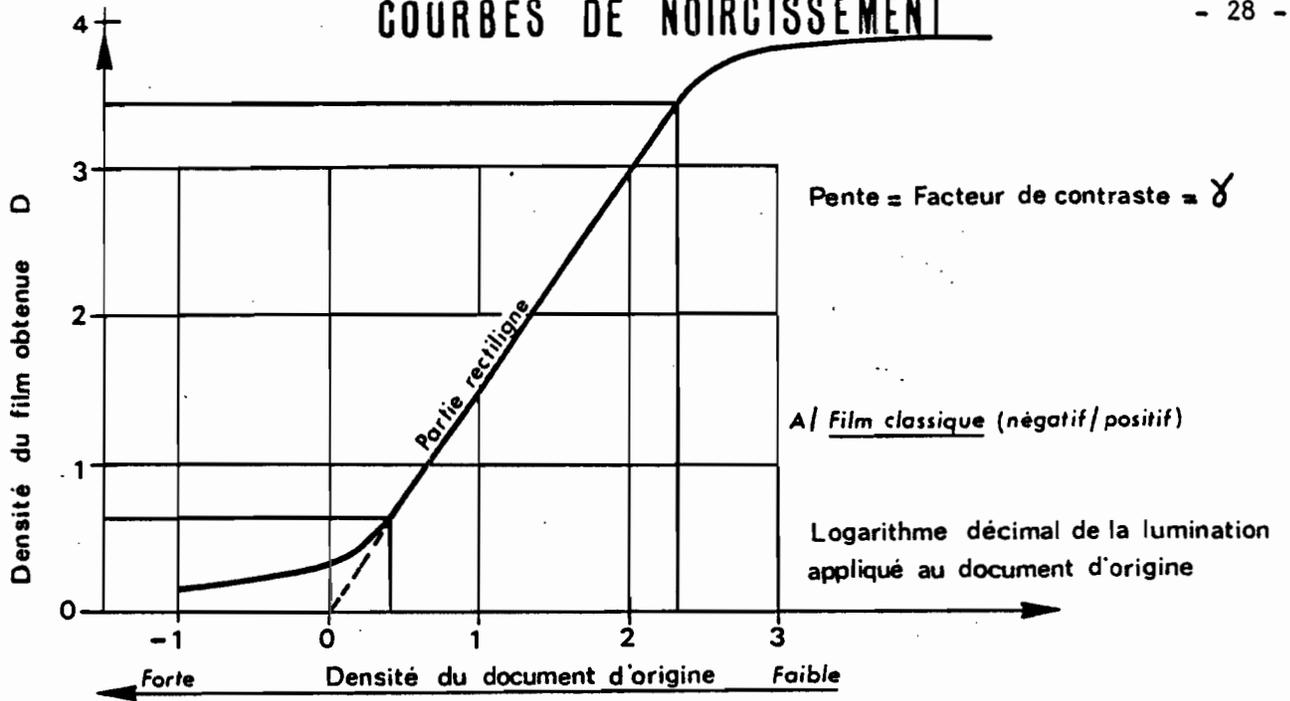


FIG. II

(D'après LOINTIER M., PIEYNS S., 1979)

Dans l'avenir, il est fort probable que l'on redéveloppe les méthodes optiques pour deux raisons :

- l'information de certains capteurs, en particulier les radiomètres à micro-ondes et la radarimage (système à ouverture synthétique, SAR du SEASAT), est analogique.
- la quantité de données augmente très rapidement avec le nombre de satellites et les types de capteurs (une image LANDSAT comporte déjà 7.10^6 pixels, pour lesquels on a 4 valeurs de réflectance). Le problème de saturation des ordinateurs se pose déjà, surtout lorsque les algorithmes sont complexes.

L'avantage du traitement optique est de pouvoir traiter tous les points d'un film "en parallèle" et à la vitesse de la lumière. En numérique, on est obligé de travailler "en série", pixel par pixel.

Les opérations les plus simples telles que addition, multiplication, soustraction sont réalisables, mais c'est surtout la possibilité de faire une transformée de FOURIER sur les données qui confère aux traitements optiques un réel intérêt. En effet, on réalise cette transformée simplement, en lumière cohérente, avec une lentille convergente bisphérique qui forme, dans son plan focal image, la transformée de FOURIER bidimensionnelle (fonction des fréquences spatiales (fig. 13)

Ces méthodes permettent d'effectuer des filtrages, plus faciles à faire dans l'espace des fréquences que dans l'espace usuel. On réalise également des convolutions, des corrélations et des moyennages (G. de MONTRICHER et al., 1979). On peut étudier ainsi la périodicité et l'orientation d'un réseau hydrographique.

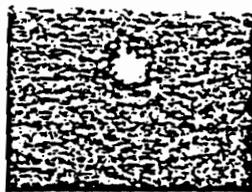
B - TRAITEMENTS NUMERIQUES

L'emploi de l'informatique, pour traiter les données numérisées d'un satellite, ouvre un large champ d'utilisation des algorithmes et les applications ne sont limitées, en général, que par le temps de calcul et la place mémoire des machines.

La relation entre la réflectance et la nature de l'objet au sol est déterministe, mais bien souvent, vu les nombreux paramètres entrant dans la définition de cette réflectance, on abandonne la recherche de cette relation déterministe pour une méthode statistique. On doit donc faire, en premier lieu, une hypothèse statistique de répartition de l'information.



(a)



(b)

Terrain naturel



(a)



(b)

Verger

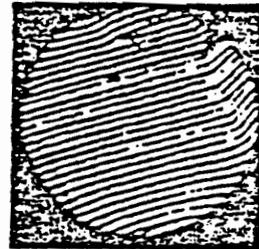


(a)



(b)

Autoroute

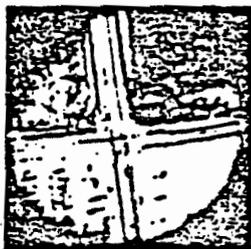


(a)

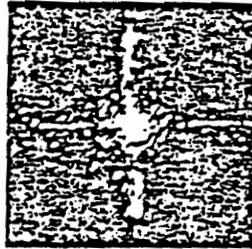


(b)

Verger à flanc de coteau



(a)

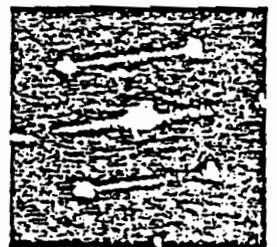


(b)

Croisement de routes

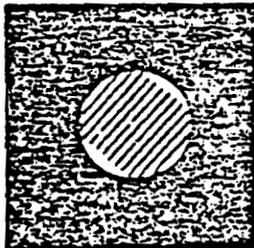


(a)

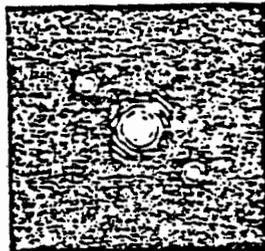


(b)

Verger et chemins d'exploitation

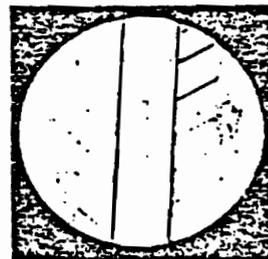


(a)

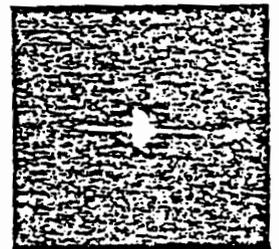


(b)

Vignoble

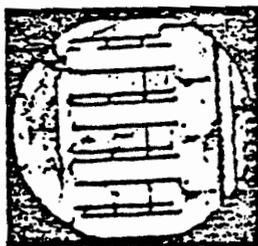


(a)

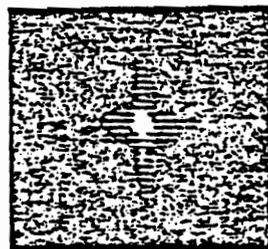


(b)

Grandes routes avec chevrons

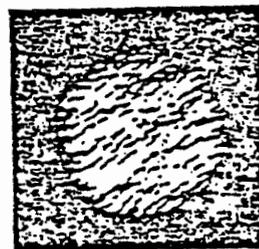


(a)

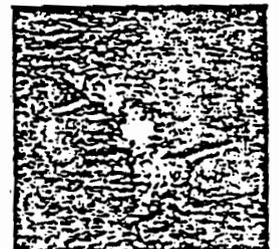


(b)

Complexe de grands immeubles

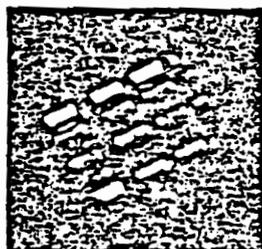


(a)

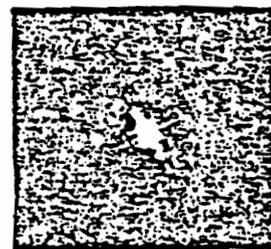


(b)

Bateau en mer et son sillage



(a)



(b)

Complexe de petits immeubles



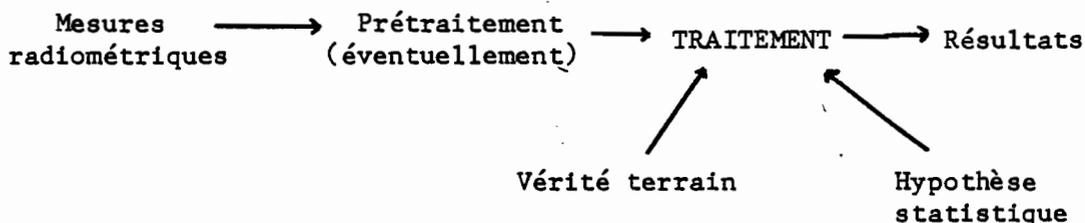
(a)



(b)

Sillage seul

On aboutit au schéma suivant :



Pour un objet au sol de même nature (par exemple l'eau d'un lac), on obtiendra plusieurs valeurs radiométriques proches les unes des autres. On considère donc que l'eau sera caractérisée, non plus par une valeur précise de la radiométrie, mais par une fonction numérique de l'énergie reçue qui donne le pourcentage de taches élémentaires qui ont cette énergie. C'est une densité de probabilité que l'on ne peut construire entièrement, puisque le nombre de mesures est insuffisant (quelques pixels constituant la vérité terrain). L'hypothèse statistique est employée pour décrire cette fonction densité de probabilité. On peut choisir une fonction constante dans l'intervalle des valeurs, ou une fonction mathématique comme celle de GAUSS par exemple.

Les traitements numériques peuvent se diviser en plusieurs grandes classes : ceux qui n'utilisent que l'information radiométrique et ceux qui associent dans le traitement, la valeur radiométrique des pixels voisins, ou l'information d'une autre date. G. de MONTRICHER et al (1979) distinguent, pour le dernier cas, le traitement spatial/spectral (et l'inverse) du traitement spectral/temporel.

1 - Traitements utilisant l'information radiométrique

Ces méthodes d'analyse sont totalement différentes des processus de photo-interprétation puisque chaque pixel est traité indépendamment de son voisin, par l'ordinateur. Dans les cas où il y a intervention de l'opérateur en cours de traitement, on parlera de "traitement supervisé".

On distingue les méthodes par dictionnaire, les méthodes non supervisées, supervisées et supervisées interactives.

- La méthode par dictionnaire suppose une relation constante entre l'objet et la valeur radiométrique. En 1971, l'Université de MICHIGAN a constitué un catalogue de valeurs auxquelles était associée la nature des objets au sol. Ces techniques, séduisantes au début de la télédétection spatiale, ont été abandonnées du fait de l'instabilité, dans le temps et dans l'espace, de la relation mesure-objet.

- la méthode non supervisée élimine la recherche de vérité terrain et doit améliorer la lisibilité du document d'origine. Par exemple, l'analyse des informations LANDSAT dans les 4 canaux - composés en moyenne d'une cinquantaine de niveaux de réflectance par canal - conduit à examiner une population de pixels dont le nombre de classes théoriques est de $50^4 = 6,25 \cdot 10^6$. On réalise donc un traitement qui ne conservera, tous calculs faits, qu'une vingtaine de classes. De nombreuses classes seront regroupées sur la base de l'hypothèse statistique choisie.

On cherche ensuite à faire correspondre les classes obtenues avec une cartographie thématique. Dans le cas où les correspondances sont faibles, on recommence le traitement avec une autre hypothèse statistique.

Ce traitement pourrait être intéressant dans l'étude d'une zone absolument inconnue. Toutefois, le choix de l'hypothèse statistique est alors décisif, ce qui conduit l'utilisateur à rechercher une loi dont l'adéquation au problème n'existe peut-être pas.

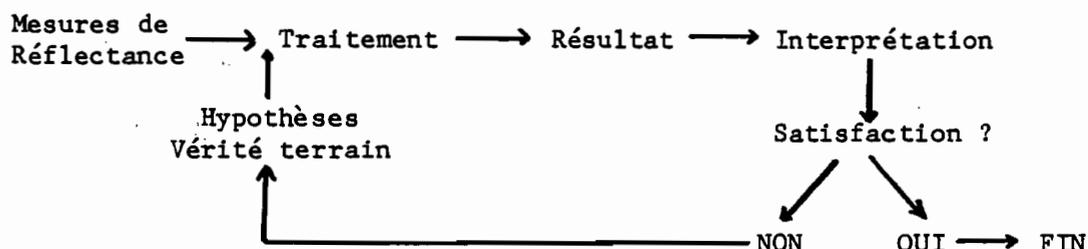
- la méthode supervisée utilise des vérités terrain pour "calibrer" la relation mesure-objet, en admettant que celle-ci n'est pas stable dans le temps. Pour chaque nouvelle information, on effectue la "calibration" sur un nombre de pixels connus et repérés au sol et on estime la nature de l'hypothèse statistique. Cette relation est ensuite utilisée pour classer les autres points de l'image. L'opérateur intervient donc au début du traitement pour repérer sur l'information satellite les zones ou les parcelles pour lesquelles il possède une vérité terrain. Deux problèmes surgissent alors :

- . la correspondance géographique, entre les données étudiées et la vérité terrain, est assurée par un changement de repère - lignes-colonnes satellite, projection cartographique classique - d'où une certaine imprécision.
- . la représentativité des parcelles de vérité terrain doit être très bonne, ce dont on est jamais assuré !

Le classement des points s'effectue à l'aide de la relation statistique choisie (uniforme ou gaussienne) par l'opérateur.

Toutefois, la méthode supervisée est très utilisée et, pour la rendre plus performante, on la complète par un traitement géométrique : on calcule, dans l'espace des canaux, la distance entre les valeurs de chaque pixel traité et le nuage de points retenus pour la vérité terrain. On définit ensuite une distance critique qui permet de décider de l'appartenance d'un point à une classe.

- la méthode supervisée interactive découle de la précédente, mais on perfectionne le schéma par une boucle de rétro-action qui permet de modifier les paramètres, afin d'obtenir un résultat satisfaisant. On a le schéma suivant :



Cette méthode, très utilisée, repose sur un principe expérimental souvent vérifié : "un faible effort d'interprétation permet une grande amélioration du résultat".

Les systèmes de traitement qui utilisent cette méthode sont construits :

- autour d'algorithmes simples (seuillage des valeurs) et permettent de traiter rapidement un grand nombre de points,
- autour d'algorithmes plus complexes, avec une possibilité réduite quant au nombre de points traités, du fait des coûts élevés entraînés par le temps de calcul.

2 - Traitements utilisant l'information spatiale et spectrale

Ces systèmes devraient faire une approche automatique du travail réalisé par le photo-interprète. L'utilisation d'une information spatiale signifie la prise en compte, dans le traitement, des formes caractéristiques du "paysage". On peut effectuer ce type de traitement avant un traitement radiométrique (traitement spatial-spectral) ou après (spectral-spatial).

Dans le premier cas, on va traiter un point, en tenant compte des valeurs radiométriques des points voisins (les 8 qui l'entourent ou plus). S'il y a 4 canaux, on a donc 36 mesures à traiter pour chaque pixel. On imagine immédiatement les conséquences sur le temps de calcul.

Dans le deuxième cas, on réalise d'abord le traitement sur les radiométries (spectral), puis on fait une hypothèse de répartition spatiale de l'information. C'est le cas du lissage, par exemple, où l'hypothèse est la recherche de zones homogènes.

Ces méthodes sont très peu développées, car elles sont "gourmandes" en temps machine. De plus, il reste à explorer un domaine assez vaste concernant les relations des points avec leurs voisins et le choix de l'hypothèse contenant l'ensemble des règles auxquelles l'image doit obéir.

3 - Traitements utilisant l'information spectrale et temporelle

Le principe consiste à affecter à un point du sol, non plus n valeurs radiométriques d'une même date, mais K.n valeurs, où K est le nombre de dates d'observations disponibles. Ces méthodes sont plus riches en possibilités de traitement que les précédentes, à condition de surmonter deux obstacles techniques importants :

- Il faut pouvoir traiter toutes les valeurs ensemble, donc celles-ci doivent être homogènes. Il est fréquent, malheureusement, que les capteurs soient affectés d'une dérive, nécessitant des corrections radiométriques basées sur la permanence d'un objet test, bien repéré au sol (aérodrome par exemple), en faisant sur cet objet une première hypothèse de stabilité dans le temps.
- Il faut pouvoir attribuer à un point du sol toujours la même position. Or, à des dates différentes, le "maillage" effectué par le capteur n'est jamais rigoureusement le même. On doit donc faire un recalage géométrique et décider quelle radiométrie affecter au maillage initial.

Ces méthodes intéressantes ne sont pas très développées, du fait de leurs coûts importants. Le recalage, sur une grille donnée, d'une image LANDSAT de 7.10^6 pixels demande environ une heure de temps machine sur un gros ordinateur. L'information temporelle constitue pourtant l'intérêt majeur des satellites dont les orbites sont justement calculées pour qu'ils repassent régulièrement au-dessus du même point.

Actuellement, on utilise cette information temporelle dans des traitements sur de petites zones et pour deux ou trois dates (SCARPACE et al. 1979), (SARRAT D. 1978).

C - PRINCIPAUX ALGORITHMES UTILISES

- 1 - La classification des données consiste à procéder à une analyse non supervisée, lorsque l'on ne dispose pas de vérité terrain. Le modèle statistique, dont l'algorithme le plus utilisé est les "Nuées Dynamiques", comporte deux éléments à définir au début du traitement :
 - un algorithme de classement (Gaussien par exemple),
 - un nombre de classes.

Cette méthode n'apporte pas de résultat intéressant lorsque l'on cherche à réaliser une cartographie thématique par exemple. Le fait de fixer le nombre de classes au début constitue un gros handicap et souvent un choix difficile à faire.

- 2 - Le classement des données consiste à procéder à une analyse supervisée lorsque l'on dispose d'une vérité terrain. Le système le plus simple est le seuillage qui s'avère efficace lorsque l'on est dans un processus interactif. En effet, l'opérateur recherche les seuils en visualisant immédiatement sur un écran le résultat (LOINTIER-PIEYNS 1979), (Procédure LOTERIE ORSTOM 1978). Les méthodes "Gaussiennes" sont également utilisées dans les processus interactifs, avec un temps de visualisation un peu plus long et des résultats satisfaisants. Cette méthode est utilisée à l'I.F.P.* , au B.R.G.M.** , à l'I.G.N.*** et au C.N.E.S.****.

* I.F.P. : Institut Français du Pétrole
** B.R.G.M. : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
*** I.G.N. : Institut Géographique National
**** C.N.E.S. : Centre National d'Etudes Spatiales

- 3 - La recherche de "signatures" repose sur l'utilisation des deux principaux algorithmes : Analyse en composantes principales et Analyse des correspondances (BENZECRI). Ces méthodes s'adaptent au traitement des données satellite bien que l'interprétation du résultat soit souvent délicate. On observe, en effet, un lissage sur les premières composantes et on perd la possibilité de retenir et de classer des points particuliers, présents en faible quantité (autoroutes par exemple).

CONCLUSIONS

Les données de Télédétection spatiale fournissent des informations de plus en plus nombreuses sur notre planète, tout en posant de nouveaux problèmes d'interprétation de ces informations. Les méthodes photochimiques classiques sont au point et permettent de traiter de 1 à 3 canaux en même temps. Elles sont limitées par leur information qui est dégradée (16 niveaux) par rapport aux données numériques et par le nombre restreint de traitements que l'on peut effectuer. Leur avantage est leur faible coût.

Les traitements optiques ont été délaissés mais, certains problèmes techniques résolus, il semble que ces méthodes apporteront dans l'avenir une réponse au problème posé par le traitement de nombreuses données.

Les traitements numériques sont actuellement les plus utilisés, bien que leurs coûts soient élevés (sauf dans le cas des algorithmes simples de type seuillage).

Le traitement de l'information satellite est encore au stade expérimental, d'autant que la politique actuelle est d'envoyer de nombreux satellites d'observation fournissant des données très variées (visible, infrarouge thermique, micro-ondes) et de nature parfois mal connue. D'ores et déjà, on peut penser que la méthodologie de traitement dépend des thèmes abordés (Hydrologie, Hydrogéologie) et que ces traitements doivent être adaptés aux différentes zones géographiques mondiales.

CHAPITRE III

POSSIBILITES ACTUELLES ET FUTURES
DANS LE DOMAINE DE L'HYDROLOGIE

—————

Les satellites conçus pour l'utilisation des ressources terrestres sont déjà entrés dans de nombreux domaines d'application en Hydrologie. A ce jour, toutes les principales expérimentations ont été conduites en utilisant les données du satellite LANDSAT comportant un capteur dans le spectre visible et proche-infrarouge. Certains travaux se sont déjà révélés positifs, tant par la nouveauté de l'information apportée, que par le faible coût d'utilisation comparé aux moyens conventionnels (missions aéroportées).

L'emploi de plus en plus fréquent de données provenant de capteurs fonctionnant dans les trois principaux domaines du spectre électromagnétique (visible, infrarouge thermique, micro-ondes) permet et permettra d'avoir une vision originale et inédite des phénomènes hydrologiques. Les nombreuses possibilités des traitements analogiques ou numériques offrent l'avantage d'interpréter rapidement des données dispersées dans l'espace et dans le temps. "L'outil" télédétection apporte des informations aux responsables de la gestion des eaux, des ressources en eau et peut contribuer à l'étude des bilans hydriques et au fonctionnement des modèles hydrologiques.

A - GESTION DE L'EAU

1 - Surfaces en eau libre

Les travaux réalisés à partir des données LANDSAT disponibles depuis 1972 ont démontré les possibilités de détection des surfaces en eau grâce aux canaux infrarouge (6 et 7). L'incertitude est assez faible et le taux de reconnaissance est de 92 % (WHITE M.E. 1978) ou même de 95 % (LOINTIER-PIEYNS 1979). Ces facultés sont malheureusement atténuées par la résolution au sol qui, actuellement, est de 80 m (M.S.S.) et qui ne permet pas de distinguer des rivières de largeur inférieure à 100 m.

Néanmoins, pour de nombreuses applications, cette résolution au sol s'est révélée suffisante. La cartographie des surfaces en eau libre a été traitée automatiquement à partir de données sur film (WHITE M.E. 1978) ou directement, par des algorithmes simples de seuillage du canal 7 à partir de la donnée numérique. LEMOALLE (1978) a pu dresser ainsi la cartographie du lac Tchad et évaluer la surface du lac, problème rendu très délicat du fait des nombreuses îles présentes au centre de la partie nord et à l'ouest. Il en tire une relation surface/altitude du plan d'eau par comparaison de plusieurs dates. NOEL (1978) étudie le delta intérieur du Niger afin d'établir une cartographie précise des surfaces en eau à plusieurs dates. Afin de "caler" les traitements, une campagne de vérité terrain a été effectuée en 1976-1977, pour évaluer l'extension des plantes aquatiques venant perturber la reconnaissance de l'eau.

Lorsque l'on s'est assuré du bon fonctionnement du traitement, l'évaluation de la surface ne pose aucun problème, du fait de la nature numérique de l'information (1 pixel de LANDSAT mesure 0,4424 hectares).

La cartographie permet de dresser, d'autre part, un inventaire des étangs, surtout lorsque ceux-ci sont temporaires. La fréquence croissante des passages de satellites devrait mettre en valeur les études dans le temps et dans l'espace, des plans d'eau (fig. 14 et 15) et même des petits étangs dont la détection s'effectue, à partir d'une surface de 5 pixels LANDSAT, soit 2 hectares (LOINTIER-PIEYNS, 1979).

Récemment (JARMAN.J. 1980, communication orale), la détection des petits plans d'eau a permis de localiser aux U.S.A. plus de 2000 retenues d'eau "sauvages" qui ont toutes été inspectées par la suite, afin de juger de leur état et des risques en cas de crue. Le satellite s'est révélé particulièrement adapté à cet inventaire, sur le plan des coûts et de la rapidité.

Pour l'avenir, c'est certainement dans ces applications simples que seront utilisées, le plus fréquemment, les données satellite des canaux visibles et proche infrarouge. S'il est très probable que la résolution au sol devienne meilleure, il faut surtout espérer que l'on sache mettre en place un organisme de distribution des données, rapide et plus efficace que celui qui existe actuellement pour le LANDSAT (G.D.T.A.* pour la France).

2 - Crues et Inondations

Chaque année, les Etats-Unis dépensent des milliards de dollars (6,5 en 1966 selon RANGO, 1974) pour la protection contre les inondations. Il est d'ailleurs prévu que ces dépenses augmenteront jusqu'en l'an 2000, du fait du développement important de l'activité économique et humaine dans les zones inondables.

La recherche de critères de définition de ces zones, dans le cas d'une crue centenaire, s'effectue d'une façon classique par 4 méthodes complémentaires :

- observation des laissées de crues, par des enquêtes ponctuelles, avec le risque d'avoir perdu de l'information, surtout si celle-ci est ancienne.
- étude géomorphologique des terrasses alluviales.
- étude horizontale et verticale des sols, afin d'apprécier l'extension du phénomène dans l'espace et le temps.
- étude des végétaux caractérisant les zones d'inondation.

* G.D.T.A. : Groupement pour le Développement de la Télédétection-Aérospatiale.

FIG. I4

Traitement photochimique par équidensité (noir, blanc) de la zone de Fénétrange, du IS 04 76, échelle I/150000 ème.



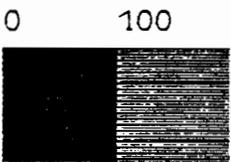
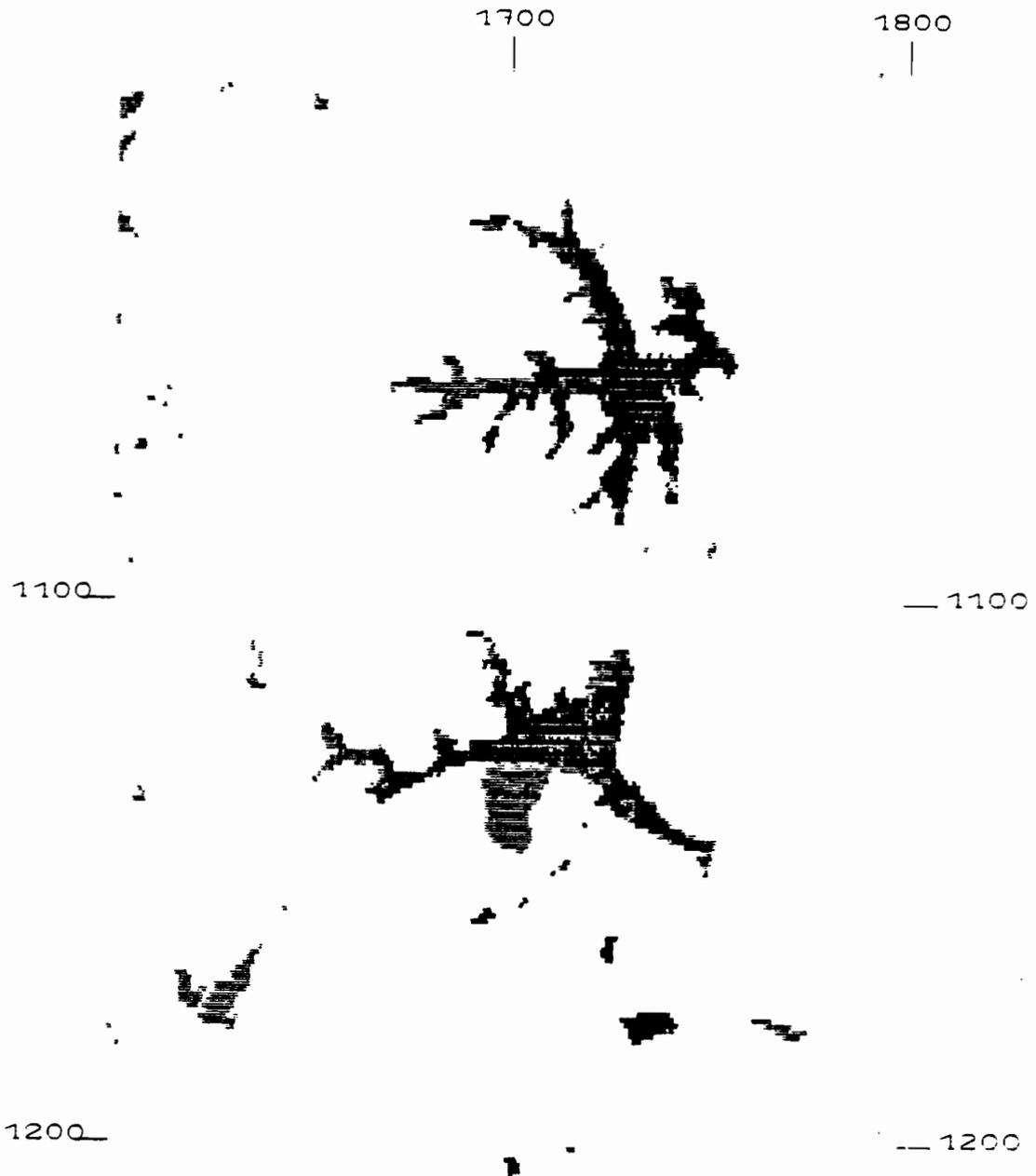


FIG.15

Traitement numérique de la zone de Fénétrange
du I3 08 76 , échelle 1/100000 ème.

		0	1		
CANAL 4		0	255		
CANAL 5		27	33	34	45
CANAL 6		0	255	1700	
CANAL 7		0	40		1800

Toutes ces méthodes ont des inconvénients et SELLERS (1978) les a comparées aux résultats obtenus par l'analyse de clichés de satellite. C'est grâce à l'observation et à l'analyse numérique de deux dates - l'une l'hiver, l'autre l'été - l'une en période d'inondation et l'autre en étiage - qu'il réalise la délimitation des zones inondées. Le programme de traitement utilise les données LANDSAT. L'ordinateur travaille sur 8 canaux (2 dates, cf. chapitre II) et par analyse des différences radiométriques des sols observés.

Pour s'assurer du bon fonctionnement de la méthode, on compare les résultats avec ceux de quatre photo-interprètes sur données cartographiques. Les résultats sont quasi-identiques pour les zones cultivées et industrialisées, avec un coefficient de corrélation voisin de 0,90. Seules les zones en forêt sont difficiles à étudier, où la surface des zones inondables est surestimée. La comparaison avec une donnée avion a montré que, pour une fois, le manque de définition au sol du LANDSAT permettait de faire une meilleure synthèse.

RANGO (1974) a étudié, dans le même esprit, mais uniquement sur des données photographiques, les crues de l'été 1973 sur le Mississippi dans la région de Saint-Louis et l'Appomattox en 1972 (Virginie). Selon lui, les planimétrages des aires inondées sont obtenus sur le document au 1/250.000e, à 2 % près. Il utilise les canaux 6 et 7 (infrarouge) du LANDSAT en remarquant que les zones très humides et quasiment inondées ont une radiométrie plus basse que lorsqu'elles sont sèches. En effet, l'eau présente dans les terrains non submergés absorbe une bonne partie du rayonnement infrarouge et la radiométrie est beaucoup plus faible.

La vision satellite apporte donc des éléments supplémentaires dans l'étude des limites des zones inondables. Ces limites sont très utiles pour définir les règles de sécurité et surtout de dédommagement des populations.

Actuellement, seul le LANDSAT peut assurer ce travail, à la lourde condition de disposer d'au moins un passage, par beau temps, au-dessus d'une zone inondée par une crue au moins décennale. Dans le "Water Resources/Hydrology Research Program" (1978), programme des années 1980 à 1990, il est prévu d'exploiter les données multispectrales des satellites sur une période journalière, pendant les phénomènes exceptionnels. Plusieurs programmes de recherche sont prévus, en particulier avec la coopération de l'administration N.O.A.A.* et les satellites tels que LANDSAT et TIROS N.

* N.O.A.A. : National Oceanic and Atmospheric Administration.

3 - Physiographie des bassins versants

La connaissance des paramètres physiographiques des bassins versants, leur mise à jour, sont des données indispensables à l'Hydrologie de Surface. RANGO (1975) étudie trois bassins de 2500 km² et compare les données cartographiques aux résultats d'interprétation de clichés LANDSAT au 1/100.000e. Il détermine, avec une meilleure finesse que sur les cartes, le réseau de drainage, sa densité et l'indice de forme de ces bassins. Selon lui, l'estimation de l'écoulement annuel peut être étudié dans ces zones à relief peu élevé. En effet, en zone montagneuse, les ombres portées rendent difficile l'interprétation et la recherche des thalwegs. L'avantage des données satellites réside dans la possibilité d'étudier toutes les modifications du réseau hydrographique, dues aux activités humaines et à l'érosion. A l'aide de moyens classiques (curvimètre, planimètre), l'auteur mesure la longueur des cours d'eau, leur sinuosité, les surfaces en eau libre, les zones de marais et tous les paramètres d'occupation du sol déterminables par photo-interprétation classique. La superposition aux cartes topographiques est assurée par une série de corrections optiques, à l'aide de lentilles et de miroirs (cf. chapitre II). Le coût d'une telle opération de mise à jour est, bien entendu, plus faible qu'une opération aéroportée et on doit s'attendre, dans les prochaines années, au développement de telles méthodes de travail, rendues possibles dans nos régions grâce à une meilleure résolution au sol (LANDSAT D : 40 m, SPOT : 20 et 10 m). De plus, on a pu constater (LOINTIER-PIEYNS 1979) que la qualité cartographique des données LANDSAT était déjà très bonne, du fait de la stabilité remarquable de la plateforme et, pour une telle utilisation, les corrections géométriques ne sont pas indispensables.

4 - Irrigation

La détermination des pourcentages de zones irriguées est le problème permanent des responsables de la gestion de l'eau, d'autant plus que la surface irriguée est très variable dans le temps et dépend principalement des conditions météorologiques.

A la suite de la sécheresse de l'été 1976, le C.N.E.S., l'Agence de Bassin SEINE-NORMANDIE et l'Université de PARIS I (SAINT G., 1977) ont mis en place une étude ayant pour objectif l'estimation des surfaces irriguées en 1976, en Beauce, dans le but de définir une politique de gestion de l'eau, à toute époque de l'année. L'erreur tolérée sur l'estimation des surfaces était de 20 %. Quatre zones ont été étudiées, à l'aide des données LANDSAT, du 30 juillet et du 16 août 1976. Pour la première zone, analysée par photo-interprétation, la reconnaissance des parcelles irriguées s'effectue à 90 %. Pour les trois autres zones, on constate des confusions importantes, surtout avec la forêt. Les résultats semblent être tributaires d'une meilleure connaissance des sols et du climat et il apparaît difficile, compte tenu de la nature des données satellites actuelles, de répondre à la question posée. Un résultat ponctuellement correct ne peut être encore extrapolé à la France entière.

Aux U.S.A., HELLER (1979) compare les images LANDSAT de 1972 et celles de 1975 pour étudier l'irrigation dans une région de 2700 km². Il utilise quatre photo-interprètes dont le taux de reconnaissance moyen est de 93 %. Le mesurage des surfaces s'effectue par superposition d'une grille de 3,2 km de côté.

La cartographie automatique par ordinateur, et donc, la mesure des surfaces, apparaît très difficile à partir des données LANDSAT (CLERGEOT 1980, communication orale). En effet, on caractérise très mal la culture irriguée à l'aide de la mesure radiométrique. De plus, le traitement de plusieurs dates d'enregistrement est encore une technique coûteuse et dont les algorithmes ne sont pas toujours réellement opérationnels. La caractérisation des zones irriguées sera certainement meilleure dans l'avenir, lorsque les traitements diachroniques seront au point et utiliseront conjointement les données du spectre visible (SPOT) de l'infrarouge thermique (LANDSAT D) et des micro-ondes.

5 - Neige et glaciers

L'étude des glaciers et surtout du manteau neigeux est réalisée depuis l'apparition des satellites d'observation de la Terre. Les résultats ont été très fructueux et l'on peut, d'ores et déjà, envisager une cartographie opérationnelle et journalière aux U.S.A. (Water Resources Hydrology Research Program for 1980-1990, 1978). Actuellement, autant que l'absence de nuages permette l'observation, une résolution de 100 m est suffisante pour l'observation dans le spectre visible, infrarouge et infrarouge thermique.

En France, SAINT G. a étudié l'enneigement dans les Pyrénées (communication orale, 1980), à l'aide du LANDSAT et du TIROS N. Les limites trouvées sont très bonnes dans le spectre visible, mais l'utilisation de l'ordinateur, pour la cartographie automatique, révèle une importante confusion avec les nuages dont la radiométrie est identique - dans le visible - à celle de la neige. L'étude du manteau neigeux, en infrarouge thermique avec TIROS N (6 km de résolution au sol), a montré une étendue toujours plus importante que celle obtenue dans le visible. Etant en période de fonte des neiges, l'auteur évoque un phénomène de rémanence thermique du sol, récemment découvert par la neige.

En Norvège, d'importantes quantités d'eau sont stockées par la neige en hiver et leur utilisation est capitale, puisque toute l'énergie électrique du pays est d'origine hydraulique. ODEGAARD H. (in GORDON F, 1979) membre du bureau norvégien des Ressources Hydrologiques a dressé, à partir des données LANDSAT, des cartes de couverture neigeuse pour la période 1972 - 1975. Il en tire une relation empirique entre la surface du manteau au printemps et le volume d'eau obtenu aux équipements hydro-électriques d'un bassin versant donné. Cette relation est désormais utilisée pour les prévisions.

MARBOUY D. et al. (1978) semblent moins optimistes quant aux possibilités actuelles des satellites. Bien que la résolution du LANDSAT soit suffisante pour étudier le phénomène sur de petits bassins (10 km²), il n'est pas utilisable en France comme outil de prévision. En effet, sa répétitivité théorique est de 18 jours, mais les conditions climatiques ne permettent d'obtenir des données interprétables que tous les 3 à 6 mois en moyenne. METEOSAT, quant à lui, a une résolution trop faible (5 km) et, seul le satellite météorologique N.O.A.A. (1 km de résolution) avec sa périodicité de 12 ou 24 heures, pourrait convenir à la prévision. L'auteur analyse ensuite deux articles de RANGO A. et SALOMONSON V. où la corrélation couverture neigeuse - apports postérieurs est satisfaisante. Néanmoins, les prévisions sont obtenues deux mois trop tard, ce qui prouve l'importance que l'on doit attacher aux périodes d'observation et aux délais, dans un système de surveillance opérationnel de la surface enneigée.

Dans ces conditions, on doit s'affranchir des perturbations provoquées par les systèmes nuageux et, c'est pourquoi, il est prévu d'acquérir ces informations par la radiométrie micro-onde (NIMBUS G.) dont, malheureusement, les capteurs actuels ont une résolution de 100 km.

Les programmes de recherche des années 1980 prévoient l'utilisation commune de capteurs micro-ondes et de radiomètres situés dans le visible et infrarouge thermique. La résolution de 10 à 30 m doit permettre la cartographie des différents types de neige et la constitution d'un atlas annuel des petits et moyens glaciers. Ces méthodes d'acquisition de données sont la pierre angulaire des systèmes de surveillance des années 90, dont nous avons une vision idéale figure 16.

6 - Eaux souterraines

Dans un souci de prospective, il nous paraît intéressant de citer les travaux d'AVIAS J.V. (1978) concernant l'étude, par l'infrarouge thermique, de l'"action thermique des eaux". Cette action thermique dépend de la masse d'eau, de sa vitesse de circulation, et donc de la porosité et de la perméabilité des roches. Débarrassée des phénomènes thermiques parasites - température de la surface du sol - et en tenant compte des précipitations, une mesure l'hiver ou la nuit, en infrarouge thermique, doit permettre d'étudier les "champs thermiques liés aux eaux souterraines" avec un minimum de vérité terrain. Les essais réalisés par capteurs aéroportés, dans le spectre des 8 à 14 μ m, ouvrent la voie des études par satellite dont la plupart comportent un capteur infrarouge thermique (LANDSAT 3, LANDSAT D, NIMBUS G., H.C.M.M, N.O.A.A., METEOSAT).

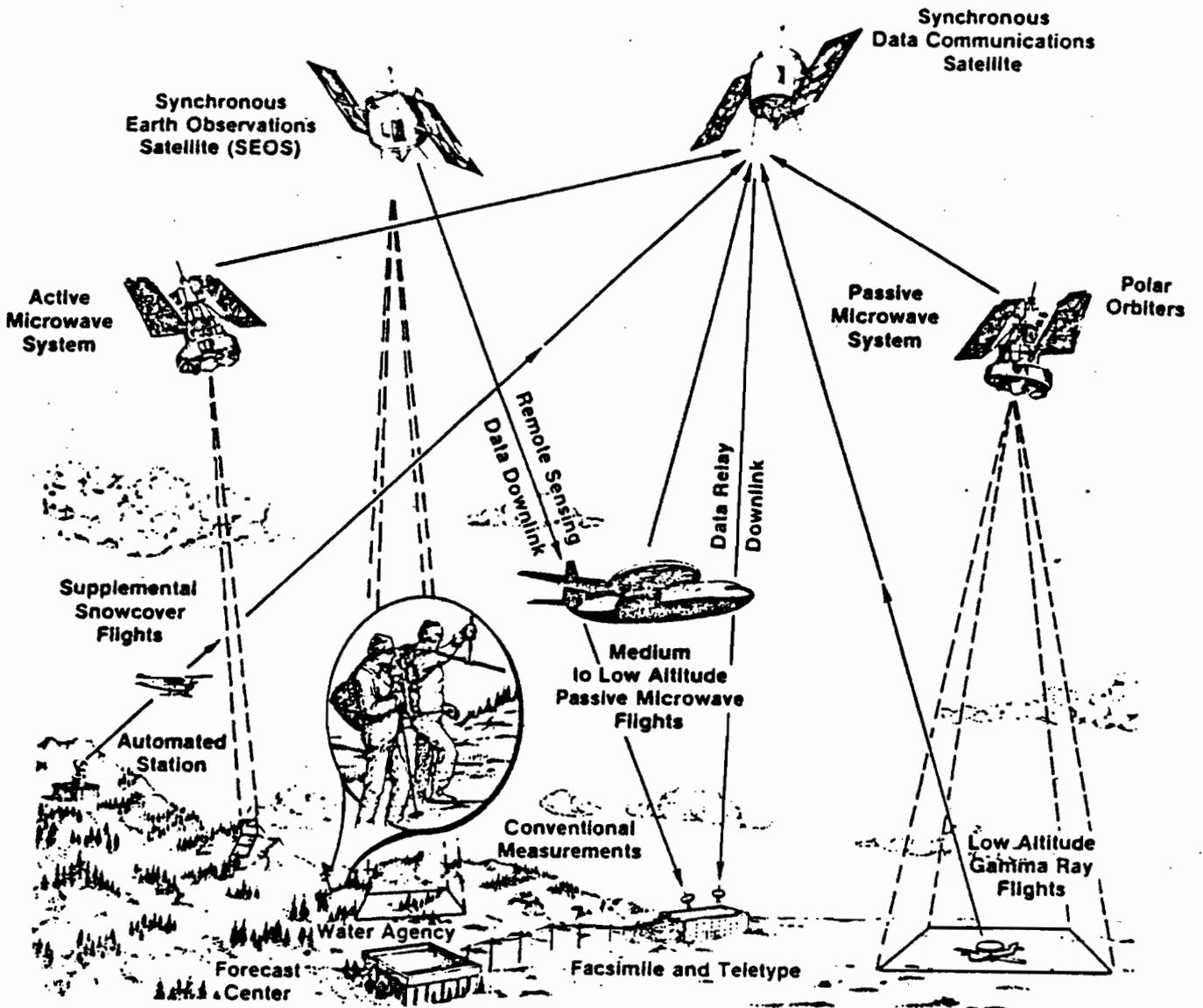


Figure 16. A Snow Surveying System for the 1990s

(D'après A Water Resources/Hydrology Research Program for 80-90)

B - QUALITE DES EAUX

La pénétration dans l'eau des radiations de longueur d'onde, comprise entre 0,4 et 0,7 μm , apporte des renseignements sur la qualité des eaux. Pour interpréter correctement les données sur le plan qualitatif, il faut utiliser un modèle de réflectance des eaux et un modèle de correction atmosphérique.

Les données des satellites LANDSAT ont déjà prouvé que l'observation de différents types d'eau était possible depuis l'espace, dans les canaux 4 et 5 correspondant aux longueurs d'onde de 0,5 à 0,7 μm . La figure 15 est un traitement effectué sur les étangs de la zone de FENETRANGE. Les données ont été enregistrées le 13 août 1976 et un simple seuillage du canal 5 permet de séparer certaines zones homogènes (tramé clair), différentes des eaux en général présentes (tramé foncé) (LOINTIER-PIEYNS, 1979). Le manque d'observation de terrain, en 1976, ne permet pas d'avancer une interprétation, mais seulement une hypothèse concernant une différence de trophisme des eaux.

Afin de construire les modèles de réflectance et de mieux comprendre le mécanisme complexe de l'interaction entre le rayonnement électromagnétique et l'eau, de nombreuses études "in situ" ont été faites. WAITLOCK et al. (1978) étudient la relation entre la profondeur de pénétration des radiations dans l'eau et sa charge en matière en suspension, pour une longueur d'onde de 0,52 μm . Plusieurs eaux naturelles sont analysées pendant, qu'en même temps, on effectue une mesure radiométrique avec un spectromètre monté sur un bateau. Les auteurs constatent que la pénétration en profondeur, mesurée à l'aide d'un disque, est en relation quasi-linéaire avec la quantité de matières en suspension, mais certaines eaux de même concentration présentent des variations de profondeur de pénétration de 25 %.

BARTOLUCCI et al. (1977) réalisent une étude semblable mais en faisant varier, au cours de la mesure, la longueur d'onde enregistrée. Ils étudient le comportement d'eaux turbides (100 mgr/l de matière solide en suspension) et d'eaux claires (10 mgr/l de m.e.s.). Ils déterminent ainsi que l'influence du fond n'apparaît qu'aux profondeurs inférieures à 0,3 m et que les eaux turbides ont une réponse radiométrique plus forte, surtout dans les longueurs d'onde de 0,6 - 0,7 μm (correspondant au canal 5 du LANDSAT).

Une étude de la réflectance des eaux turbides a été faite par RITCHIE et al. (1976). La figure 17 montre la relation existant entre la radiation solaire réfléchie et la longueur d'onde, pour différentes concentrations de sédiments en suspension. On remarque que les variations les plus importantes sont dans les longueurs d'onde comprises entre 0,5 et 0,7 μm (soit les canaux 4 et 5 du LANDSAT). Une relation linéaire assez "lâche" peut être trouvée entre la concentration et la radiation solaire réfléchie dans une longueur d'onde (fig. 18).

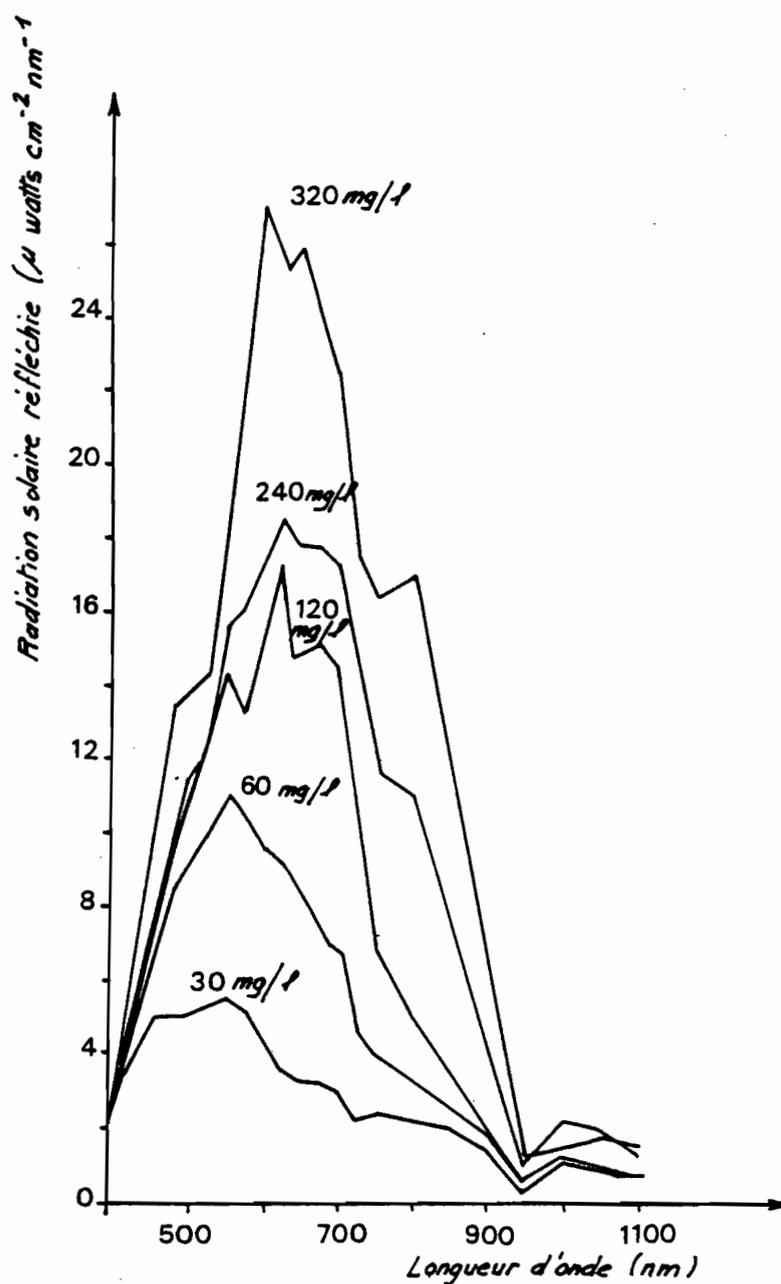
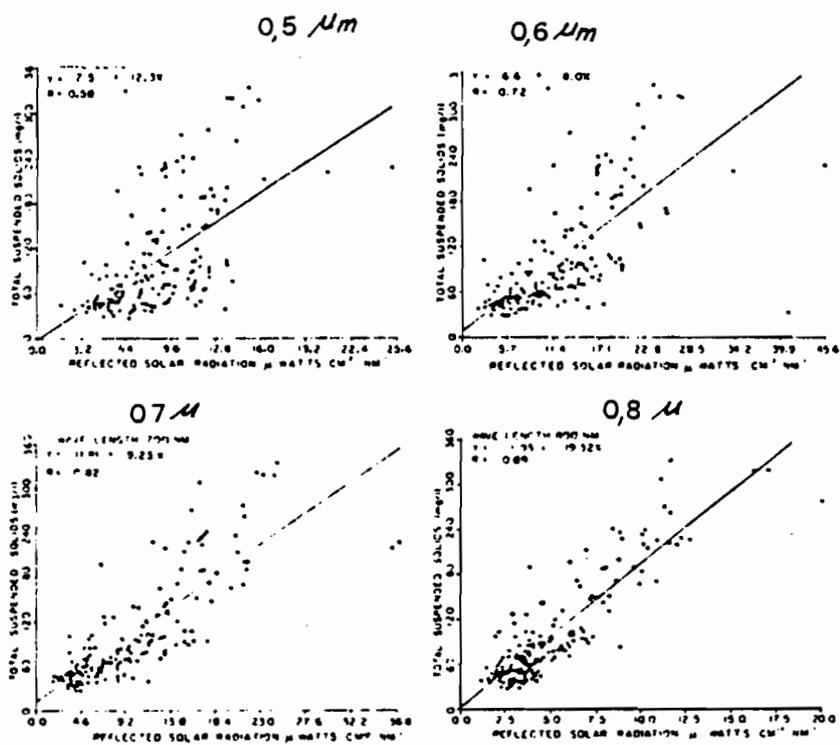


FIG. 17

Relation entre la radiation solaire réfléchie et la longueur d'onde, pour différentes concentrations de sédiments en suspension, d'après RITCHIE J.C. et al. (1976)



Relationship between reflected solar radiation and concentration of suspended sediment in the surface water at 500, 600, 700, and 800 nm.

(D'après RITCHIE J.C., 1976)

FIG.18

Ces relations obtenues par les mesures "in situ" n'apportent qu'une vision incomplète du problème : la radiation solaire réfléchiée par l'eau retransverse l'atmosphère avant d'être enregistrée par le capteur du satellite. BROOKS O.J. (1975) compare des données LANDSAT de plusieurs lacs et la "transmission" de leurs eaux, prélevées deux heures avant l'enregistrement. Les mesures purement qualitatives montrent une relation inverse entre la réflectance et la "transmission" de l'eau : pour une eau claire la transmission est forte et la réflectance est faible et vice versa.

SCARPACE F.L. (1979) fait l'étude des qualités physico-chimiques de 3000 lacs du WISCONSIN, à l'aide des données LANDSAT. Selon lui, l'utilisation des données multi-temporelles est indispensable et il analyse six dates d'enregistrement. La variation de radiométrie pour chacun des lacs étant importante dans le temps, il est amené à faire une correction atmosphérique originale : il considère que le signal S, reçu par le capteur, est lié au signal G, envoyé par le lac, par la relation : $S = \alpha G + \beta$, où α est un coefficient d'absorption atmosphérique et β un coefficient de dispersion. Etant donné que ces coefficients ne peuvent être déterminés directement, il se construit un étalon avec un lac "clair" pour déterminer β , et un élément de référence radiométrique constant dans le temps (supposé) à l'aide d'un aéroport, pour déterminer α . Il en tire un coefficient de normalisation A_j , pour le jour j et corrige la réflectance mesurée, par la relation :

$$G_j = A_j \left[\text{lac}_1^j - \text{lac clair}^j \right]$$

Ceci permet d'obtenir une cartographie de l'eutrophisation des lacs, divisée en 7 niveaux, de l'oligotrophe à l'eutrophe. Plusieurs limnologues étudient une trentaine de lacs selon les critères classiques (nitrates, disque de Secchi, algues, turbidité ...) et obtiennent la même classification à de rares exceptions près.

L'avenir de la télédétection semble être très prometteur, surtout avec l'augmentation de la résolution au sol et d'une meilleure sélectivité dans le domaine du visible et du proche-infrarouge ("Thematic-mapper" de LANDSAT D). D'ores et déjà s'engage une fructueuse concurrence entre méthodes indirectes que nous venons de décrire et une modélisation complète du phénomène de réflectance. Dans ce domaine, il est important de ne pas attendre que tous les problèmes soient résolus, pour acquérir une pratique en télédétection

Aspect thermique des études

L'étude par télédétection de l'émissivité des eaux est un domaine privilégié. De multiples recherches sont réalisées par capteurs aéroportés et les résultats positifs sont nombreux. Malheureusement, les données satellite en infrarouge thermique ne sont disponibles que depuis très peu de temps (1 à 2 ans), pour diverses raisons techniques. On obtient deux voies d'études par cette méthode :

- étude thermique avec tracé d'isothermes de surface (corrections atmosphériques à pratiquer),

- études de dynamique fluviale, en considérant la température comme un traceur des courants.

Les capteurs actuels devraient permettre d'obtenir une mesure, en température absolue, à 2°K près pour la plupart des plateformes prévues et à 0,4°K près pour le satellite expérimental H.C.M.M. En fait, on utilise des mesures relatives, à cause de la dérive du capteur (CASSANET, 1980) dans la mesure des températures.

La résolution au sol des données en infrarouge thermique est moins bonne que dans le visible : 120 m pour le LANDSAT D (contre 20 m dans le visible), 500 m pour H.C.M.M. et de 1 à 5 km pour les satellites tels que NIMBUS G, TIROS N et METEOSAT. Néanmoins, ces mesures complèteront les observations faites dans le visible pour l'étude de certaines zones urbanisées et des pollutions thermiques liées à l'industrialisation (in Water Ressources / Hydrology Research Program for 1980 - 1990).

C - ETUDE DES COMPOSANTES DU BILAN HYDRIQUE DES SOLS

La planification, l'exploitation et la gestion de l'eau, pour les besoins agricoles, demandent une connaissance du bilan hydrique du sol. L'établissement de ce bilan est un problème épineux, car la variation spatiale des paramètres dépend des relations existant entre le sol, l'atmosphère et la végétation. De plus, la représentativité d'une mesure localisée, dans l'étude d'une région, n'est pas définie. L'acquisition de données par la télédétection peut résoudre ce point, à condition de disposer de modèles ou de relations empiriques pour utiliser l'information radiométrique. La luminance émise par un objet dépend indirectement de la température et de l'humidité. Si l'on désire connaître ces deux paramètres, il convient de faire des mesures simultanément dans les spectres :

- visible, qui donne une idée du flux radiatif entrant,
- infrarouge thermique, qui donne une indication sur l'émissivité et le profil thermique,
- micro-ondes donnant un flux émis ou réfléchi, dépendant des constantes diélectriques du sol, étroitement liées à l'humidité du sol (BECKER F., 1978).

L'étude du bilan hydrique repose sur trois domaines dont l'évaluation quantitative pourrait être faite par télédétection : précipitations, humidité et évapotranspiration réelle.

1 - Les précipitations

L'analyse des données de télédétection ne permet pas encore d'estimer la quantité d'eau qui va précipiter. La mesure conventionnelle demeure précise et suffisante pour l'évaluation du bilan hydrique (MUSY A. et al., 1978). Néanmoins, les années 1980 verront se développer des

techniques d'investigation basées sur l'utilisation des radiations visible et proche-infrarouge, pour le suivi des systèmes nuageux et l'établissement de relations avec les précipitations observées. Un effort particulier sera accompli dans le domaine des micro-ondes pour mesurer la quantité d'eau venant de tomber sur un sol, rejoignant ainsi les efforts menés dans la mesure de l'humidité des sols (in Water Ressources/Hydrology Research Program for 1980 - 1990).

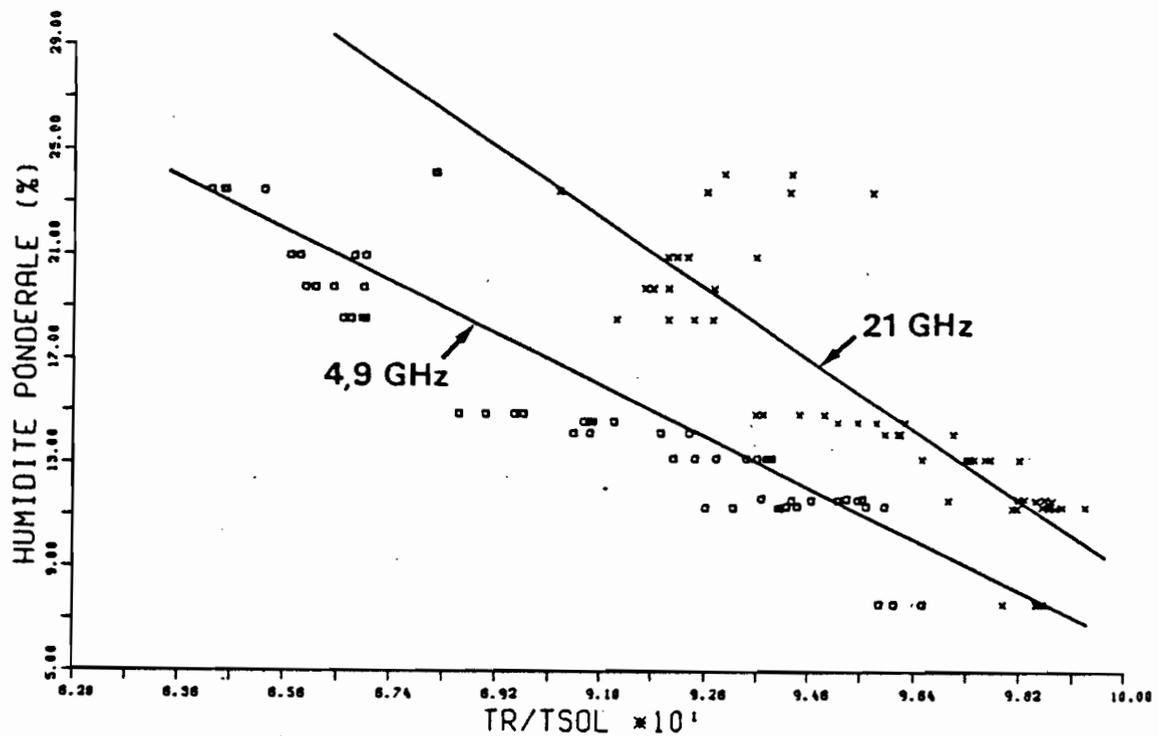
2 - Humidité du sol

Depuis quelques années, les études menées à partir de documents LANDSAT ont montré une possibilité d'analyse qualitative, dans le domaine de l'humidité du sol. Dans une expérience menée par l'O.P.I.T.* , LENCO M. (1978) exploite une scène LANDSAT sur le Languedoc et réalise la cartographie des zones humides par photo-interprétation de données multi-temporelles. La méthode de photo-interprétation est plus riche et exhaustive que le classement supervisé par ordinateur. La vérité terrain est malheureusement souvent difficile à acquérir et nécessite une enquête de terrain en simultanéité avec un passage de satellite. Il est intéressant de remarquer que la photo-interprétation est meilleure que l'ordinateur dans la recherche des zones humides. On peut l'expliquer par le fait que l'information radiométrique n'est pas assez riche (visible et proche-infrarouge du LANDSAT) et que "l'oeil" réalise le traitement spatial et temporel, si coûteux à informatiser. Les possibilités actuelles sont donc encore assez limitées, mais les recherches faites sur les micro-ondes devraient beaucoup apporter ces prochaines années.

La mesure du taux d'humidité dans le sol n'est possible qu'à partir de l'enregistrement de l'émission globale, issue des premiers horizons du sol, dans le domaine hyperfréquence. En effet, les réflectances observées dans le spectre visible et proche-infrarouge ne renseignent que sur les phénomènes de surface (pénétration de l'ordre du μ m ou du mm). En micro-ondes, à une fréquence de 10 GHz, on obtient une profondeur de pénétration de 10 cm et, à 2 GHz, 20 cm (MUSY A. et al., 1978).

Les recherches actuelles s'orientent vers la mise en évidence d'une relation émissivité du sol-humidité, comme le montre la figure 19. De plus, l'élaboration de modèles (GIRARD M.C., 1978), (MUSY A. et al., 1978) doit permettre une approche quantitative de la mesure de l'humidité du sol par télédétection. Par ailleurs, il semble que l'appréciation du taux d'humidité ne sera pas obtenue pour des profondeurs supérieures à 50 cm et que l'on ne pourra pas s'affranchir de mesures "in situ" et de simulations.

* O.P.I.T. : Opération Pilote Interministérielle de Télédétection.



- Variation de l'humidité d'un sol en fonction de l'émissivité. Changins 22.8.77/2.9.77. (Limon argilieux avec sable, traité par griffage).

(D'après MUSY A. et al., 1978).

FIG.I9

Les perspectives du National Aeronautics and Space Administration sont identiques, avec des moyens certainement plus importants qu'en Europe. L'objectif des années 1990 est la cartographie opérationnelle de l'humidité des sols de bassins versants supérieurs à 1000 km². L'emploi des micro-ondes, en système passif (mesure de l'émissivité) ou en système actif (radar, mesure de la réflectance) S.A.R., doit assurer une investigation des zones non forestières et la mise au point des modèles sur les bassins versants expérimentaux (fig. 20) - (A Water Ressources/ Hydrology Research Program for 1980 - 1990).

3 - Evapotranspiration

Le calcul de l'évapotranspiration réelle s'effectue, en général, à l'aide de modèles décrivant la transformation d'une certaine quantité d'eau en vapeur, par évaporation et par transpiration des végétaux. Certaines formules tentent d'exprimer l'évapotranspiration d'un bassin en termes énergétiques (MUSY A. et al., 1978) :

$$E T R = R_n + R_c + R_i$$

avec : R_n = rayonnement net à la surface.

R_c = énergie convective (non radiative).

R_i = énergie emmagasinée par le sol (inertie thermique).

Le rayonnement net peut être mesuré par télédétection, grâce au domaine visible et proche-infrarouge. Dans certaines approches et à condition que le bassin hydrologique ait un climat homogène et une couverture uniforme, on assimile le rayonnement net R_n à l'évapotranspiration réelle. Les résultats actuels montrent que l'on peut obtenir des valeurs, par télédétection, sous-estimées de 30 à 50 % (HLAVEK R. et al., 1974), (BOSSARD R. et al., 1975), ce qui est normal puisque l'on néglige l'influence du vent (terme convectif).

D'autres modèles plus complets (SOER G-J.R., 1980), (MUSY A. et al., 1978) utilisent les mesures en infrarouge thermique pour déterminer la température de surface du sol et les hyperfréquences pour estimer le taux d'humidité du sol. Nous sommes actuellement, dans ces domaines, en phase de recherche pure, comme pour la mesure du taux d'humidité du sol. Les auteurs tentent de calibrer leurs modèles grâce à de nombreuses mesures de terrain mais, à ce jour, il est encore illusoire de déterminer l'E T R par télédétection. Les années 80 verront une intensification des recherches dans le domaine de la calibration des modèles, à l'aide des données de NIMBUS G, de TIROS N et, éventuellement, de SEASAT (si un 2ème satellite de cette série est lancé), étant donné que ces trois satellites sont les seuls à posséder des capteurs dans le domaine visible, infrarouge thermique et hyperfréquence fonctionnant simultanément.

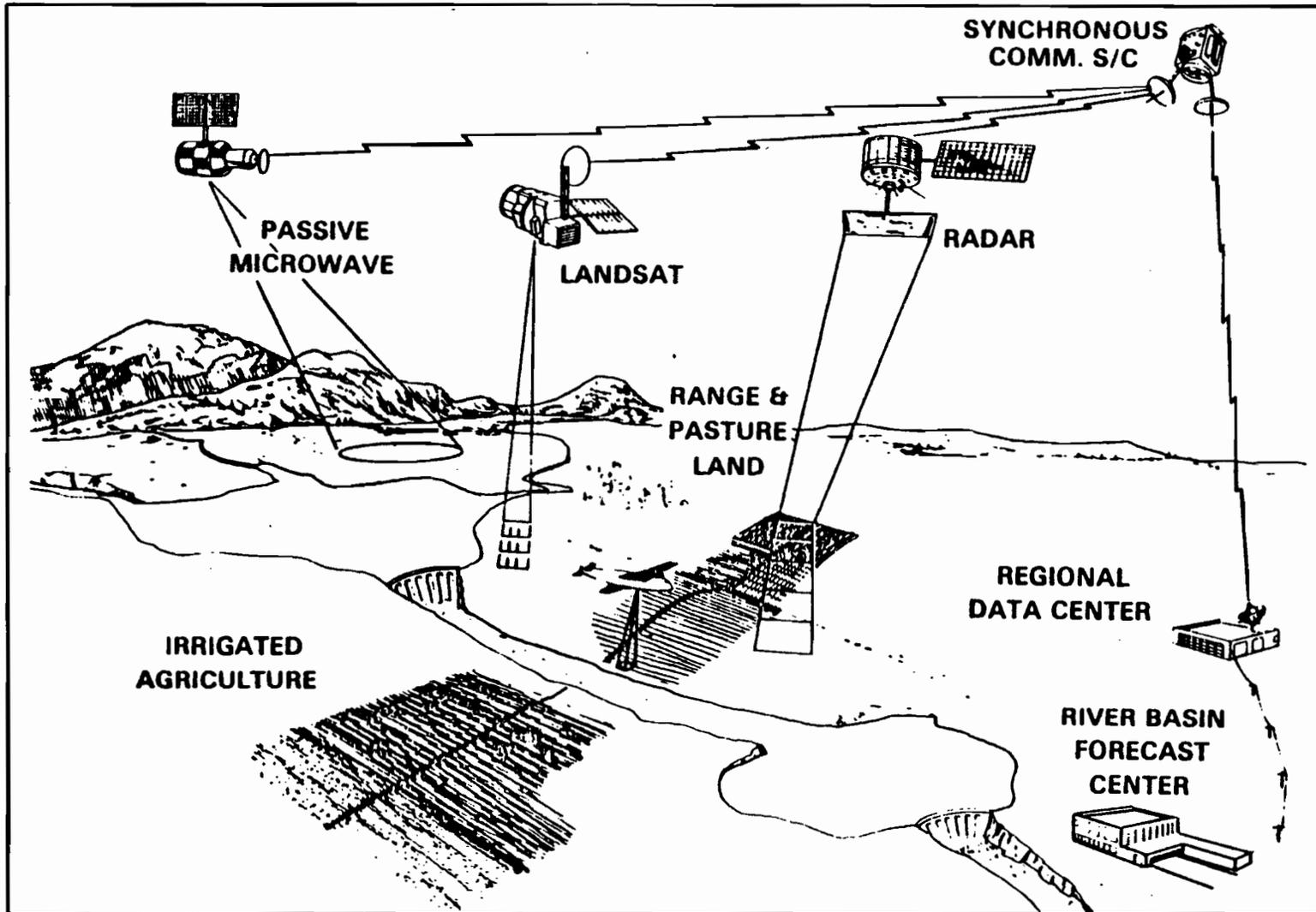


FIG.20. A Soil Moisture Monitoring System for 1990

Extrait de "A water resources/hydrology research program for 1980-1990. NASA.

D - CONTRIBUTION AUX MODELES HYDROLOGIQUES

Le fonctionnement d'un modèle hydrologique, sur un bassin versant, utilise de nombreuses données dont l'occupation du sol qui permet d'évaluer l'interception, la rétention de surface et l'infiltration qui sont trois des principaux paramètres décrivant le bilan hydrologique d'un bassin. Dans les modèles à discrétisation spatiale, il est en général constitué un fichier d'occupation du sol sur la base d'un carroyage appuyé sur une projection topographique usuelle. Pour chaque unité géographique élémentaire (par carreau) on recherche, en général par planimétrie de cartes, les pourcentages de surfaces occupées par les plans d'eau, les feuillus, les résineux, les prairies, les cultures et les zones urbanisées par exemple.

La constitution de tels fichiers, par télédétection, remplace avantageusement un travail coûteux et fastidieux de mesures de surface par les moyens classiques. D'autre part, la mise à jour d'un fichier couvrant de grands bassins versants peut être assurée une fois par an, à l'aide de données satellite. Néanmoins, l'utilisation du satellite crée des problèmes d'adaptation entre la donnée "brute"-saisie par le capteur - et l'élaboration d'un fichier utilisable dans un modèle. On rencontrera successivement :

- des problèmes de calage géographique des données satellite sur la projection retenue pour le modèle.
- des problèmes de traitement avec une évaluation de l'incertitude pesant sur le classement des thèmes d'occupation du sol.
- des problèmes d'incompatibilité entre la recherche d'un thème et les données satellite.
- des problèmes informatiques de compatibilité entre le résultat du traitement obtenu en général sur un ordinateur différent de celui qui permet de faire fonctionner le modèle.

WEBB R.P. (1979) utilise, dans un modèle hydrologique, les données LANDSAT de cinq bassins versants de 150 km² environ. Les erreurs de classement des données ne dépassent pas 8 % pour l'ensemble des postes d'occupation du sol (eau, feuillus, zones arides, carrières, zones industrielles, zones résidentielles, routes ...). L'auteur remarque que les thèmes pouvant être cartographiés par LANDSAT suffisaient amplement aux besoins du modèle et que les coûts de l'opération sont assez bas pour la rendre opérationnelle.

Une étude semblable a été menée sur le bassin versant de la Moselle française, en collaboration avec l'Agence Financière de Bassin RHIN-MEUSE, l'ORSTOM et l'O.P.I.T. Nous avons pu établir, par télédétection (LOINTIER M. et PIEYNS S., 1979), un fichier d'occupation du sol appuyé sur le carroyage LAMBERT. Le calage géographique et l'erreur thématique sur les principaux postes (eau, feuillus, résineux, prairies, cultures, zones urbanisées) sont suffisamment satisfaisants (de 2 à 10 %) pour envisager la constitution d'autres fichiers et leur mise à jour.

C O N C L U S I O N S

La saisie de l'information hydrologique, dispersée dans l'espace, à des dates différentes, permet de réduire considérablement le temps et le coût de collecte par rapport aux moyens conventionnels.

La N.A.S.A. a effectué une évaluation globale du rapport bénéfice-coût des opérations LANDSAT : ce rapport est compris entre 4 et 9, pour les domaines où les dépenses et les bénéfices sont calculables.

Contrairement à certaines opinions, le développement de ces systèmes de saisie ne supprimera pas le travail de terrain et les mesures au sol, d'abord parce que certaines données ne seront pas accessibles depuis l'espace (débits, nature chimique des sols ...), ensuite parce que notre méconnaissance des phénomènes électromagnétiques demandera de multiples mesures de "vérité-terrain".

Les applications hydrologiques les plus évidentes concernent les possibilités cartographiques instantanées, des surfaces en eau, des phénomènes exceptionnels (crues, inondations) et l'étude physiographique des bassins versants. Avec une bonne répétitivité, la cartographie des zones irriguées et des surfaces enneigées doit permettre d'apporter des éléments indispensables aux responsables de la gestion des ressources en eau. Plus indirectement, les études en cours devraient permettre, dans certains cas, d'apprécier la "qualité" des surfaces en eau en jugeant du niveau trophique de celles-ci. Les programmes de recherche fondamentale concernant l'interaction des ondes hyperfréquence avec le sol permettront, sans doute, d'appréhender les phénomènes d'évapotranspiration et d'humidité des sols. En liaison avec ceux-ci et par cartographie rapide de l'occupation du sol, la télédétection spatiale devrait contribuer à affiner les modèles hydrologiques sur des bassins de plus en plus étendus.

Paradoxalement, les progrès qui devront être faits ces prochaines années concernent moins l'évolution technique des capteurs que la mise en place et le développement d'organismes capables de gérer et de distribuer, dans les plus brefs délais, l'importante masse de données fournies par les multiples plateformes. Les programmes de télédétection américains prévoient, pour les années 80, une augmentation de la répétitivité concomitante à la diminution des délais d'obtention, d'autant plus que certaines de ces données pourront être obtenues, quelque soit la météorologie sur la région étudiée (hyperfréquence). Du fait que les informations hydrologiques sont "dynamiques" et "périssables", les délais d'obtention des données sont particulièrement critiques (fig. 21). Toutefois, on peut raisonnablement penser que la plupart des domaines abordés utiliseront la télédétection spatiale à l'aide de méthodes opérationnelles, une fois ces problèmes de délais résolus.

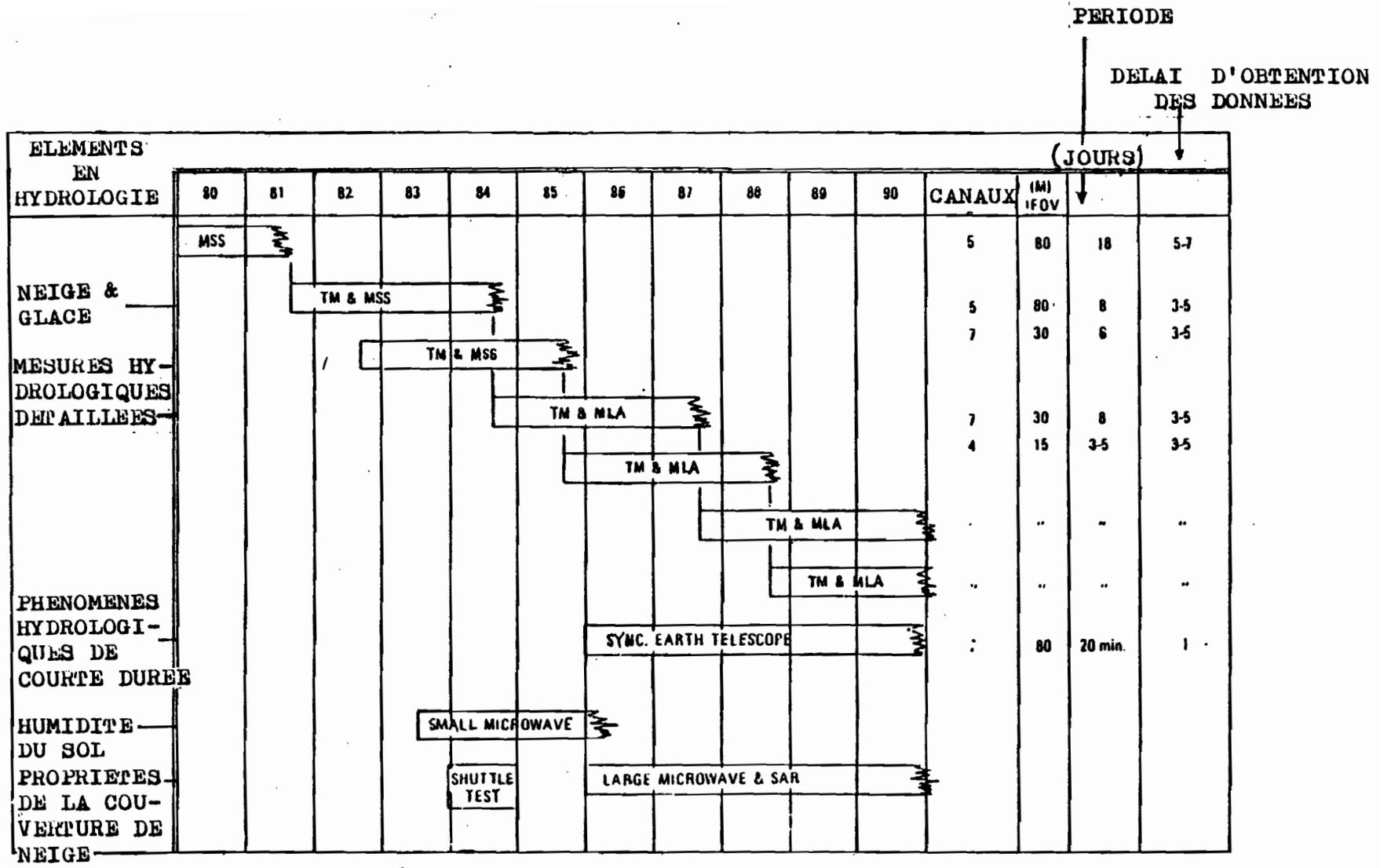


FIG.21 LES RESSOURCES EN EAU / CAPACITES D'OBTENTION DE DONNEES SATELLITE ET LEUR INVENTAIRE , traduit d'après "A water resources/hydrology research program for 1980-1990."

MSS : Multispectral scanner
SAR : Synthetic Aperture Radar

TM : capteurs à haute résolution dans le visible
MLA : capteurs à haute résolution dans le visible

B I B L I O G R A P H I E

- AVIAS J.V. (1978) - Applications possibles de la télédétection à l'inventaire et à la caractérisation des ressources en eaux souterraines.
La Houille Blanche, numéro spécial 7-8/1978, p. 587 - 592.
- BARTOLUCCI L.A., ROBINSON B.F., SILVA L.F. (1977) - Field Measurements of the Spectral Response of Natural Waters.
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 43, n° 5,
p. 595 - 598.
- BECKER F. (1978) - Bases physiques de la télédétection et sa problématique.
La Houille Blanche, numéro spécial 7-8/1978, p. 491 - 499.
- BEST R.G., SMITH J.R. (1978) - Photographic Contrast Enhancement of LANDSAT Imagery.
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 44, n° 8,
p. 1023 - 1026.
- BOSSARD R., VUILLAUME Y. (1975) - Evaluation régionale de l'évapotranspiration et de l'humidité du sol. Possibilité d'emploi des radiomètres à infrarouge et à hyperfréquences du satellite., NIMBUS 5.
Rapport B.R.G.M., Déc. 1975.
- BROOKS D.J. (1975) - LANDSAT Measures of Water Clarity.
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 41, n° 10,
p. 1269 - 1272.
- CASSANET J. (1980) - La télédétection H C M M et son Application au Littoral.
Mémoires du Laboratoire de Géomorphologie de l'école pratique des Hautes Etudes EPHE, n° 34.
- GIRARD M-C. (1978) - Emploi de la télédétection pour l'étude de l'humidité des sols.
La Houille Blanche, numéro spécial 7-8/1978, p. 533 - 539.
- GORDON F., PRICE R.D. (1979) - La télédétection : une vision nouvelle de la terre.
La Recherche, n° 96, vol. 10, p. 40 - 49.

- HELLER R.C., JOHNSON K.A. (1979) - Estimating irrigated land acreage from LANDSAT imagery.
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 45, n° 10, p. 1379 - 1386.
- HLAVEK R., OBERLIN G. et al. (1974) - Essai d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant. Considérations théoriques et applications pratiques.
C.T.G.R.E.F., rapport n° 1, avril 1974.
- LEMOALLE J. (1978) - Exemples d'application de la télédétection à l'étude d'un lac - Résumé.
Association française de limnologie pour la protection des eaux, colloque sur les lacs naturels, Chambéry, 18-21 sept. 1978, thème n° 21.
- LEMOALLE J. (1978) - Application des images LANDSAT à la courbe bathymétrique du Lac Tchad.
Cah. ORSTOM, ser. Hydrobiol., vol. XII, n° 1, p. 83 - 87.
- LENCO M., RIVARD L.A. (1978)
Opération OPIT-SFERES, rapport interne.
- LOINTIER M., PIEYNS S. (1979) - Méthodologie de constitution d'une base de données d'occupation du sol par télédétection.
Opération OPIT - ORSTOM, rapport final.
- MARBOUYT D., OBLED C., GUILLOT P. (1978) - Les images de satellite et les mesures de la couche de neige.
La Houille Blanche, numéro spécial 7-8/1978, p. 517 - 526.
- MUSY A., MEYLAN P., MORZIER C. (1977) - Détermination de l'humidité des sols par télédétection.
Communication au 1er colloque "Pédologie et Télédétection",
ROME, FAO, 29 août - 9 sept. 1977.
- MUSY A., MEYLAN P., MORZIER C. (1978) - Etude des composantes du bilan hydrique d'un sol par télédétection.
La Houille Blanche, numéro spécial 7-8/1978, p. 541 - 548.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, U.S. - A water resources/hydrology research program for 1980 - 1990.
- NOEL J. (1978) - Cartographie automatique des surfaces en eau libre.
La Houille Blanche, numéro spécial 7-8/1978, p. 527 - 532.

- RANGO A., SALOMONSON V.V. (1974) - Regional Flood Mapping from Space.
Water Resources Research, vol. 10, n° 3, p. 473 - 484.
- RANGO A., FOSTER J., SALOMONSON V.V. (1975) - Extraction and utilization of
space acquired physiographic data for water resources development.
Water Resources Research, vol. II, n° 6, p. 1245 - 1255.
- RANGO A., Mc GINNIS D.F., SALOMONSON V.V., WIESNET D.R. (1974) - New dimensions
in satellite hydrology.
U.S. National Committee for the International Hydrological Decade
(National Academy of Sciences).
U.S. I.H.D. Bulletin, n° 30, p. 703 - 711.
- RITCHIE J.C., SCHIEBE F.R., Mc HENRY J.R. (1976) - Remote Sensing of Suspended
Sediments in Surface Water.
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 42, n° 12,
p. 1539 - 1545.
- RIVEREAU, DUPUY - Opération G.D.T.A. - I.F.P. 1978 -
Rapport interne.
- SAINT G., BEDIOT G., CLERGEOT P. (1977) - Opération O.P.I.T. - G.D.T.A. -
Rapport interne.
- SARRAT D. (1978) - Inventaire Forestier des Vosges et du Vivarais par télédé-
tection spatiale.
Rapport d'étude du Centre de Télédétection et d'Analyse des Milieux
Naturels, CTAMN, 78, p. 24.
- SCARPACE F.L., HOLMQUIST K.W., FISHER L.T. (1979) - LANDSAT Analysis of Lake
Quality.
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 45, n° 5,
p. 623 - 633.
- SOER G.J.R. (1980) - Estimation of Regional Evapotranspiration and Soil
Moisture Conditions Using Remote Sensed Crop Surface Temperatures.
Remote Sensing of Environment, 9, p. 27 - 45.
- SOLLERS S.C., RANGO A., HENNINGER L. (1978) - Selecting Reconnaissance Strate-
gies for Floodplain Surveys.
Water Resources Bulletin, vol. 14, n° 2, p. 359 - 373.
- WEBB R.P. (1979) - Determination of land use from LANDSAT Imagery : Applica-
tions to hydrologic modeling.
The Hydrologic Engineering Center, U.S. Army, Corps of Engineers,
Research note n° 7.

WHITE M.E. (1978) - Reservoir Surface Area from LANDSAT Imagery.
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 44, n° II,
p. 1421 - 1426.

WHITLOCK C.H., WIDIE W.G., USRY J.W., GURGANUS E.A. (1978) - Penetration
Depth at Green Wavelengths in Turbid Water.
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 44, n° II,
p. 1405 - 1410.

OUVRAGES GENERAUX

Cahier ORSTOM, Télédétection I, "Les Satellites d'Observation de la Terre".
Initiations - Documentations Techniques - n° 34 - 1977.

Cahier ORSTOM, Télédétection 2, "Analyse Multivariable, procédure LOTERIE -
Application à l'analyse multispectrale en Télédétection".
Initiations - Documentations Techniques - n° 39 - 1978.

Cahier ORSTOM, Télédétection 3, "Le satellite METEOSAT et l'Océanographie -
Etude des températures de la mer au voisinage des côtes de
Mauritanie et du Sénégal".
Initiations - Documentations Techniques, n° 42. - 1979

Manual of Remote Sensing, tomes 1 et 2.
Robert G. Reeves Editor - American Society of Photogrammetry.
Falls Church Virginia, 1975.

La télédétection des ressources terrestres.
Ecole d'été, CNES (Tarbes 1973).

Projet de système d'observation de la terre.
S.P.O.T. (1977).

Remote Sensing of Environment.
J. LINTZ jr. et D.S. SIMONETT. Adison Wesley, advanced book
program (1976).

BECKER F., BERROIR A., DESCHAMPS P.Y. et al. (1977) - La saisie des données,
les principes physiques et la problématique de leur interprétation -
(Etat de l'art en télédétection, 1ère partie, chapitre I).
Rapport préliminaire, O.P.I.T., n° 77413.

MONTRICHER G., DUVERNOY J., GAIGNEROT B. (1977) - Les traitements en téléde-
tection (Etat de l'art en télédétection, 1ère partie, chapitre 2).
Rapport préliminaire, O.P.I.T., n° 77413.

O.P.I.T. (1980) - Expression des besoins des administrations responsables des
ressources naturelles et de la gestion du territoire - Ressources
en eau.
Compte rendu de la réunion de SOPHIA ANTIPOLIS, février 1980.