

LES SATELLITES DE L'ENVIRONNEMENT

Description sommaire de la série TIROS - N/NOAA-A.1

B. GUILLOT

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ET TECHNIQUE OUTRE-MER



INITIATIONS - DOCUMENTATIONS TECHNIQUES

N° 50

TELEDÉTECTION 5

O.R.S.T.O.M.

PARIS

1981

« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, « que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées « à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but « d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le « consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayant cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

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

LES SATELLITES DE L'ENVIRONNEMENT

Description sommaire de la série TIROS - N/NOAA-A.1

Informations rassemblées et rédigées par

B. GUILLOT



Sommaire

1 - DESCRIPTION DU PROGRAMME

1.1. GENERALITES

1.2. ORGANISATION DU PROGRAMME TIROS/NOAA

1.3. DEROULEMENT DU PROGRAMME

2 - DESCRIPTION DES SATELLITES

2.1. GENERALITES : SYSTEME COUPLE DE SATELLITES, ET PROGRAMME DE LANCEMENT

2.2. CARACTERISTIQUES DES SATELLITES : LE VAISSEAU SPATIAL ET LES ORBITES

2.3. CONTROLE DES SATELLITES, ET CHAMP DES STATIONS DE RECEPTION

3 - LES FONCTIONS DES SATELLITES

3.1. LES INSTRUMENTS D'ACQUISITION DE DONNEES

3.1.1. La sonde verticale (TOVS) - Description

3.1.1.1. La sonde infrarouge à haute résolution (HIRS)

3.1.1.2. Le dispositif de sondage stratosphérique (SSU)

3.1.1.3. Le dispositif de sondage micro-ondes (MSU)

3.1.2. Le radiomètre à très haute résolution (AVHRR)

3.1.3. Le "système de collecte des données" (DCS)

3.1.4. L'enregistreur de l'environnement spatial (SEM)

3.1.5. Autres instruments prévus

3.2. LA TRANSMISSION DES DONNEES

3.2.1. Caractéristiques techniques des données transmises par les satellites

3.2.2. Les sorties du processeur TIP

3.2.3. Les sorties du processeur MIRP

3.2.4. Les transmissions APT

3.2.5. Les transmissions HRPT

3.2.6. Les mémoires digitales

4 - COMPOSITION ET FORMES DES IMAGES AVHRR

4.1. COMPOSITION DES IMAGES

4.1.1. *Le module AVHRR et ses instruments*4.1.2. *Fonctionnement*

4.2. FORME ET DIMENSIONS DES IMAGES AVHRR

5 - EXEMPLES D'UTILISATION DES IMAGES AVHRR

5.1. SUIVI DE PHENOMENES AU SOL : UN EXEMPLE SIMPLE, A PROPOS DE LA COUVERTURE DE NEIGE, EN NORVEGE

5.1.1. *Introduction*5.1.2. *Distribution de la neige*5.1.3. *Utilisation des données NOAA et TIROS-N*5.1.4. *Traitement des données*5.1.5. *Critiques*

5.2. IMBAULT, D. - DETERMINATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE DE L'OCEAN PAR RADIOMETRIE DIFFERENTIELLE

5.3. PHULPIN Th. - UTILISATION DE LA RADIOMETRIE INFRAROUGE MULTISPECTRALE POUR LA DETERMINATION DE LA TEMPERATURE DE SURFACE

5.4. PHILIPPE M. - RECHERCHE DE FRONTS THERMIQUES EN MEDITERRANEE. L'EXPLOITATION DES THERMOGRAPHES SATELLITAIRES AU CENTRE DE METEOROLOGIE SPATIALE EERM

5.4.1. *Historique*5.4.2. *Traitement des données*5.4.3. *Applications*5.4.4. *Développements*5.4.5. *Bibliographie*

6 - ANNEXES

6.1. SATELLITES METEOROLOGIQUES DE LA SERIE TIROS/NOAA

6.1.1. *Satellites de la série TIROS*6.1.2. *Satellites ITOS*6.1.3. *Série expérimentale NIMBUS. Satellites héliosynchrones*6.1.4. *Série ITOS-NOAA*6.1.5. *Série TIROS-N/NOAA A-G. Réalisation et projets*6.1.6. *Satellite HCMM, satellite expérimental*

6.2. DONNEES BRUTES TIROS-N/NOAA-6 DISPONIBLES AU CMS DE LANNION

6.3. RECONSTITUTION DES ORBITES DES SATELLITES, EMPLOI DU TRAJECTOGRAPHE

6.3.1. *Le trajectographe*6.3.2. *Détermination pratique des images, et secteurs d'images utiles pour l'étude d'une zone donnée*

1 - DESCRIPTION DU PROGRAMME

1.1 - GÉNÉRALITÉS

Le Service National Américain de Satellites de l'Environnement (National Environmental Satellite Service = NESS), dépendant de l'Administration Nationale pour les Océans et l'Atmosphère (National Oceanic and Atmospheric Administration)¹, a mis sur pied, avec l'aide de la NASA, un réseau de satellites polaires (à défilement) et de satellites géostationnaires², dont les mesures servent à la prédiction météo, aux services hydrologiques et océanographiques, et à l'aménagement de l'espace. Ces satellites sont complémentaires ; le suivi continu des latitudes tempérées et tropicales est, par exemple, en priorité, une mission des satellites géostationnaires ; les satellites à défilement sont par contre les seuls à pouvoir fournir des observations des hautes latitudes.

1.2 - ORGANISATION DU PROGRAMME TIROS/NOAA

Au sein de ce programme, la série de satellites TIROS/NOAA est originale, car elle résulte d'une coopération internationale entre les USA (NOAA et NASA), le Royaume Uni, et la France, qui se sont répartis les fonctions comme suit :

- 1) Les satellites sont lancés par la NASA, avec le concours de la NOAA.
- 2) Les stations de commande et d'acquisition de données, et le centre de contrôle des satellites, sont pris en charge par la NOAA.

¹ La NOAA dépend elle-même du Département du Commerce des USA. Le sigle TIROS signifie *Television and Infra Red Observation System*.

² Les satellites géostationnaires sont décrits dans une note précédente consacrée au satellite METEOSAT.

- 3) Les services météorologiques du Royaume-Uni (Meteorological Office) ont fourni l'unité de sondage stratosphérique (Stratospheric Sounding Unit, SSU).
- 4) Le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) a mis en place un système de collecte de données (système ARGOS), appelé Data Collection System (DCS).
- 5) Le Centre de Météorologie Spatiale (CMS, station de Lannion) se charge des moyens de réception des données des sondes, pendant les périodes où les satellites échappent au contrôle des stations de la NOAA. Cette distribution internationale des tâches ne doit cependant pas masquer le fait que la partie de loin la plus importante du programme est l'oeuvre de la NOAA.

1.3 - DÉROULEMENT DU PROGRAMME

La série des satellites météorologiques a été inaugurée par le lancement de versions expérimentales de la NOAA, et par le lancement de TIROS-1, le 1er avril 1960.

La transmission automatique d'image (APT = Automatic Picture Transmission) a été testée sur TIROS-VIII en 1963, et sur NIMBUS-A en 1964 ; elle a été utilisée par la série ITOS-NOAA, commencée en 1966, qui utilisait des caméras vidicon pour la saisie des données, à bord de satellites placés à 1475 kilomètres d'altitude. Une étape importante correspond aux premières transmissions par le mode APT des données du radiomètre infrarouge sur NIMBUS-2 (15 mai 1966).

En 1972, le satellite NOAA-2 inaugure la transmission d'images à haute résolution (HRPT = High Resolution Picture Transmission), et le radiomètre à très haute résolution (VHRR = Very High Resolution Radiometer).

En 1978, la série TIROS-NOAA utilise un radiomètre plus perfectionné (AVHRR = Advanced Very High Resolution Radiometer) ; l'altitude des satellites a été réduite à 833 ± 90 km, pour des motifs essentiellement financiers, conduisant à l'emploi de matériels militaires disponibles.

L'avenir de ces satellites est assuré jusqu'en 1987, date de lancement du dernier satellite de la série actuelle ; celle-ci sera probablement prolongée quelque temps encore jusqu'à ce que d'autres vaisseaux spatiaux, plus élaborés, prennent le relais. Ce programme est "opérationnel", dans la mesure où la continuité des observations est assurée sur une longue période, contrairement à ce qui se passe pour les programmes expérimentaux de la série NIMBUS.

2 - DESCRIPTION DES SATELLITES

2.1 - GÉNÉRALITÉS : SYSTEME COUPLÉ DE SATELLITES ET PROGRAMME DE LANCEMENT

Une autre originalité du programme TIROS-NOAA tient au fait qu'il s'agit d'un système de deux satellites couplés, programmés pour une durée de vie de deux ans et dont le remplacement est assuré à dates régulières.

Tableau 1 : PROGRAMME DE LANCEMENT DES SATELLITES DE LA SERIE
TIROS-NOAA

Nom du satellite	Date de lancement	Nombre de canaux AVHRR
TIROS	13-10-1978	4
NOAA A VI ¹	27-06-1979 au 31-08-1981	4
" B	29-05-1980 (échec)	
" C VII	22-06-1981	5
" D	avril 1982	5
" E	avril 1983	5
" F	avril 1984	5
" G	avril 1985	5
" H	avril 1986	5
" I	avril 1987	5

et probablement J,K

¹ Les satellites sont désignés par une lettre avant leur lancement, et par un chiffre après. Le chiffre VI de NOAA-A tient compte des numéros de la série précédente (de NOAA-1 à NOAA-5 : voir annexe, en fin de volume).

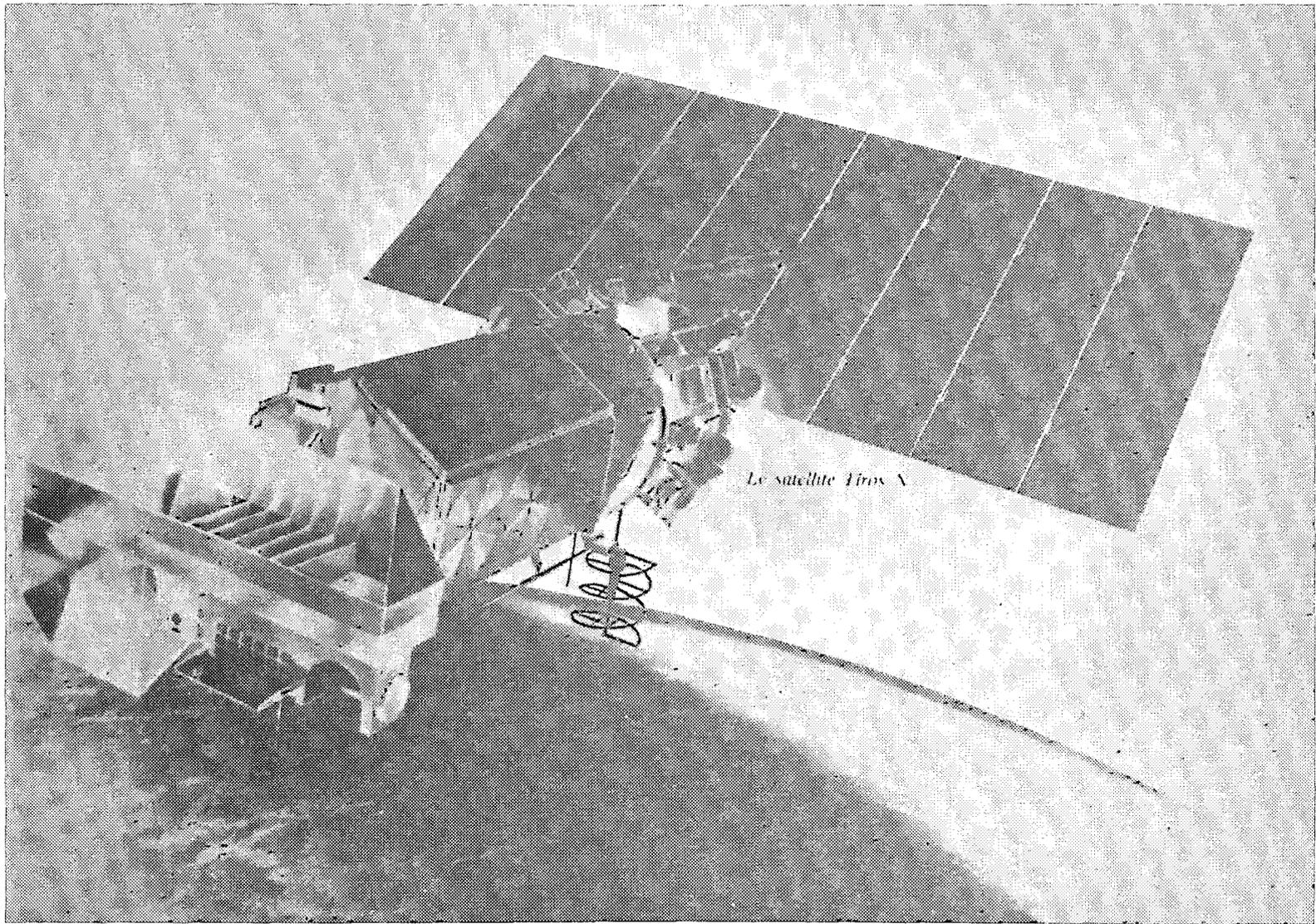


Fig. 1 - LE SATELLITE TIROS N

2.2 – CARACTÉRISTIQUES DES SATELLITES : LE VAISSEAU SPATIAL ET LES ORBITES

Le *vaisseau spatial* (fig. 1) mesure 3,71 m de long et 1,88 m de diamètre, pour un poids de 737 kg.

Ce sont des satellites à défilement, placés sur des *orbites quasi polaires héliosynchrones*¹, à 833 ± 90 km ; deux altitudes nominales avaient été choisies : 833 km (NOAA-VI) et 870 km (TIROS-N)².

Tableau 2 : PARAMETRES DES ORBITES DES SATELLITES ACTUELS (JANVIER 81)

	NOAA-VI	TIROS-N
Altitude moyenne	820 km	860 km
Inclinaison	98,69°	99,03°
Période nodale	101,24 mn	102,01 mn
Régression nodale	25,31°/orbite/ouest	25,50°/orbite/ouest
Précession des noeuds	0,986° Est	0,986° Est
Orbites par jour	14,22	14,12

Au moment du lancement, les paramètres ont été établis de telle sorte que le satellite NOAA-VI franchisse l'équateur à 7h30 solaire, en orbite descendante, et TIROS-N à 15h solaire, en orbite ascendante (avec une dérive de 10 minutes supplémentaires par an) (fig. 2 et 3).

¹ Le champ de gravitation terrestre est quasi symétrique autour de la ligne des pôles et par rapport au plan de l'équateur. Tout satellite traversant obliquement ce plan subit un mouvement de précession de l'orbite, et à un niveau d'altitude donné la *vitesse angulaire* de cette précession croît avec l'inclinaison de l'orbite sur la ligne des pôles ; l'astuce consiste à la rendre égale à un tour de la terre par an, de sorte que l'orbite tourne autour de la ligne des pôles avec le "soleil moyen" des astronomes, qui définit le temps local. On a alors un satellite héliosynchrone, possédant "cette intéressante propriété de toujours traverser, à la même heure locale, le plan d'un parallèle géographique", autrement dit de toujours survoler à la même heure le même point de la surface terrestre (d'après P. QUENEY, 1974, pp. 64-67).

² SCHWALB (A.) et al., p. 20.

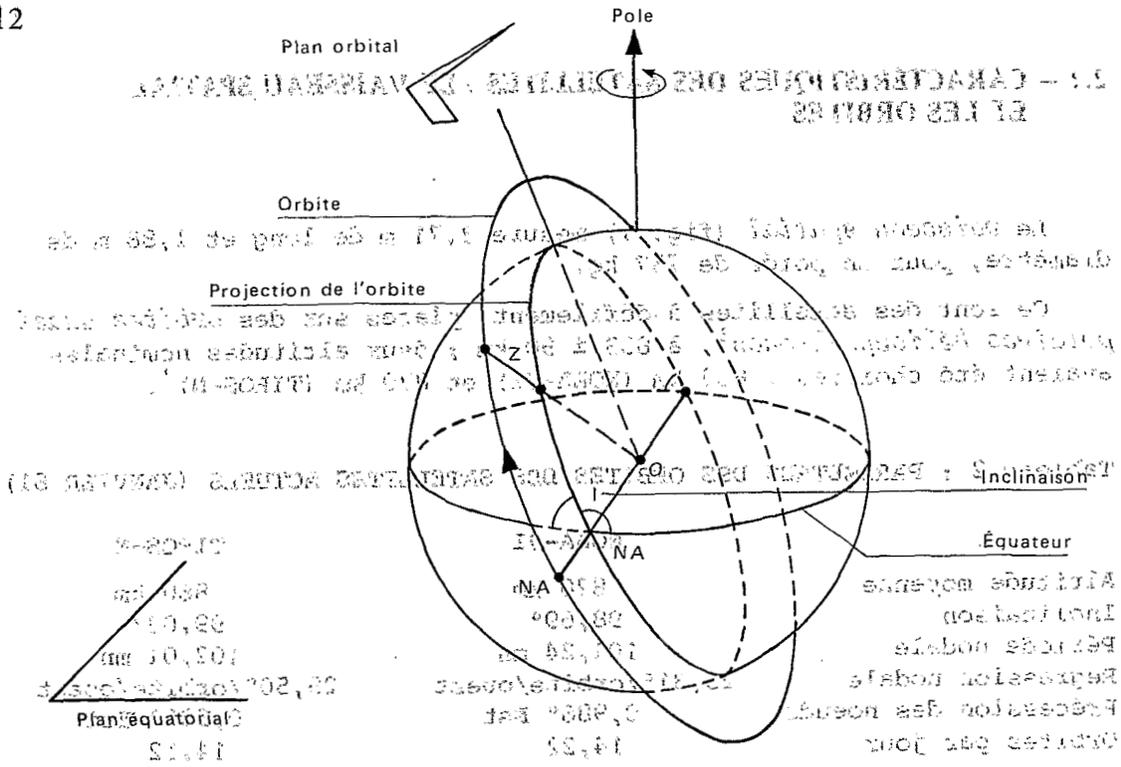


Fig. 2 - SYSTEME ORBITAL DES SATELLITES TIROS-NOAA
BRANCHE ASCENDANTE, NŒUD ASCENDANT

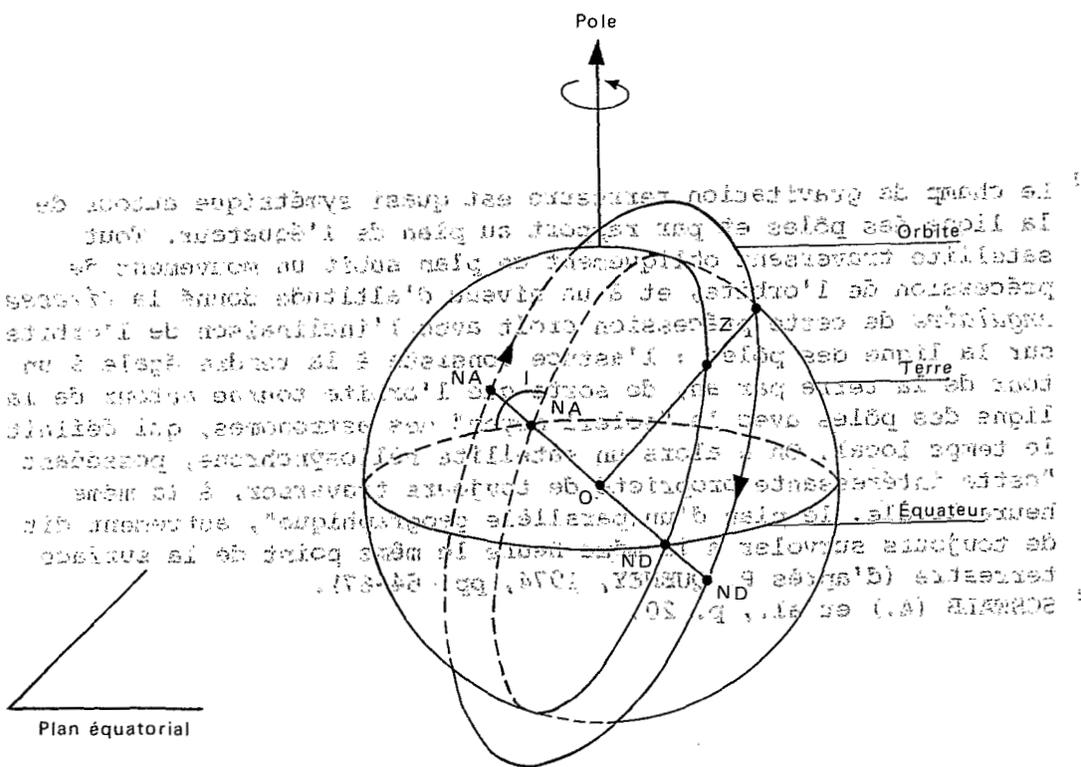


Fig. 3 - BRANCHE D'ORbite DESCENDANTE, NŒUD DESCENDANT (d'après J. Hamon)

Les paramètres des orbites sont les suivants :

- une branche d'orbite est dite ascendante lorsque les satellites se dirigent de l'hémisphère Sud vers l'hémisphère Nord, et descendante lorsqu'ils se dirigent de l'hémisphère Nord vers l'hémisphère Sud ;
- le noeud ascendant est le point où le satellite traverse le plan équatorial, du Sud vers le Nord. Il est repéré par :
 - . l'heure du Noeud Ascendant (HNA), en heure TU,
 - . la longitude du Noeud Ascendant (LNA), (référence Greenwich) ;
- le noeud descendant est le point où le satellite traverse le plan équatorial, du Nord vers le Sud. Il est repéré de la même manière, par l'heure du Noeud Descendant (HND), et la longitude du Noeud Descendant (LND) ;
- l'inclinaison à l'équateur (tableau 2) ;
- l'incrément longitudinal, ou régression des noeuds, séparant deux orbites successives (tableau 2).

2.3 - CONTROLE DES SATELLITES, ET CHAMP DES STATIONS DE RÉCEPTION

La NOAA-NESS utilise deux stations de "commande et d'acquisition de données" (Command and Data Acquisition), l'une en Virginie (Wallops Island), l'autre en Alaska (Gilmore Greek). Le satellite échappe néanmoins à tout contrôle pendant 3 ou 4 orbites¹. C'est en partie pour pallier à ce défaut qu'a été établie la fonction relais de la station de Lannion ; depuis que celle-ci fonctionne, le satellite échappe au contact avec le sol au plus pendant la durée d'une orbite par jour.

Un satellite qui passe au-dessus d'une antenne (de l'horizon à l'horizon) reste dans le champ de vue pendant 16 minutes environ. La station de réception peut disposer des données dans une aire circulaire de 6200 km de diamètre (élévation 0°), ou de 5200 km (élévation 5°).

¹Ce sont les "blind orbit periods", ou "orbites aveugles" des auteurs des notices techniques de la NOAA. Lannion assurera également la fonction CDA (Commande et Acquisition des données) à partir de mai 1981, et participera aux opérations de lancement et de contrôle en vol des satellites (Black up Wallops).

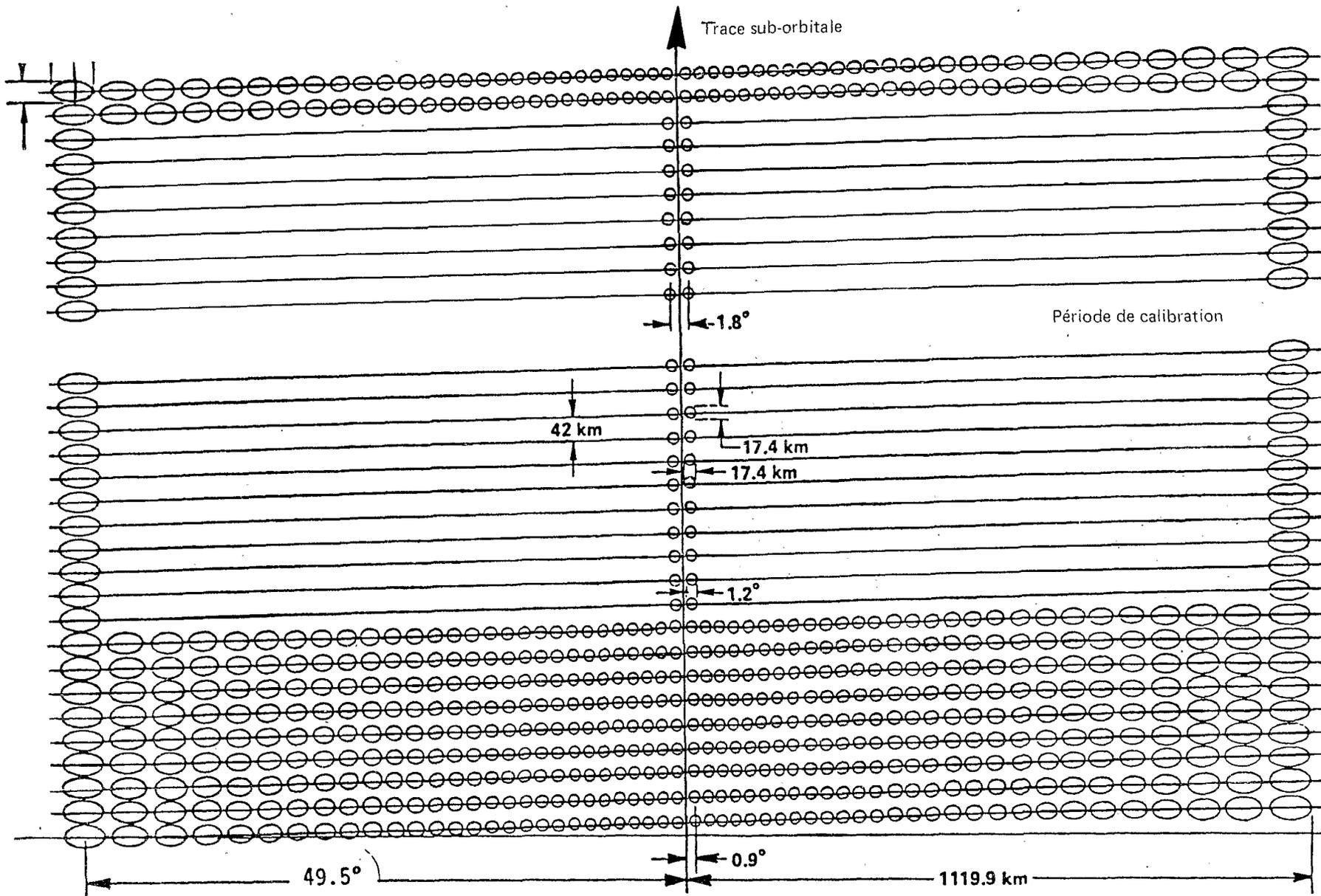


Fig 4 - PROJECTION AU SOL DES ZONES BALAYÉES PAR LA SONDE INFRA-ROUGE A HAUTE RÉOLUTION HIRS/2 (Schwalb, 1978, fig. 8)

3 - LES FONCTIONS DES SATELLITES

3.1 - LES INSTRUMENTS D'ACQUISITION DES DONNÉES

Les satellites effectuent un grand nombre de mesures simultanées, grâce aux instruments (ou groupes d'instruments) enregistreurs qu'ils contiennent.

3.1.1 - La sonde verticale TOVS (Tiros Operational Vertical Sounder)

Description.

Cette sonde constitue un système intégré, dont l'objectif est de fournir des profils de température atmosphérique, des mesures de la vapeur d'eau (à trois niveaux différents), et de l'ozone total contenu. Elle est composée de trois types d'instruments :

- la sonde infrarouge à haute résolution (High Resolution Infrared Radiation Sounder = HIRS),
- le dispositif de sondage stratosphérique (Stratospheric Sounding Unit = SSU),
- le dispositif de sondage micro-ondes (Microwave Sounding Unit = MSU).

3.1.1.1. La sonde infrarouge à haute résolution (HIRS)

Cet instrument, construit par la division aérospatiale d'ITT, mesure le rayonnement incident infrarouge (19 canaux), et visible (1 canal). Elle utilise pour cela un système optique de 15 cm de diamètre, le champ de vue étant balayé à l'aide d'un miroir rotatif dont le mouvement, combiné avec celui du satellite, couvre la plus grande partie de la surface terrestre.

Les 20 canaux se composent de pixels identiques, séparés, dans les lignes, et entre les lignes, par des intervalles fixes ; chacun d'eux forme, au point sub-satellite, un cercle de 17,4 km de diamètre, compris dans un espace de 58,5 km de long et de 29,9 km de large (fig. 4). Le détail des canaux est donné dans le tableau 3.

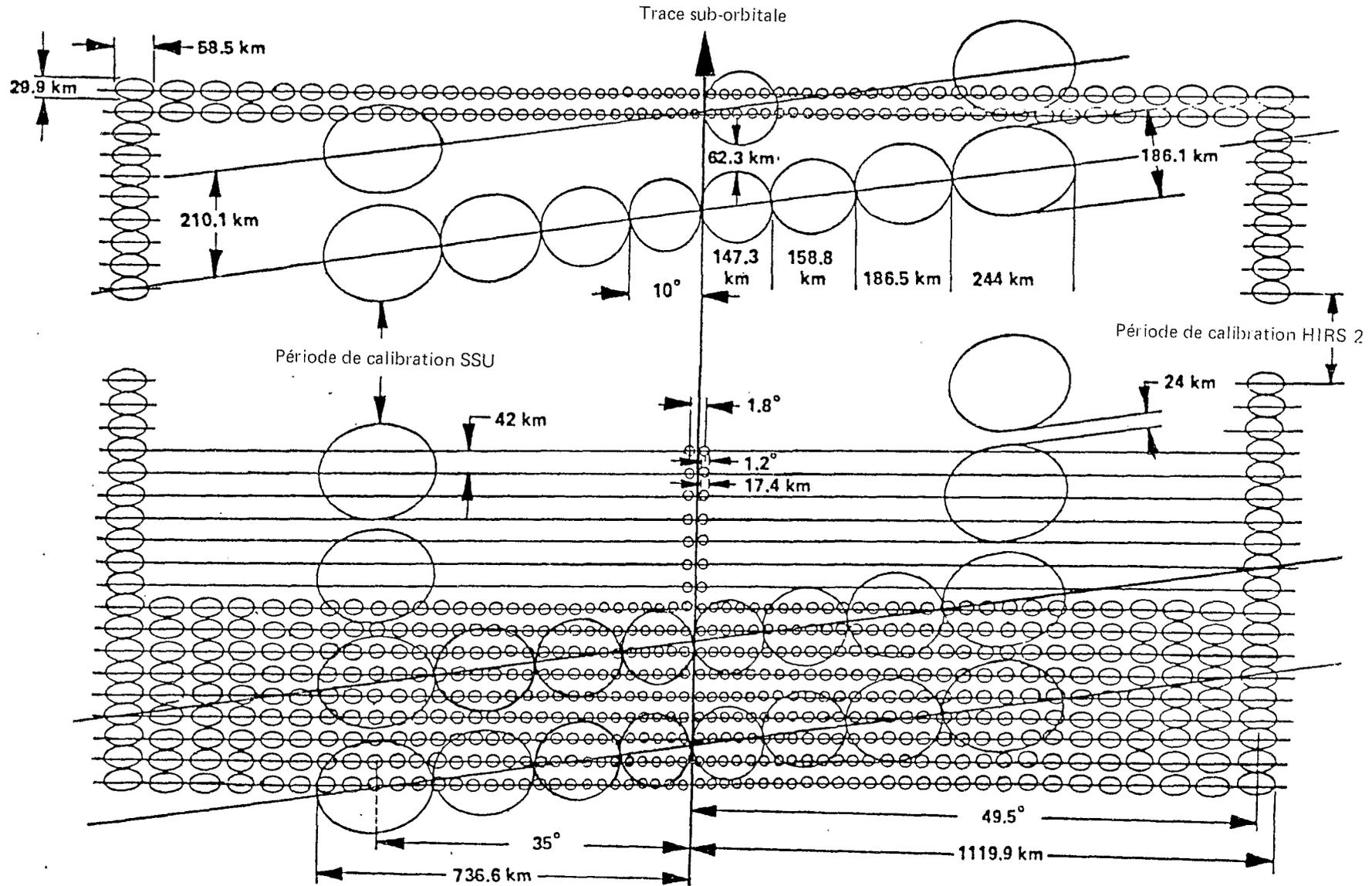


Fig. 5 - PROJECTION AU SOL DES ZONES BALAYÉES PAR LA SONDE INFRA-ROUGE A HAUTE RÉOLUTION HIRS/2 ET PAR LE DISPOSITIF DE SONDAGE STRATOSPHERIQUE (Schwalb, 1978, fig. 10).

Tableau 3 : CARACTERISTIQUES DE LA SONDE A HAUTE RESOLUTION "HIRS/2"

Canaux	Fréquences (cm^{-1})	Longueur d'onde (μm)	Température maximum de la scène
1	669	14,95	280
2	680	14,71	265
3	690	14,49	240
4	703	14,22	250
5	716	13,97	265
6	733	13,64	280
7	749	13,35	290
8	900	11,11	330
9	1030	9,71	270
10	1225	8,16	290
11	1365	7,33	275
12	1488	6,72	260
13	2190	4,57	300
14	2210	4,52	290
15	2240	4,46	280
16	2270	4,40	260
17	2360	4,24	280
18	2515	4,00	340
19	2660	3,76	340
20	14500	0,69	100% (albedo)

3.1.1.2. Le dispositif de sondage stratosphérique (SSU)

Cet appareil a été fourni par l'Office Météorologique du Royaume Uni. Il est sensible à l'énergie émise dans l'infrarouge par le gaz carbonique, et il fournit des données sur la température de la stratosphère, entre 25 et 50 kilomètres d'altitude. Les mesures sont faites dans 3 canaux, de même longueur d'onde, utilisant des cellules de pression différente, et sur des unités spatiales circulaires disposées de la même manière que celle de la sonde à haute résolution (HIRS). La résolution, sous les satellites, est de 147 kilomètres. La figure 5 indique comment les deux séries de mesures sont imbriquées dans l'espace.

3.1.1.3. Le dispositif de sondage micro-ondes (MSU)

Cette sonde résulte d'une adaptation du spectromètre à micro-ondes du satellite NIMBUS-6. Ce radiomètre effectue des mesures par quatre canaux, qui enregistrent le rayonnement dans quatre régions de la bande de l'oxygène (5,5 mm). Ces données permettent de calculer les températures même en présence de nuages car, dans cette région du spectre, les données ne sont généralement pas affectées par les

Tableau 4 : CANAUX DU RADIOMETRE AVHRR

Instruments	Canaux spectraux (μm)					Vaisseau Spatial
	1	2	3	4	5	
AVHRR 1 prototype	0,55-0,90	0,725-1,0	3,55-3,93	10,5-11,5	-	TIROS-N
AVHRR 1 série	0,58-0,68	0,725-1,0	3,55-3,93	10,5-11,5	-	NOAA A et C
AVHRR 2 prototype	0,58-0,68	0,725-1,0	3,55-3,93	10,3-11,3	11,5-12,5	NOAA D
AVHRR 2 série	0,58-0,68	0,725-1,0	3,55-3,93	10,3-11,3	11,5-12,5	NOAA E, et suivants

gouttelettes d'eau non précipitée. La résolution aux points sub-satellites est de 109 km, et les canaux sont centrés sur les bandes de fréquence 50,3 - 53,74 - 54,96 et 57,05 giga-hertz.

3.1.2 - Le radiomètre à très haute résolution (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)

Ce radiomètre a été conçu pour fournir des données utilisables en météorologie, en océanographie, et en hydrologie, pour une analyse multispectrale, dans cinq canaux différents, avec une résolution, aux points sub-satellites, de 1,1 km. Les canaux visible et visible-proche infrarouge, centrés sur les longueurs d'onde 0,6 et 0,9 μm , ont été installés à l'origine pour mettre en évidence les nuages, les côtes, l'extension des neiges et des glaces¹. Les données des canaux de la fenêtre infrarouge sont destinées à permettre une évaluation aussi exacte que possible de la température de la surface radiative (qu'il s'agisse de la surface de la mer, des nuages, ou du sol). L'utilisation combinée des mesures dans trois longueurs d'onde lève l'ambiguïté que pourraient introduire des nuages masquant une partie du champ de vue ; elle peut aussi, par l'utilisation de méthodes appropriées, aider à distinguer, dans le bilan radiatif global qui parvient au radiomètre, la part prise par l'absorption atmosphérique (vapeur d'eau et autres éléments comme le gaz carbonique) dans l'émissivité de la surface de la terre, cette dernière étant évidemment la seule à devoir être prise en compte pour une estimation correcte des températures.

Le miroir du module AVHRR tourne à 360 tours par minute, pour effectuer un balayage sur une ligne perpendiculaire à l'orbite, et le champ de vue instantané a été calculé de telle sorte que les lignes soient contiguës au point sub-satellite. Le système optique est composé d'un télescope de 20,32 cm d'ouverture, combiné à un prisme qui sépare le rayonnement reçu en bandes spectrales discrètes : deux (VHRR) pour les satellites de la 2ème génération (de NOAA-1 à NOAA-5), quatre pour les satellites actuels (système AVHRR) et cinq pour les satellites futurs à 5 canaux, appelés "advanced TIROS-N" (voir tableau 4 : Canaux du radiomètre AVHRR).

Les exemples d'utilisation de données présentés en annexe réfèrent pour l'essentiel aux différents canaux du radiomètre AVHRR, qui constitue la partie la plus employée du système TIROS-NOAA.

¹ Etant donné la résolution et le caractère répétitif des données, ces satellites offrent évidemment bien d'autres possibilités que celles que prévoyaient les initiateurs du programme.

Tableau 5 : CARACTERISTIQUES DES PLATES-FORMES ARGOS

Fréquence porteuse	401,650 MHz
Dérive admissible due au vieillissement	± 2 KHz
Stabilité à court terme (100 ms)	10 ⁻⁹ (pour les plates-formes à localiser) 10 ⁻⁸ (pour les plates-formes fixes)
Stabilité à moyen terme (20 mn)	0,2 Hz/mn (pour les plates-formes à localiser)
Stabilité à long terme (2 heures)	± 400 Hz
Puissance d'émission	34.8 dBm (3W) nominale
Variation de puissance en cours d'émission	0,5 dB
Antenne : polarisation linéaire verticale	
Durée du message : 360 à 920 ms	
Période de répétition des messages	pour la localisation de 40 à 60 s pour la collecte des données 60 à 200 s
Données des capteurs	4 à 32 capteurs codés sur 8 bits
Nombre total des plates-formes	4000 globales 459 en vue

3.1.3 - Le système de collecte des données (Data Collection System, DCS)

Cet instrument a été conçu par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) pour recevoir les données fournies par le système ARGOS. Celui-ci recueille des mesures de l'environnement (température, pression, etc.) fournies par des plates-formes fixes ou mobiles. Dans ce dernier cas, les satellites mesurent la fréquence et l'heure relative d'arrivée des différents signaux. Ces indications transmises au sol servent à calculer la position des plates-formes (ce calcul est basé sur l'effet doppler). Ils reçoivent en particulier les données des plates-formes situées dans les régions polaires, hors du champ de collecte des données (système DCS) des satellites géostationnaires.

L'instrument embarqué à bord des satellites comprend essentiellement :

- deux unités de réception et de vérification ("search") des données,
- quatre unités parallèles de recouvrement des données, car les satellites sont susceptibles de recevoir plusieurs transmissions simultanées. Chaque unité comporte une phase de lecture, un synchroniseur de bits, un calculateur doppler, et un système de mise au format des données,
- une unité de contrôle,
- une mémoire,
- une unité de commande et d'énergie pour son fonctionnement.

Le centre de traitement des données se trouve à Toulouse, au CNES (Tableau 5 : Caractéristiques des plates-formes ARGOS).

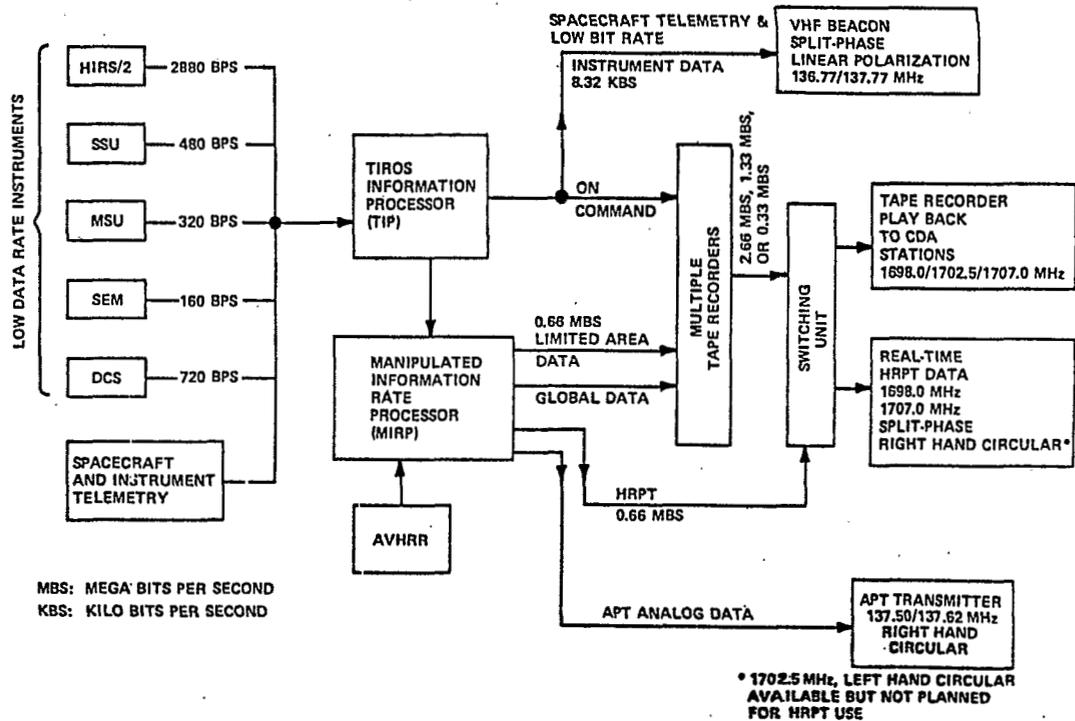
3.1.4 - L'enregistreur de l'environnement spatial (Space Environment Monitor, SEM)

C'est le quatrième instrument embarqué. Ses détecteurs, tournés vers l'espace, mesurent les protons d'origine solaire, les particules alpha, la densité des flux d'électrons, l'énergie du spectre, et l'énergie particulaire totale à l'altitude des satellites.

3.1.5 - Autres instruments prévus

Les satellites de la 3ème génération, inaugurés en 1978 avec le lancement de TIROS-N, ont été programmés pour accueillir d'autres instruments, auxquels une capacité supplémentaire d'acquisition de données, égale à 20% de la capacité actuelle totale, a été réservée. L'un d'entre eux devrait être un appareil servant à mesurer l'ozone, et un second fournirait des éléments pour un calcul du bilan radiatif terrestre.

Ces instruments ne seraient incorporés au dispositif qu'à partir du lancement de NOAA-F (prévu pour avril 1984).



TRADUCTION DES SIGLES

Tiros-N data flow diagram : diagramme du flot des données de TIROS-N

- HIRS : sonde infrarouge à haute résolution
- SSU : dispositif de sondage stratosphérique
- MSU : dispositif de sondage micro-ondes
- SEM : senseur de l'environnement spatial
- DCS : système de collecte de données
- Low data rate instruments : instruments à basse cadence numérique
- Spacecraft and instrument telemetry : télémétrie du satellite et ses instruments
- TIP : processeur d'informations TIROS
- VHF beacon : balise à très haute fréquence
- Split phase : biphasé
- Linear polarisation : polarisation linéaire
- Manipulated information rate processor : processeur de cadence de l'information
- AVHRR : radiomètre à très haute résolution améliorée
- Limited area data : données à haute résolution de zones d'étendue limitée (LAC)¹
- Global area : données à résolution géographique réduite couvrant tout le champ exploré (GAC)¹
- Multiple tape recorders : jeu d'enregistreurs à bandes magnétiques
- Switching unit : unité de commutation
- Tape recorder play back to CDA stations : relecture des enregistrements magnétiques vers les stations de commande et d'acquisition de données
- Real-time HRPT data : envoi en temps réel des données à haute résolution
- Split phase : biphasé
- Right and circular : polarisation circulaire droite
- APT analog data : données d'imagerie analogiques de résolution réduite
- Left and circular available but not planned for HRPT use : polarisation circulaire gauche disponible mais non prévue pour l'usage des données HRPT

¹ Sigles explicités dans le tableau 6.

Fig. 6 - DIAGRAMME DU FLOT DES DONNÉES DE TIROS-NOAA (d'après Schwalb)

3.2 - LA TRANSMISSION DES DONNÉES

Les satellites captent et émettent constamment des données, qui sont récupérables à tout moment, à chacun de leurs passages, dans des stations équipées dans ce but. Nous traiterons ici des caractéristiques techniques de ces données, et des images (APT et AVHRR) ainsi obtenues.

3.2.1 - Caractéristiques techniques des données transmises par les satellites

Le système de transmission des données comprend deux composants principaux :

- le Tiros Information Processor (TIP), à bas taux de données,
- le Manipulated Information Rate Processor (MIRP), à haute cadence.

Toutes les données expédiées au sol par les satellites passent par ces composants (fig. 6) : diagramme du flux de données de TIROS-N.

3.2.2 - Les sorties du processeur TIP collectent les données transmises par les instruments à bas taux d'acquisition : sonde infrarouge à haute résolution, sonde stratosphérique, sonde à micro-ondes, détecteur de particules, et système de collecte de données (système ARGOS), ainsi que par les instruments de télémétrie des vaisseaux spatiaux. Il contrôle la validité des données, et il accepte des commandes de vérifications de données.

Les formats de sortie comportent une série digitée de mots de 8 bits (le premier bit étant le plus significatif) :

Tableau 6 : CARACTERISTIQUES DES SORTIES "TIP"

Taux de sortie	8320 bits par seconde
Longueur des mots	8 bits
Longueur d'un petit groupe	104 mots par 1/10 de seconde
Longueur d'un grand groupe	320 petits groupes en 32 secondes.

Ces sorties peuvent être transmises directement au sol en VHF, en 136,77 - 137,77 MHz.

	HRPT & LAC*	GAC**	APT
Form of data	Serial Digital Bit Stream most significant bit first	10-bit words,	Analog A-M on 2.4 KHz Subcarrier
Line rate	6/sec	2/sec	2/sec
Word rate	66.54K words/sec	6654 words/sec	4160 words/sec prior to D-to -A Conversion
Number of AVHRR Channels Included	5	5	2
Words of Earth scan per line per channel	2048	409	909, prior to D-to-A Conversion
Processing of AVHRR data	Formatting only	Resolution reduction & formatting	Resolution reduction, correction for geometric dis- tortion and formatting
Other data than AVHRR	TIP; time of day	TIP; time of day	Minute marks; calibration wedge

*Local Area Coverage (recorded high resolution data, analogous to the HRPT).

**Global Area Coverage (reduced resolution data for central processing).

TRADUCTION DES SIGLES

Characteristics of MIRP output : caractéristiques des sorties MIRP
LAC = Local Area Coverage (recorder high resolution data, analogous to the HRPT) : couverture localisée (enregistrement mis sur mémoire de données à haute résolution du type HRPT)

HRPT : données d'imagerie à haute résolution

GAC = Global Area Coverage (reduced resolution data for central processing) : couverture globale (données de résolution géométrique réduite pour les centres de traitement)

APT : système automatique de transmission d'images de résolution réduite

Form of data : type de données

Serial digital bit stream 10-bit words, most significant bit first : train de série numérique de mots de 10 bits ; le premier bit est celui qui a le plus de poids

Analog A - M ou 2,4 KHz subcarrier : sous-porteuse analogique de 2,4 KHz modulée en amplitude

Line rate : cadence lignes

Word rate : cadence mots

4160 words/sc. prior to D - to - A conversion : 4160 mots/sec. avant la conversion numérique analogique

Number of AVHRR channels included : nombre de canaux AVHRR présents

Words of earth scan per line per channel : mots de balayage terre par ligne, par canal

Processing of AVHRR data : traitement des données AVHRR

Formatting only : formatage seulement

Resolution, reduction, correction for geometric distortion and formatting : résolution, réduction, correction de la déformation géométrique et formatage

Other data than AVHRR : autres données que AVHRR

Time of day : heure de la journée

Minute marks : repères à la minute

Calibration wedge : niveau de calibration

Tableau 7 - Caractéristiques des sorties MIRP

3.2.3 - Les sorties du processeur MIRP

Le processeur MIRP traite les données acquises par le radiomètre AVHRR, pour en faire des sorties séparées, en 4 séries :

- la transmission en temps réel des données à haute résolution (HRPT)
- la transmission en temps réel des données à résolution réduite (APT)
- la transmission des données mises en mémoires pour les centres de traitement des "données globales réduites" (GAC : Global Aera Coverage)
- la transmission des données mises en mémoires, pour les centres de traitement de données à haute résolution, sur des zones sélectionnées au préalable (LAC : Local Area Coverage).

Le tableau 7 résume les caractéristiques de ces sorties. Les quatre types de données peuvent être transmis simultanément.

3.2.4 - Les transmissions APT

Les données AVHRR sont transmises, réduites, au taux de 120 lignes par minute, avec un "balayage linéaire", de façon à ce que la résolution soit uniforme le long de la ligne de balayage.

Tableau 8 : CARACTERISTIQUES DES TRANSMISSIONS APT, DEPUIS LES ORIGINES

Caractéristiques	ESSA VIDICON	ITOS	TIROS-N
Nombre de lignes par minute	240	48	120
Résolution	4 km au point sub-satellite	IR 7,4 km et VIS 3,7 km au point sub-satellite	4 km uniforme
Nature du signal	analogique	analogique	analogique
Fréquence	135,50 MHz	137,50 MHz 137,62	137,50 MHz 137,62
Puissance de l'antenne	5 watts	5 watts	5 watts

Chaque groupement dure 64 secondes, et compte 128 lignes. Ces données concernent deux canaux sur les cinq, choisis sur commande. Après traitement (calibration et télémétrie), les données digitales sont converties par le processeur MIRP en données analogiques, dans une gamme de gris de huit niveaux, représentés par une modulation d'amplitude maximum de $87 \pm 5\%$.

Ces données sont captées un peu partout à la surface du globe (fig. 7 : Stations APT équipées de matériel français).

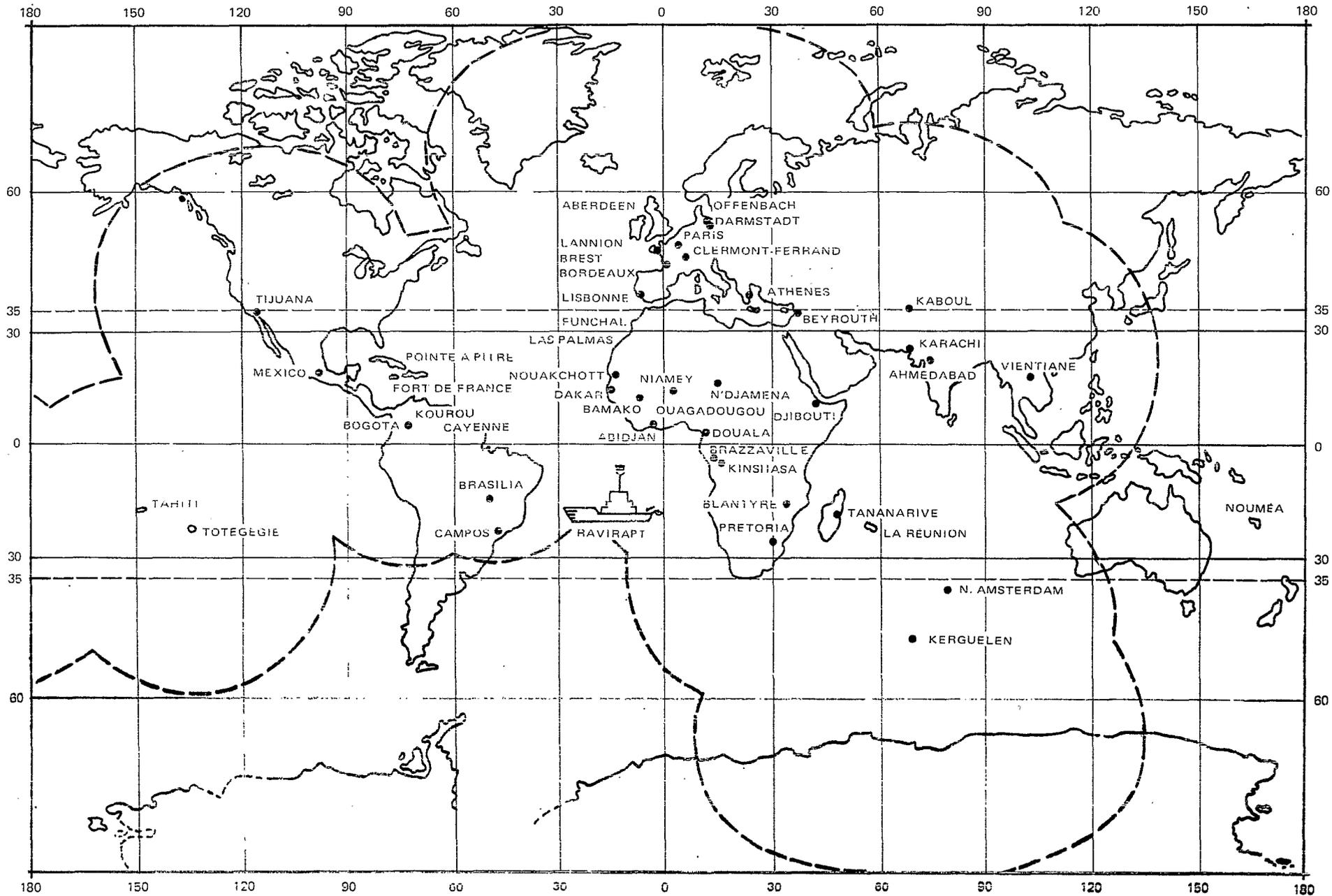


Fig. 7 - STATIONS APT ÉQUIPÉES DE MATÉRIEL FRANÇAIS (fourni par J. Hamon)

3.2.5 - Les transmissions HRPT (High Resolution Picture Transmission)

Il s'agit d'un signal multiplexé, comprenant les données AVHRR, et celles des instruments à basse cadence d'acquisition (sondes). Le taux d'émission est de 66.540 mots de 10 bits par seconde, par groupe de 11.090 mots ; les données à basse cadence sont incluses au début de chaque groupe (520 mots) ; celles-ci, collectées en mots de 8 bits, sont transformées par le processeur MIRP en mots de 10 bits, par l'addition d'un bit de parité en 9ème position, et de l'inverse du premier bit en 10ème position.

Les fréquences de transmission sont de 1698,0 MHz et 1707 MHz.

3.2.6 - Les mémoires digitales

Cinq mémoires assurent la conservation des données pour une transmission ultérieure aux centres de traitement de données. "Chaque stockage a une capacité de $4,5 \times 10^8$ bits, ce qui correspond à :

- une orbite complète (110 minutes) de données globales réduites (GAC)¹
- dix minutes de données à haute résolution (MRPT)
- 250 minutes de données à basse cadence d'acquisition (données TIP)².

¹ Les données globales réduites (GAC) ont été conçues pour permettre à la mémoire du satellite de conserver un échantillonnage de données AVHRR d'une orbite complète (110 mn).

Pour cela, le calculateur de bord sélectionne une ligne sur trois, et fabrique un point sur les lignes, en faisant la moyenne des valeurs radiométriques de quatre points successifs, le cinquième point suivant étant sauté. Chaque ligne GAC ainsi constituée contient 409 points, et le nombre total de points de l'enregistrement AVHRR se trouve divisé par 15 ($2048 \times 3/409 = 15$). La résolution est réduite à 4 km au point sub-satellite.

Ces données sont délivrées sur commande. Une station située assez haute en latitude, peut espérer, grâce à ce procédé, obtenir des données sur une très large zone.

A Lannion, on pourrait de cette manière couvrir l'Afrique toute entière, et à peu près 40% de la surface du globe. Les données GAC sont notamment utilisées par la NOAA pour la réalisation des cartes de température de la surface de la mer (cartes GOSSTCOMP).

² SCHWALB (A.), p. 16.

4 - COMPOSITION ET FORME DES IMAGES AVHRR

4.1 - COMPOSITION DES IMAGES

4.1.1 - Le module AVHRR et ses instruments

Le module AVHRR comporte une série d'instruments entrant dans la composition des images.

a) Le dispositif scanner comprend essentiellement un moteur et son habitacle, et un miroir de taille suffisante pour éclairer le champ de vue d'un télescope de 20,32 cm de diamètre. Le moteur fait tourner le miroir à 360 tours par minute, et le champ de vue instantané a été choisi de telle sorte que le mouvement des satellites le long de leurs orbites amène les lignes de balayage en positions contiguës au point sub-satellite.

b) Combiné au télescope, un système optique secondaire sépare l'énergie reçue en bandes spectrales discrètes, qui sont ensuite focalisées dans leurs champs respectifs.

c) Un dispositif spécial, comportant une source de refroidissement et un système de régulation de température au niveau 105°K, est utilisé pour les détecteurs infrarouges.

4.1.2 - Fonctionnement

A chaque révolution, une impulsion de synchronisation est générée lorsque le miroir atteint une position précise ("pre-earth"). Cette impulsion sert de référence pour les séquences suivantes ; à la réception de l'impulsion de synchronisation issue du radiomètre AVHRR, le processeur MIRP commence une procédure de chiffrage des données, donnant les nombres appropriés à chaque point aux endroits qui leur correspondent dans la ligne de balayage. Ces données sont mises en mémoire et sont lues à la cadence appropriée pour le format des données à haute résolution (HRPT). Chaque ligne de données reçoit les informations suivantes :

Tableau 9 :

Nature des données	Nombre de points
Données spatiales ¹	10 pour chaque canal spectral
Rampe électronique de calibration	1 " " " "
Données terrestres	2048 " " " "
Température de la cible ¹	1 pour chacun des canaux infrarouges
Température de la "masse" (patch) froide	1 pour la canal 4
Retour de ligne ¹	10 pour chacun des canaux infrarouges

Les canaux visible et proche infrarouge utilisent des détecteurs au silicium pour mesurer la radiation incidente ; 99% de l'énergie reçue passe par les détecteurs et le bruit est de 0,5% albedo.

Les canaux infrarouges utilisent des détecteurs refroidis à 105°K et leur niveau de bruit est inférieur à 0,12°K. Le point zéro d'énergie détectée est ramené au niveau du zéro précédent à chaque fois que le radiomètre regarde l'espace. La donnée du radiomètre durant le reste du balayage est égale à la différence d'énergie détectée entre l'espace et la terre.

4.2 - FORME ET DIMENSIONS DES IMAGES AVHRR

En définitive, chaque image AVHRR est constituée par une succession de lignes, composées elles-mêmes de points, et elle est construite de façon continue par les mouvements combinés et synchronisés du satellite et du radiomètre, avec des intervalles fixes servant à calibrer les instruments. Le miroir explore en effet "successivement la terre, d'horizon à horizon, l'espace, l'intérieur du satellite, le vide, et la terre à nouveau le tour suivant"². L'altitude du satellite détermine le champ du balayage qui, pour TIROS-N et NOAA-VI comporte 2048 points, compte tenu du fait que les points les plus éloignés ne sont pas pris en compte, à cause de la trop grande déformation subie par l'image à l'horizon ; la largeur de l'image ainsi

¹ Utilisées pour définir la calibration des canaux infrarouges ; le corps noir utilisé pour calibrer les canaux infrarouges est constitué par l'habitacle de l'instrument, et sa température est donnée par 4 thermomètres à résistance en platine.

² HAMON (J.), p. 25.

définie est restreinte à 2800 km environ (1400 km de part et d'autre de la trace de l'orbite). La longueur de l'image dépend de la position de la station de réception par rapport à la trace du satellite. Dans le meilleur des cas, le champ de poursuite est théoriquement de 16 minutes environ. Comme le radiomètre tourne à 360 tours par minute, il produit 6 lignes par seconde, ce qui donne 5760 lignes, soit une longueur de 6000 km environ (55° de latitude). A raison de 2048 points par ligne, une image de ce type compte donc 11,8 millions de points, et près de 60 millions pour cinq canaux.

L'incrément longitudinal qui sépare deux orbites (25°31 pour NOAA-VI), et le nombre de révolutions des satellites, impliquent, suivant la latitude du lieu, une couverture plus ou moins grande au sol, compte tenu du fait que l'image mesure 2800 kilomètres d'un bord à l'autre ; le taux de couverture augmente de l'équateur vers les pôles.

SOURCES ET DOCUMENTS CONSULTÉS

Ce texte a été réalisé en partie à partir des notes techniques publiées par la NOAA (série NOAA Technical Memorandum) et en partie à partir des sources d'information nombreuses et documentées qui se trouvent au CMS de Lannion. Nous remercions tout particulièrement Messieurs R. LASBLEIZ, J. HAMON, G. ROCHARD pour leurs précieux conseils.

DOCUMENTS CONSULTÉS

- HAMON (J.) - Information photographique reçue des satellites météorologiques, système APT, Météorologie Nationale, Multigraphie, 1971, 35 p., 41 fig.
- KIDWELL (K.B.) - NOAA polar orbiter data (TIROS-N and NOAA-6). Users guide, preliminary version. National Climatic Center Satellite data Services division, déc. 79, multigr., 200 p. (comporte une description figurée détaillée des réponses spectrales des canaux AVHRR des satellites).
- SCHWALB (A.) - The TIROS-N/NOAA A-G satellite series. NOAA Technical Memorandum NESS 95, Washington DC, mars 1978, 76 p. multigr.
- HUSSEY (J.W.) - The TIROS-N/NOAA operational satellite system ; NOAA-NESS, Washington DC, mai 1979, 35 p., 12 fig.
- FOOTE (R.), DRAPER (L.T.) - TIROS-N advanced very high resolution radiometer (AVHRR) ; in Coastal and Marine Applications of Remote Sensing, Remote Sensing Society, 1980, pp. 25-35.
- QUENEY (P.) - Eléments de météorologie. MASSON ed., Paris, 1974, 300 p.
- DISMACHEK (D.C.), BOOTH (A.L.), LEESE (J.A.) - National Environmental Satellite Service. Catalog of products, third edition. US Department of Commerce, NOAA-NESS, Washington DC, avril 1980, 120 p.

5 – EXEMPLES D'UTILISATION DES IMAGES AVHRR

5.1 – SUIVI DE PHÉNOMÈNES AU SOL : UN EXEMPLE SIMPLE, A PROPOS DE LA COUVERTURE DE NEIGE, EN NORVEGE

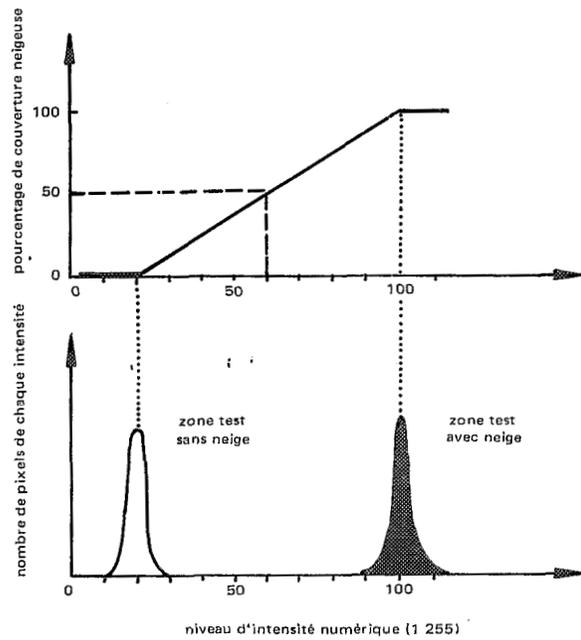
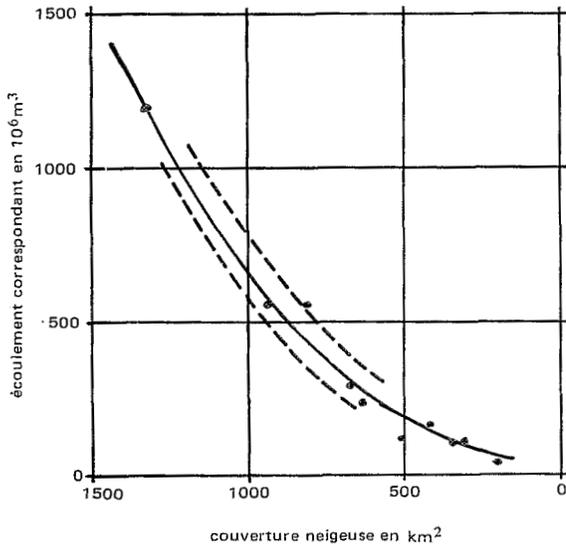
Snow and ice mapping : norwegian examples for run-off prediction.
 par OSTREM (G.) ANDERSEN (T.) ODEGAARD (H.) DEL LLANO (R.)
 Norwegian water Resources IBM, Oslo.
 and electricity board,
 Oslo.

5.1.1 - Introduction

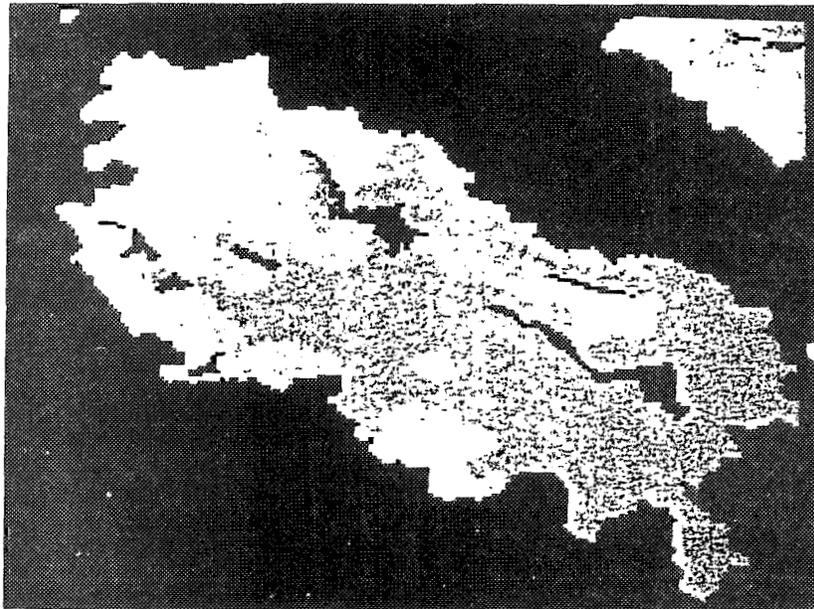
Les montagnes du sud-ouest de la Norvège reçoivent d'abondantes précipitations, et celles-ci peuvent être, du fait de la morphologie glaciaire, facilement stockées dans les lacs, naturels ou artificiels, dont la plupart sont situés à plus de 1000 mètres d'altitude. Ces conditions favorables en font une zone particulièrement bien placée pour la production d'énergie électrique.

Les recherches portent sur les possibilités offertes par les satellites dans la prévision des ressources en eau. Les images LANDSAT n'ont pas une répétitivité suffisante (18 à 9 jours, dans le meilleur des cas) pour fournir des données utilisables. Force fut donc pour les auteurs de se rabattre sur les satellites météorologiques. Depuis que ces outils fournissent directement des données numériques, ils permettent en effet d'arriver à des solutions satisfaisantes. Le but des auteurs est de montrer comment les données fournies par TIROS-N ont pu être utilisées, de façon opérationnelle, pour cartographier la couverture neigeuse des bassins de haute montagne, et comment cette information a pu servir dans la prévision des ressources en eau ; celle-ci est très importante, dans la mesure où les réservoirs doivent être encore pleins à la fin de l'été, de façon à assurer une production d'énergie suffisante en hiver, au moment où la demande est la plus élevée.

8a - «Principe pour déterminer l'échelle des gris utiles à l'étude d'une image, c'est-à-dire les niveaux qui correspondent à la couverture neigeuse. Le graphique du bas est l'historgramme qui sert à trouver les intensités des pixels en relation avec les champs d'expérimentation sélectionnés. Les courbes sont bien séparées. Le graphique supérieur montre la relation entre niveau d'intensité et pourcentage de couverture de neige, exprimée en nombre de pixels. Dans cet exemple, un pixel de niveau d'intensité 60 à 50 % de couverture neigeuse».



8b - «Essai d'établissement d'une courbe pour montrer la relation entre l'étendue de la couverture neigeuse dans un bassin donné, et les volumes d'eau survenus à la fonte des neiges. L'expérience a montré qu'il était possible de combiner les résultats obtenus avec des installations de puissance variée en Norvège dans le même diagramme. Il semble suffisant, au lieu de calculer le pourcentage de la couverture neigeuse dans le bassin de réception, de déterminer la superficie recouverte de neige en km². On peut alors trouver directement les volumes d'eau de fonte des neiges à partir de ce graphique général (en trait plein), indépendamment de la taille du bassin de réception.»



8c - «Bassin de réception de la station hydro-électrique de Tokke au sud de la Norvège à partir des données TIROS-N, présenté sur écran (original en couleurs). C'est seulement une petite partie de l'image qui apparaît sur la figure ; seuls les pixels compris à l'intérieur des limites du bassin sont pris en considération. Les surfaces noires sont des surfaces en dehors du bassin ou représentant des lacs dans le bassin. Les surfaces gris plus foncé sont couvertes de neige dans une proportion de 20 % et les surfaces les plus claires dans une proportion de 60 %.

Fig. 8 - (D'APRES G. OSTREM et al)

5.1.2 - Distribution de la neige

Tant que la neige couvre les massifs à 100%, il n'y a pas de prévision possible des débits. L'expérience a montré que la meilleure façon d'opérer est de commencer le travail lorsque la couverture de neige se trouve ramenée à 80%, ce qui se produit normalement fin mai, début juin, pour les zones sujettes à observation. A cette époque, les reconnaissances de terrain sont pratiquement impossibles, car la neige est instable et aucun moyen de communication n'est utilisable. C'est pourtant la période la plus importante pour l'évaluation des quantités d'eau disponibles. D'autre part, du fait de la topographie locale, il n'existe pas de ligne continue des plages de neige, mais une tendance à la multiplication des petites taches.

5.1.3 - Utilisation des données NOAA et TIROS-N

Les données furent obtenues d'abord de Lannion, puis de la station norvégienne de Tromsø, d'où les images parvenaient aux utilisateurs un jour après le passage des satellites.

Le problème principal fut de définir les échelles de gris à utiliser pour définir les pixels "libres de neiges", "en partie recouverts" ou "complètement recouverts". Par exemple, dans un cas, le niveau 20 des données fut considéré comme représentant les zones libres de neige, et le niveau 100 les zones entièrement couvertes, ce qui fait que seulement 80 niveaux (sur les 256 de l'échelle numérique) furent utilisés. Les auteurs établirent ces niveaux sur des zones tests, dont ils connaissaient le taux de couverture (zones basses, entièrement dégagées, glaciers considérés comme couverts à 100%, etc.), et d'autres caractéristiques : topographie à petite échelle, végétation, etc. L'absence de forêt facilita les opérations.

5.1.4 - Traitement des données

Après le choix des bornes de l'échelle de gris, une interpolation linéaire fut faite pour classer les taux de couverture neigeuse en fonction des valeurs intermédiaires (fig. 8). A un pixel de niveau 60 correspond par exemple un taux de couverture de 50% (fig. a). Une carte a ensuite été construite en fonction des niveaux choisis, ainsi qu'un comptage des pixels correspondant à un certain niveau de couverture. Des cartes en couleurs ont aussi été élaborées, en classes correspondant aux taux intermédiaires de 20, 40 et 60%.

En étudiant des bassins expérimentaux les auteurs ont pu établir une courbe approchée qui relie les taux de couverture neigeuse et le volume d'eau que l'on peut en attendre. Cette courbe empirique donne des résultats suffisants pour une prévision opérationnelle.

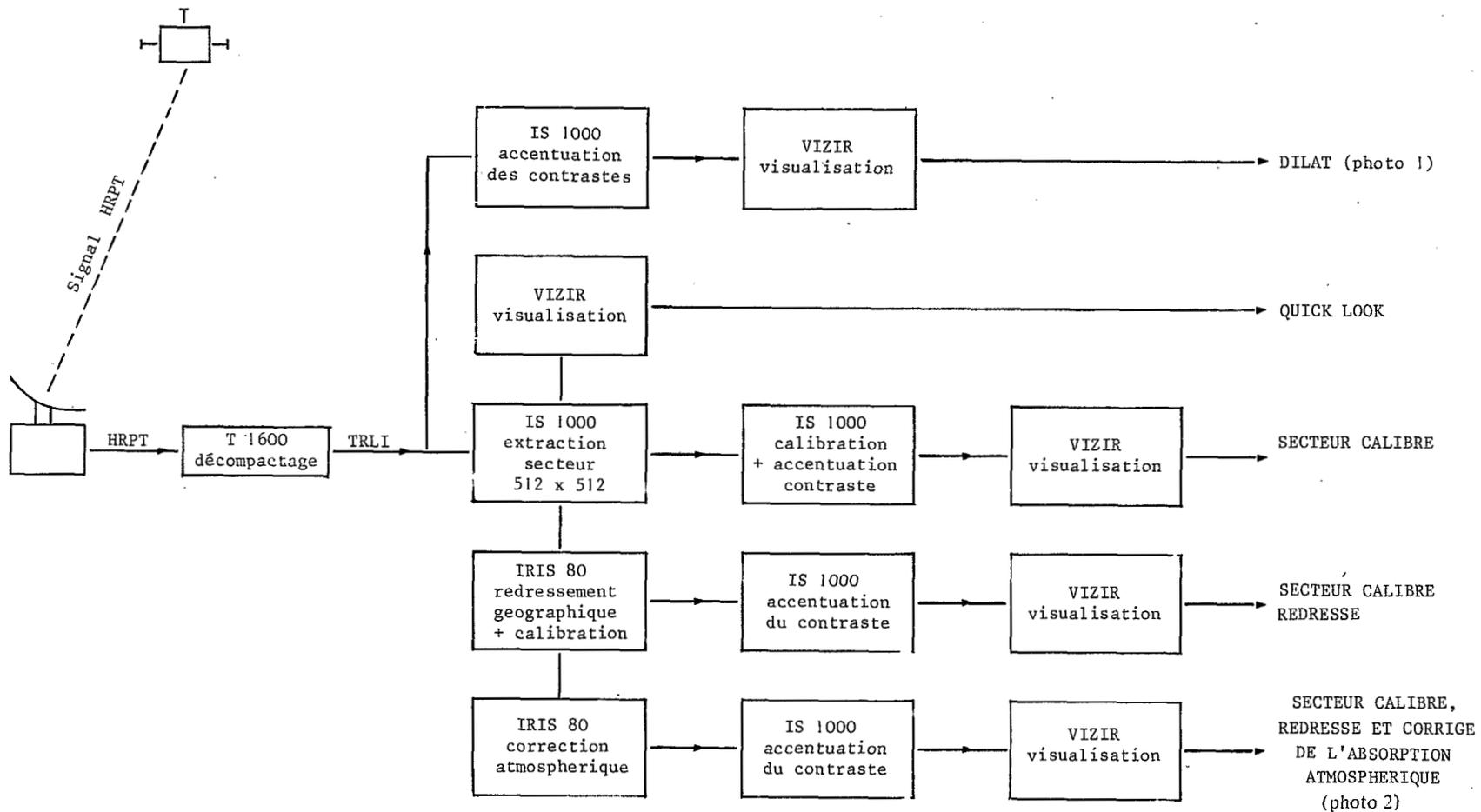


Fig. 9 - PROGRAMMES DÉVELOPPÉS AU CMS POUR LE TRAITEMENT A L'ÉCHELLE FINE DES MESURES AVHRR. LE T1600 ET L'IS 1000 SONT MICRO-ORDINATEURS.

Les nuages sont malheureusement totalement opaques aux rayons infrarouges, ce qui implique la nécessité d'un traitement comparatif des données avec celles d'un canal "visible", qui permet d'isoler les zones à ciel clair. Les nuages sont par contre transparents aux ondes millimétriques.

L'auteur note que "si l'ensemble des problèmes liés à l'appareil de mesure, à l'émissivité de l'eau et aux échanges à l'interface océan-atmosphère, conduit à une erreur sur la température radiométrique mesurée de l'ordre du degré, l'influence des seuls effets de l'atmosphère peut atteindre 10°".

Les méthodes de correction proposées sont classées en deux groupes: les méthodes de type monocanal, applicables seulement dans des cas particuliers, car elles nécessitent la connaissance de paramètres atmosphériques (quantité de vapeur d'eau, par exemple), et les méthodes de type multicanal, qui cherchent à s'en abstraire.

Les méthodes de type "multicanal" (ou différentielles) reposent sur l'idée que, "dans une atmosphère donnée, la variation de la température apparente d'une scène en fonction du coefficient de transmission contient implicitement des informations sur la structure de l'atmosphère ... (et que) l'utilisation de plusieurs mesures de températures apparentes pourrait dispenser de la connaissance du profil atmosphérique lors de la restitution de la température de surface" (p.19).

5.3 - PHULPIN, Th. - UTILISATION DE LA RADIOMETRIE INFRAROUGE MULTISPECTRALE POUR LA DÉTERMINATION DE LA TEMPÉRATURE DE SURFACE

Thèse Doctorat de Spécialités, 7-11-1978, Université de Lille, 137 p., annexes.

Les satellites permettent d'observer rapidement et sur de très grandes étendues les variations de la température de surface des sols et de la mer, dans le temps et dans l'espace, et de reconstituer des champs continus de température. Les mesures sont malheureusement entachées de nombreuses causes d'erreur, dont certaines sont liées aux particularités de l'atmosphère. Après avoir décrit les principes de la radiométrie par satellite, l'auteur énumère les sources d'erreur : nuages et brumes, effet de réflexion de la surface, et absorption atmosphérique. Il note qu'une estimation statistique donne de bons résultats dans le cas d'une étude restreinte à une zone de faible étendue (pour laquelle il a pu disposer d'une statistique), que la variation, à l'échelle du globe, des effets atmosphériques est la plus faible dans la fenêtre 3,5 - 4,0 μm (canal 3), mais que l'on ne peut malheureusement pas utiliser ce canal de jour à cause des effets perturbateurs de la réflectance. De nuit on peut espérer une précision de 0,26°K, pour un bruit de 0,1°K, tandis que de jour les meilleurs résultats sont obtenus avec le canal 4 (10,5 - 11,5 μm).

C'est la méthode de détermination multispectrale de la température de surface qui offre à ses yeux le plus grand intérêt, car un tel système "peut donner de façon systématique une estimation de la correction... et tenir compte des fluctuations... de l'état de l'atmosphère".

Pour l'exploitation des données de TIROS-N, un algorithme optimal est proposé, qui utilise une "combinaison linéaire des mesures effectuées de nuit dans les canaux 3,7 et 11 μm . La valeur de la correction trouvée de nuit sera réutilisée de jour dans les zones perturbées par l'effet de la réflexion spéculaire". Cette méthode permettrait d'escompter une précision "meilleure que 1,2°K de jour dans les zones de réflectance faible et 0,5°K de nuit par ciel clair".

Une détermination tricanale sera possible avec l'introduction des versions "Advanced TIROS-N" (NOAA-E et suivants), et l'adjonction au système actuel du canal 5, centré à 12 μm ; une simulation a montré à l'auteur que cette méthode "offrait, de nuit, et de jour, dans les zones de réflectance faible, de meilleurs résultats". L'élimination des nuages perturbateurs peut enfin être faite "par combinaison du canal 10,5 - 11,5 μm avec le canal visible" de jour, et peut-être "avec le canal 3,55 - 3,93 μm dans le cas de mesures nocturnes".

5.4 - PHILIPPE, M. - RECHERCHE DES FRONTS THERMIQUES EN MÉDITERRANÉE. L'EXPLOITATION DES THERMOGRAPHES SATELLITAIRES AU CENTRE DE MÉTÉOROLOGIE SPATIALE EERM

5.4.1 - Historique

Une exploitation à échelle fine (pixel par pixel) des données radiométriques des satellites météorologiques (NOAA-5, TIROS-N, NOAA-6) s'est développée au CMS depuis 1976.

Elle intéressait primitivement uniquement la Méditerranée et portait sur la réalisation quotidienne de thermographies, sur cette mer, qui étaient expédiées au Naval Undermeter System Center et au Naval Oceanographic Office (USA). Cette exploitation se poursuit actuellement avec, depuis 1978, à l'instigation et avec le concours de la Marine Nationale, un dépouillement de ces thermographies au CMS, et une extension depuis 1980 des zones d'intérêt au proche Atlantique. Parallèlement, en 1979, a débuté sur le front de Manche une collaboration avec les scientifiques des laboratoires de biologie marine de l'Université de Bretagne Occidentale et de la station marine de Roscoff.

5.4.2 - Traitement des données

L'ensemble des traitements développés au CMS pour l'exploitation des données radiométriques à échelle fine est résumé sur la figure 9. Ils comprennent principalement :

- un programme de routine DILAT qui effectue une accentuation de contraste sur les surfaces marines et permet le traitement, en moyenne, de 4 orbites par jour sur la Méditerranée et le proche Atlantique (cf. photo 1).

PHOTO 1

"DILAT" TIROS N du 16.09.1979 (paasage 4769).

La zone représentée correspond ici à 2 mn 30 sec d'acquisition HRPT, soit 2048 points x 900 lignes. Les eaux froides sont représentées en clair et les eaux chaudes en foncé. La structure thermique sur le proche Atlantique et sur la Manche est particulièrement bien mise en évidence sur le document de par la faiblesse de la nébulosité.

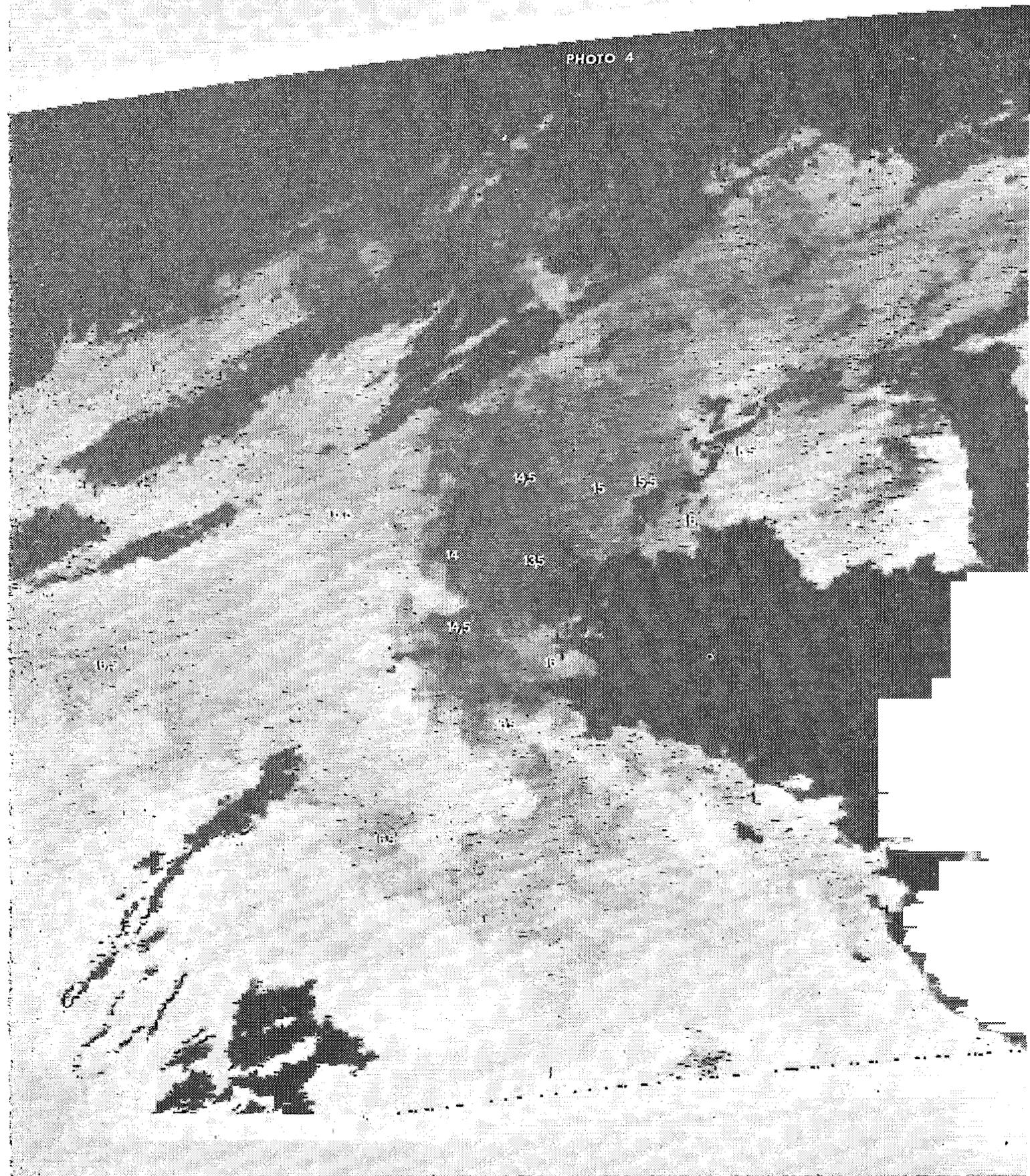
Construite avec 16 teintes de gris distantes entre elles de 4 comptes numériques ($\approx 0.5^{\circ}\text{C}$), cette thermographie peut être exploitée quantitativement par analyse densitométrique du film négatif correspondant.

Au cours de l'année 1979, plus de 300 "DILAT" ont été réalisées sur la Méditerranée et le proche Atlantique.



PHOTO 1

PHOTO 4



- des programmes de calibration, redressement géographique et, en cours d'évaluation, de correction atmosphérique multispectrale, qui ont été jusqu'ici utilisés pour traiter un nombre limité de situations présentant un intérêt particulier, comme d'être par exemple contemporains de séries de mesures océanographiques in situ (cf. photo 2).

5.4.3 - Applications

- Recherche des fronts thermiques en Méditerranée et sur le proche Atlantique. Les fronts décelés quotidiennement sur les thermographies sont recensés, et la carte qui en est dressée toutes les semaines est envoyée aux organismes intéressés. Ces cartes hebdomadaires ont donné lieu à des travaux de synthèse. La figure 10 présente la situation des fronts thermiques en Méditerranée au mois de juillet 1979. La figure 11, qui est une compilation sur un an, met en évidence les zones fréquemment intéressées par des fronts et celles thermiquement plus stables.

- Etude de certains systèmes frontaux : front de Manche, front de Malte, fronts dans la partie méridionale du bassin provençal.

5.4.4 - Développements

Les développements actuels sont centrés essentiellement sur le calcul de l'absorption atmosphérique, par des algorithmes multispectraux (3,7 μm et 11 μm de l'AVHRR et du TOVS), qui permettent d'obtenir des thermographies, recalées en température absolue, plus à même, entre autres choses, d'être utilisées pour des études climatologiques.

5.4.5 - Bibliographie. Étude satellitaire de la température de surface

- ANDING D., KAUTH R. (1970) - Estimation of sea Surface Temperature from Space. *Remote Sensing Environment*, 14, pp. 217-220.
- BIGNELL K.J. (1970) - The water vapor infrared continuum. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 96, pp. 390-403.
- BOSOMWORTH D.P., GUSH H.P. (1965) - *Can. J. Phys.*, 43, p. 729.
- BROWER R.L., WALTON C.C., SIGNORE T.L., KALINOWSKI J.K. (1976) - Sea surface temperature for Tiro's-N. Symposium on meteorological observations from space. Philadelphia, Penna, USA. Cospar.

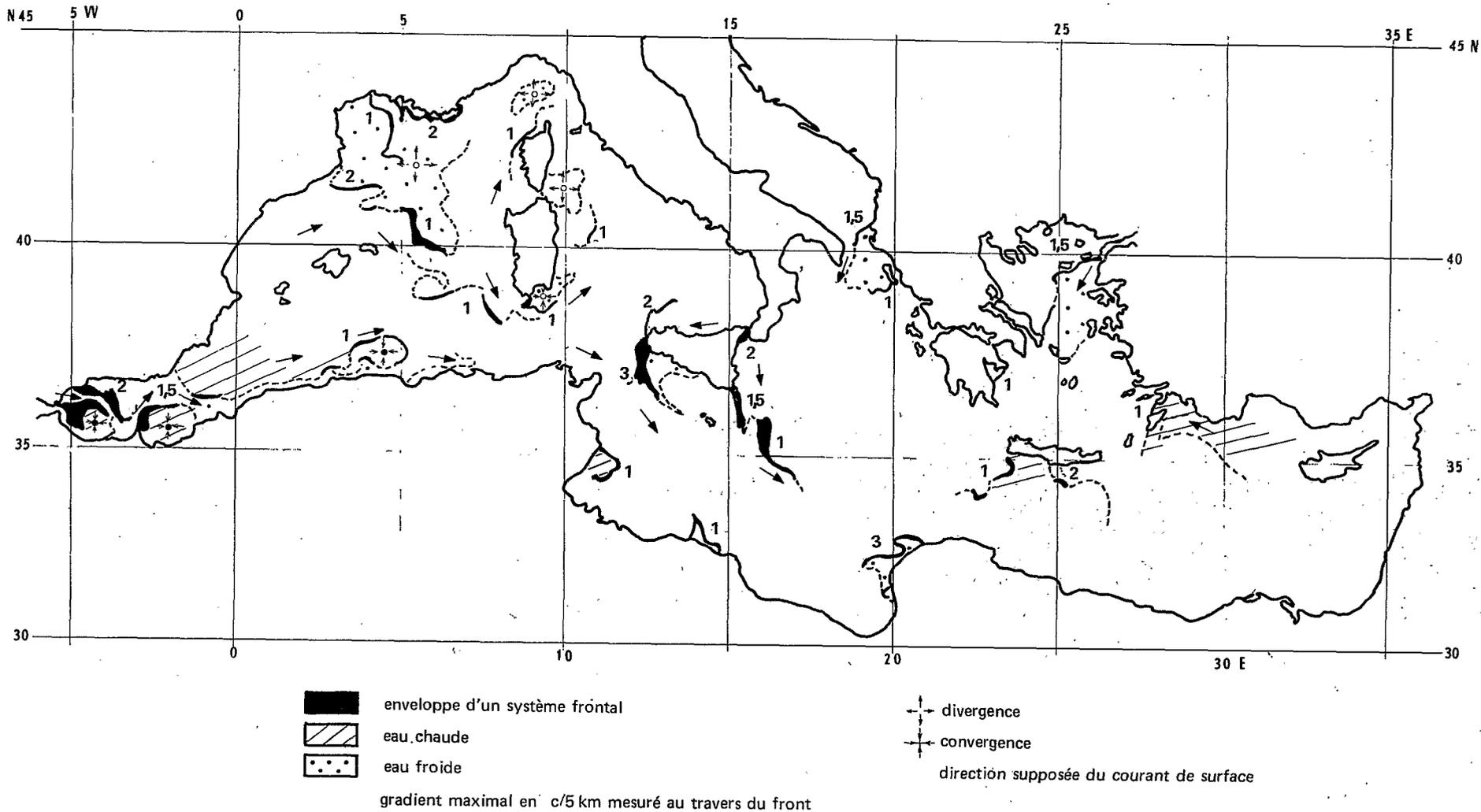


Fig. 10 - FRONTS THERMIQUES EN MÉDITERRANÉE AU MOIS DE JUILLET 1979

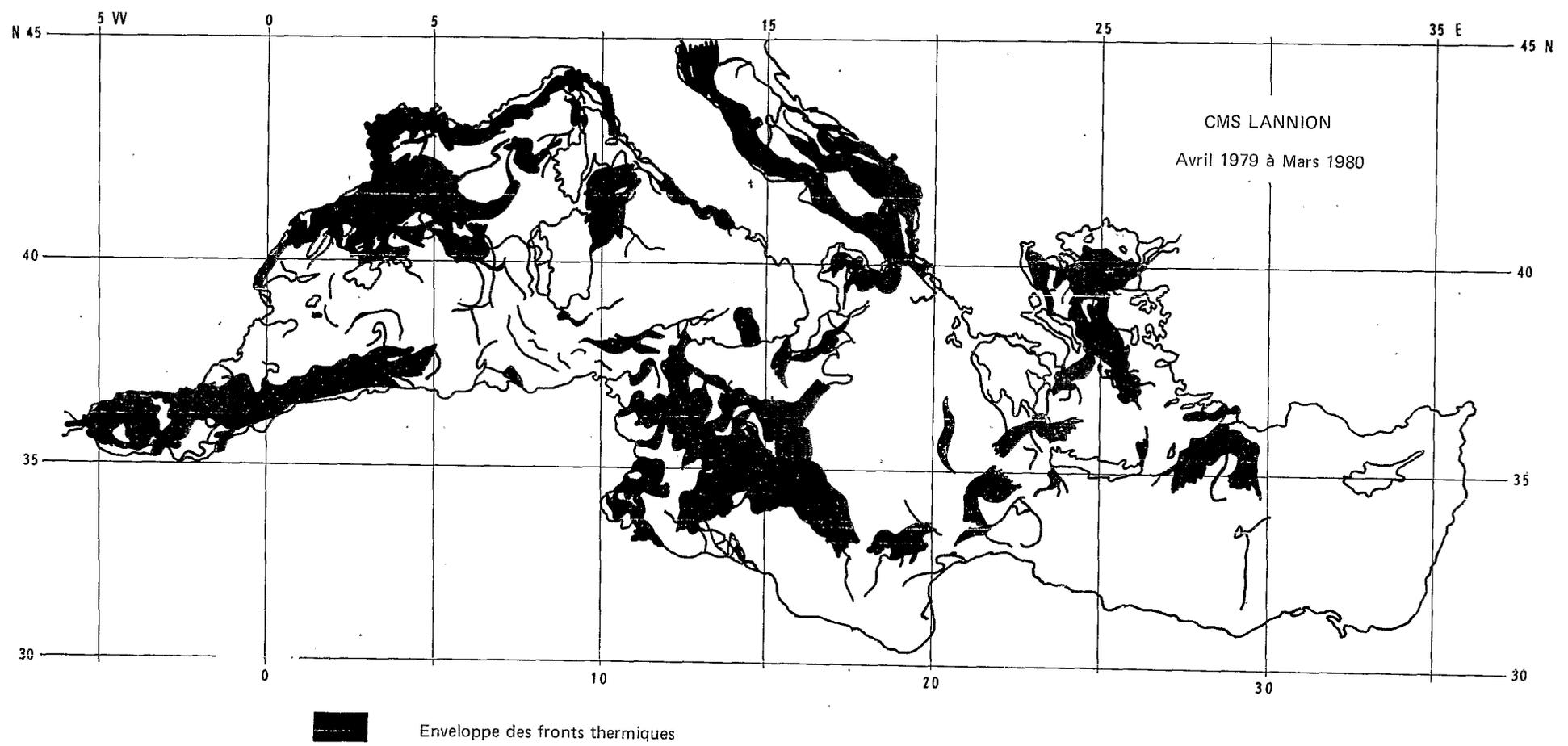


Fig. 11 - FRONTS THERMIQUES EN MÉDITERRANÉE (AVRIL 1979 - MARS 1980)

- BROWER R.L., GOHRBAND H.S., PICHEL W.G., SIGNORE T.L., WALTON C.C. (1976) - Satellite derived sea surface temperature from NOAA spacecraft. NOAA Techn. Memorandum, NESS 78, 74 p.
- BURCH D.E., GRYVNAK D.A. (1970) - Atmospheric attenuation in the infrared windows, in "Space Opt. Semi - in depth - Santa Barbara, Calif. 1969", pp. 17-22.
- BURCH D.E. (1971) - Investigation of the absorption of infrared radiation by atmospheric gases, in Publ. U4784, Philco Ford Corp. Aeronutronic Div, Newport Beach, Calif.
- CAYLA F., PASTRE C. (1973) - Réflexion spéculaire du soleil. Note interne de l'EERM n° 319.
- COX C., MUNK W.O. (1956) - Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter. Bull. Scripps Inst. Ocean., vol. 6.
- DESCHAMPS P.Y. (1977) - Thèse d'Etat. Télédétection de la température de la surface de la mer par radiométrie infrarouge. Université de Lille.
- DESCHAMPS P.Y., PHULPIN T. (1978) - Correction atmosphérique des données obtenues par télédétection dans l'infrarouge. Journées nationales d'études, CNEOXO, Brest 78.
- ELSASSER W.M. (1942) - Heat transfer by infrared radiation in the atmosphere Harvard meteorological studies, Harvard Univ. Press.
- FOUQUART Y., LENOBLE J. (1973) - Variation de la transmission de la vapeur d'eau en fonction de la température : utilisation du modèle statistique. Présentés au Congrès International Astronautical Union. Baku-USSR.
- GOBULITSKY B.M., MOSKALENKO N.I. (1968) - Spectral transmission functions in the H₂O and CO₂ bands. Izv. Ocean. Atm. Phys., 4, pp. 194-204.
- GOODY R.M. (1964) - Atmospheric radiation, theoretical basis. Clarendon Press Oxford.
- HALE G.M., QUERRY M.R. (1973) - Optical constants of water in the 200 nm to 200 μ m wavelength region. Appl. Opt. 12, pp. 555-563.
- HUNT G.E. (1973) - Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infrared thermal window wavelengths. Quart. J. R. Met. Soc. 99, pp. 346-369.
- IMBAULT D. (1979) - Détermination de la température de surface de l'océan par radiométrie différentielle. Paris, 1979, 163 p. Thèse de Docteur Ingénieur, soutenue à l'Université Paul et Marie Curie, Paris VI, le 23 novembre 1979.

- KING J.I.F. (1959) - Proc. IRIS 4, p. 164.
- KONDRATYEV K.Ta (1972) - Radiations processes in the atmosphere. W.M.O., n° 309, Genève.
- LEFEVRE J., QUINIOU-LEMOT F., TOURNIER B. (1979) - Structures thermiques et distribution de certains organismes planctoniques : nouvelles méthodes d'approche à partir de l'exemple du site de Plogoff. Communication aux Journées de Thermoécologie, Nantes, novembre 1979, à paraître.
- LENOBLE J. (1974) - Transfert radiatif. Cours de DEA. Université de Lille.
- Mc CLATCHEY R.A., FENN R.W., SELBY J.E.A., VOLZ F.E., GARINE J.S. (1971) - Optical properties of the atmosphere (revised). AFCRL - 71 - O279. Envir. Res. Papers n° 354.
- MOSKALENKO N.I. (1975) - The effects of the atmospheric aerosols on the spectral and angular distributions of thermal radiation, *IZV. Atmosph. and Ocean. Phys.* 11, pp. 1254-1262.
- PASTRE C., TOURNIER B. (1974) - Température superficielle et couverture nuageuse. Note interne de l'EERM n° 350.
- PENNER S.S. (1959) - Quantitative molecular spectroscopy and gas emissivities. Addison-Wesley, Reading Massachusetts.
- PHILIPPE M., LE MOAL A., HARANG L. (1979) - Satellites météorologiques à défilement et thermographies de la surface de la mer. *MET-MAR*, 104, pp. 20-31.
- PHILIPPE M. (1980) - Fronts thermiques en Méditerranée d'après les données du radiomètre du satellite NOAA-5 (septembre 1977 - février 1979). *Compte rendu à l'Académie des Sciences, série B*, vol. 148.
- PLASS G.N. (1958) - *J. Opt. Soc. Am.* 48, p. 690.
- PONTIER L., DECHAMBENOY C. (1965) - Mesure du pouvoir réflecteur monochromatique de l'eau sous incidence normale entre 1 et 38 μm . *Annales de Géophysique* 51, p. 462.
- PRABHAKARA C., DALU G., KUNDE V.G. (1974) - Estimation of sea surface temperature from remote sensing in the 11 to 13 μm window region. *J. Geophys. Res.* 79, pp. 5039-5044.
- REDDY S.R., CHO C.W. (1965) - *Canad. J. Phys.* 43, p. 2331.
- ROBERTS R.E., SELBY J.E.A., BIBERMAN L.M. - Infrared continuum absorption by atmospheric water vapor in the 8-12 μm window. *App. Opt.* 14, p. 2085.

- ROCHARD G. (1980) - Etude numérique de la restitution du profil vertical des températures dans l'atmosphère à partir de mesures satellitaires. Note Techn. EERM n° 60, Nlle série, mars 1980, 97 p.
- SELBY J.E.A., MC CLATCHEY R.A. (1975) - Atmospheric transmittance from 0.25 to 28.5 μm . Computer code lowtran 3, AFCRL - 75-0255, Envir. Envir. Res. Papers n° 513.
- SELBY J.E.A., SHETTL E.P., MC CLATCHEY R.A. (1976) - Supplement LOWTRAN 3B AFCRL - 76-0258. Envir. Res. Papers n° 587.
- SHAPIRO. M.M., GUSH H.P. (1966) - Canad. J. Phys. 44, p. 949.
- SMITH W.L. (1969) - Essa technical report ESC 47.
- STONE J.M. (1964) - Radiation and optics, Mc Graw Hill.
- TAKASHIMA T. (1976) - Effects of aerosols in determining the temperature earth's surface at 11.2 μm by using satellite data. J. of Met. Soc. of Japan 54, pp. 118-122.
- TANRE D. (1977) - Thèse de 3ème cycle. Etude de l'influence des aérosols sur le rayonnement terrestre rétrodiffusé. Université de Lille.
- TOURNIER B. (1977) - Détermination des températures de surface de la mer à partir des mesures radiométriques satellitaires. Note interne de l'EERM n° 397.
- VALLEY S.L. (1965) - Handbook of geophysics and space environment. AFCRL.
- WHITE K.O., WATKINS W.R., TUER T.W., SMITH F.G., MEREDITH R.E. (1975) - J. Opt. Soc. Am., p. 1201.

6 - ANNEXES

6.1 - SATELLITES MÉTÉOROLOGIQUES DE LA SÉRIE TIROS/NOAA (renseignements obtenus à la station de Lannion, notamment auprès de G. Rochard)

TIROS : Television Infra-Red Observation Satellite.

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration.

6.1.1 - Satellites de la série TIROS

TIROS	1	01.04.1960	Transmission d'images différée	Stabilisation par spin. 130-140 kg, 48 x 107 cm ; Orientation fixe dans l'espace ; non héliosynchrones.
	2	23.11.1960		
	3	12.07.1961		
	4	08.02.1962		
	5	19.06.1962		
	6	18.09.1962		
	7	19.06.1963		
xxx ¹	8	21.12.1963		
	9	22.01.1965		
	10	02.07.1965		

6.1.2 - Satellites ITOS : Improved Tiros Operational Satellites

ESSA ²	1	03.02.1966	Satellites pour l'étude de l'environnement. Images de jour exclusivement. Transmission APT. Fonctionnent encore en 1974 (ESSA-8). Archivés à Lannion jusqu'en nov. 1974.
xxx	2	28.02.1966	
	3	02.10.1966	
xxx	4	26.01.1967	
	5	20.04.1967	
xxx	6	10.11.1967	
	7	10.08.1968	
xxx	8	15.12.1968	
	9	26.02.1969	

¹ xxx = satellites reçus au CMS.

² ESSA : Environment Survey Satellites Administration.

6.1.3 - Série expérimentale NIMBUS. Satellites héliosynchrones.

***	NIMBUS	1	A	28.08.2964	
***		2	B	15.05.1966	DRIR (Infrarouge direct de nuit,
***		3	C	14.04.1969	en plus de l'APT de jour).
***		4	D	08.04.1970	1083-1097 km, 400 kg
		5	E	11.12.1972	
		6	F	12.06.1975	1100 km, 870 kg
***		7	G	21.10.1978	954 km, incliné à 99°

6.1.4 - Série ITOS-NOAA

***	ITOS	1	ou TIROS-M	23.01.70	1433-1479 km, 310 kg, 101,99°, 115'
***		2/A	ou NOAA-1	11.12.70	1440 km
		B		21.10.71	retombe au large de l'île Devon après 90 min.
		C		fév. 72	pas lancé (fusée défectueuse), reporté
***		D	ou NOAA-2	15.10.72	344 kg
		E		Juil. 73	échec (tombé)
***		F	ou NOAA-3	06.11.73	340 kg, 1500 km
***		G	ou NOAA-4	15.11.74	330 kg, 1450 km, 102'
***		H	ou NOAA-5	29.07.76	

ITOS 1 et 2 étaient différents des ITOS D et H, par la présence d'un mélange radiomètres infrarouges/caméras Vidicon, et par l'absence de VHRR-VTPR.

6.1.5 - Série TIROS-N/NOAA A-G. Réalisation et projets

***	TIROS N			13.10.1979	Prototype. Les données HRPT et APT ne sont plus transmises depuis le 01.11.80.
	NOAA	A/6		27.06.1979	Premier satellite opérationnel.
		B		29.05.1980	Echec
		C		avril 1982	
		D		mai 1981	
		E		fin 1981	
		F		avril 1984	
		G		février 85	
		H		avril 1986	
		I		avril 1987	
					et probablement J et K

6.1.6 - Satellite HCMM, satellite expérimental

**** HCMM = Heat Capacity Mapping Mission

2 canaux : 0,55 - 1,1 μm

10,5 - 12,5 μm

Orbite circulaire héliosynchrone, à 620 km du sol, incliné à 97,6°. Résolution de 500 m au point sub-satellite. Lancé le 26.04.1978, utilisé jusqu'au 14.09.1980.

Au total, 85.000 photos ont été reçues au Centre de Météorologie Spatiale de Lannion, de 1963 à 1976. 54.000 photographies ont été archivées jusqu'à l'introduction des systèmes VHRR et AVHRR. Environ 10.000 clichés sont conservés (images complètes ou tronquées) des satellites géostationnaires (SMS, GOES et METEOSAT), et plus de 20.000 clichés des données VHRR et AVHRR.

En outre, des tirages sur papier sont archivés, mois par mois, de mars 1966 (ESSA-2) à septembre 1975 (NOAA-4), et deux à trois orbites par jour de NOAA-6 sont classées de la même manière depuis le lancement de ce satellite. Enfin, les tirages photographiques nécessaires à la prévision météorologique (néphanalyse) (environ 100.000 photographies) ont également été sauvegardés. A titre d'illustration, nous fournissons le décompte des clichés des premiers satellites archivés à la station.

6.2 - DONNÉES BRUTES TIROS-N/NOAA-6 DISPONIBLES AU C.M.S. DE LANNION (d'après J. Hamon)

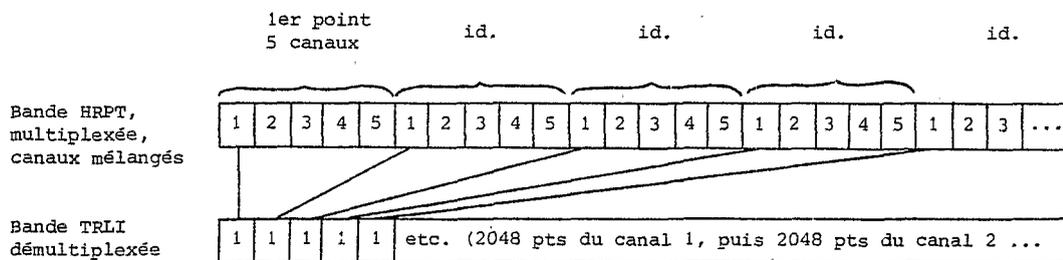
Il existe deux types de données brutes :

- a) la donnée telle qu'elle est reçue en acquisition directe depuis les satellites (données HRPT),
- b) la données décommutée (TRLI = traitement de lignes), élaborée à partir de la donnée HRPT.

Le passage de l'une à l'autre se fait de la façon suivante : la donnée HRPT comprend tous les messages reçus des satellites, données AVHRR, TIP et DCS ; au sein des données AVHRR les canaux sont mélangés, chaque point sur chaque ligne recevant à la suite les comptes des cinq canaux, après quoi on passe au point suivant, et ainsi de suite.

Passer à la bande TRLI consiste :

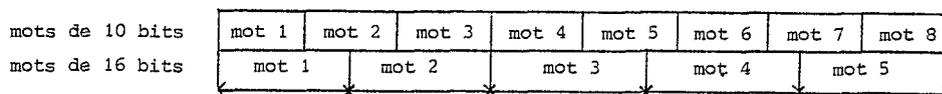
- 1) à ne conserver que les données AVHRR et les données de calibration,
- 2) à aligner les canaux les uns à la suite des autres.



- Cette bande TRLI comporte :
- un label (date, orbite, heure de début, heure de la fin)
 - les données AVHRR, 2048 points par 2048 points
 - les données de calibration.

La bande TRLI peut contenir 4 minutes 30 d'orbite, soit 1620 lignes, soit 15° en latitude. Il est possible d'obtenir ce traitement par zone d'intérêt et l'on peut en définir les bornes au sein de l'orbite considérée (30 sec. d'acquisition, 1 minute, 2 minutes...) (fig. 13: Trajectographie des satellites NOAA et aire de réception de la station de Lannion).

La donnée HRPT brute est fournie compactée, et elle arrive en mots de 10 bits ; le calculateur ayant des mots de 16 bits, un groupe de cinq mots/calculateur regroupe 8 mots d'information



6.3 - RECONSTITUTION DES ORBITES DES SATELLITES. EMPLOI DU TRAJECTOGRAPHE

A l'aide des éphémérides établis au Centre de Météorologie Spatiale de Lannion, il est possible de repérer la trace des satellites au sol au cours de leurs différents passages ; cette détermination permet en particulier à l'utilisateur de choisir les images, et les secteurs d'images, qui l'intéressent, notamment dans le cas d'acquisition de données au format "traitement de lignes" (TRLI).

On utilise pour cela le trajectographe, instrument mis au point à Lannion, et les cartes ad hoc publiées par la Météorologie Nationale¹

¹ Dans le cas qui nous occupe, il s'agit de la carte de l'hémisphère Nord n° ST 300, projection stéréographique polaire (échelle 1/30.000.000 à la latitude 60°N).

TABLEAU DES CLICHES CONSERVES A LA STATION DE LANNION, DES ORIGINES DE LA STATION A NOAA-2 (Relevé établi par Y. LE NINIVIN et A. NOYALET).

Nom du satellite	Dates de réception		Nombre de photographies	
	début	fin		
TIROS-8	24.12.63	12.05.64	76	
NIMBUS-A	30.08.64	21.09.64	142	
ESSA-2	03.03.66	29.10.67	5.305	
NIMBUS-2	16.05.66	07.04.68	7.310	
ESSA-4	30.01.67	06.06.67	1.075	
ESSA-6	16.11.67	23.09.69	4.497	
NIMBUS-3	VIS ¹	15.04.69	25.09.70	3.268
	IR ¹	15.04.69	17.04.70	243
ESSA-8		19.12.68	22.10.75	20.597
ITOS-1	VIS	10.02.70	16.06.71	4.829
	IR	13.02.70	16.12.70	203
NIMBUS-4		09.04.70	07.07.72	1.101
NOAA-1		14.12.70	26.06.71	1.654
NOAA-2		17.10.72	24.10.74	3.576

¹ VIS : image visible

IR : image infrarouge

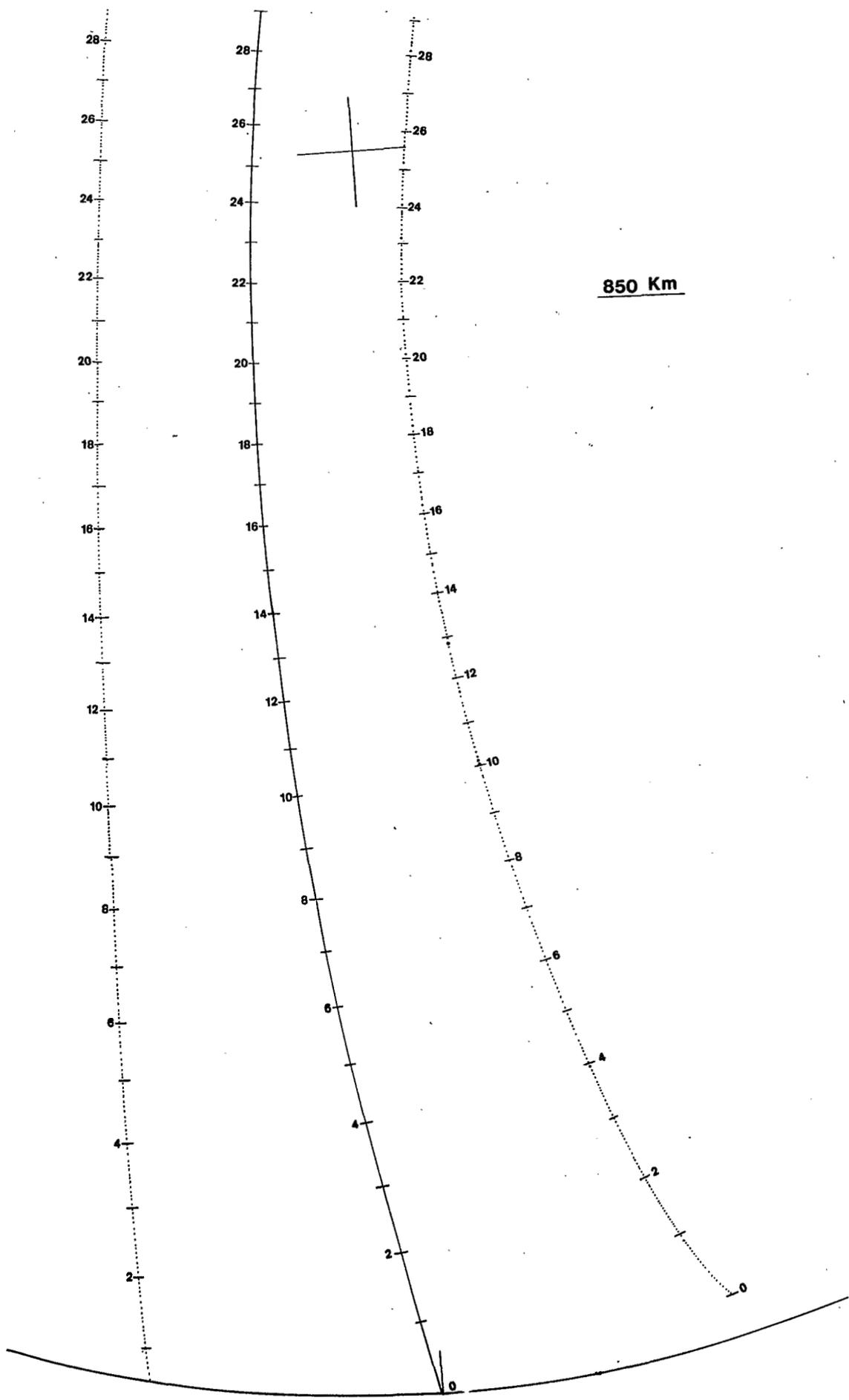


Fig. 12a - TRAJECTOGAPHE DE L'ORBITE ASCENDANTE

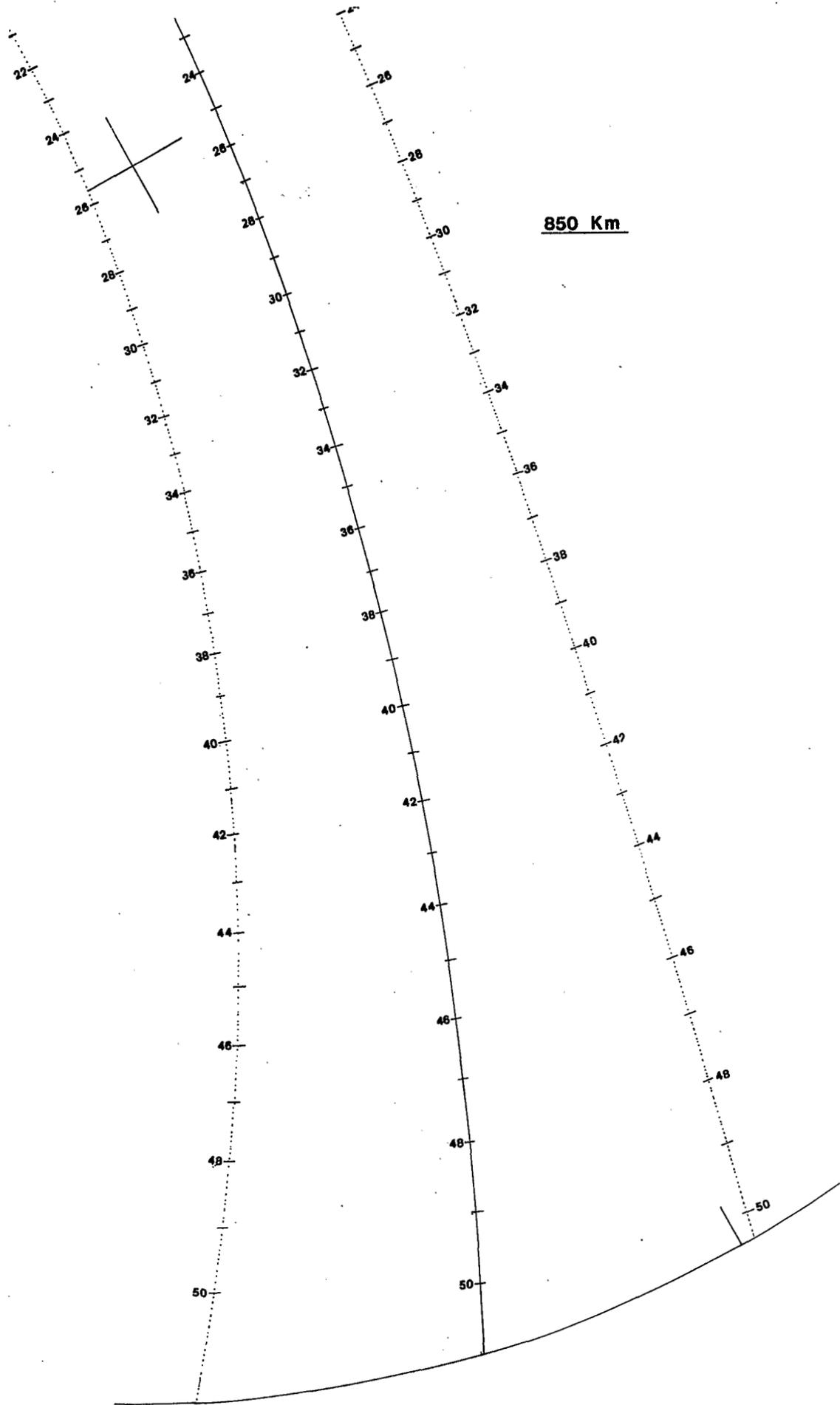


Fig. 12b - TRAJECTOGAPHE DE L'ORBITE DESCENDANTE

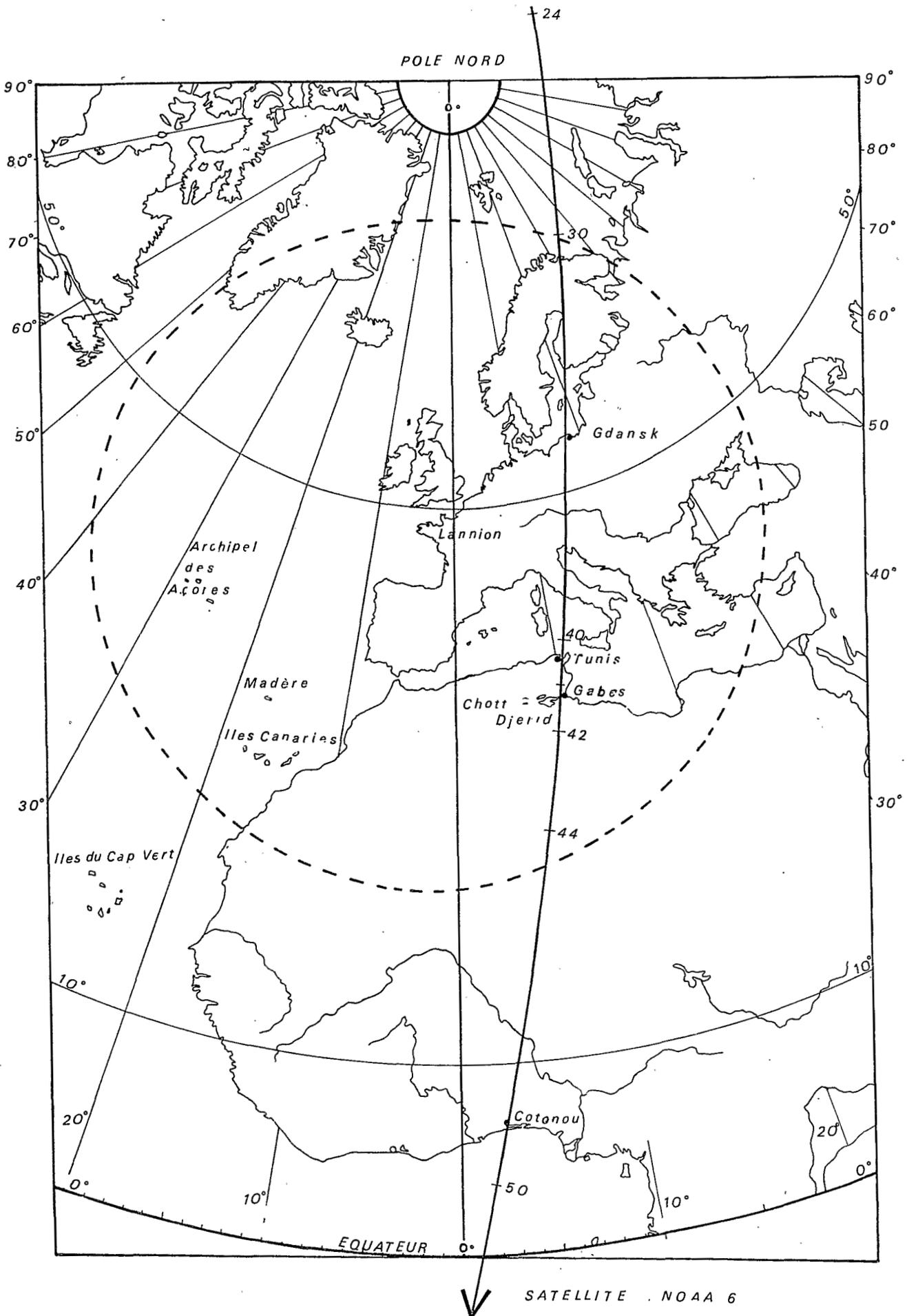


Fig. 13 - RECONSTITUTION D'UNE ORBITE A PARTIR D'UN TRAJECTOGRAPHE

6.3.1 - Le trajectographe (figures 12a et 12b)

Cet instrument est composé d'un support transparent, sur lequel sont inscrits un certain nombre de repères :

- a - la courbe centrale, en trait continu, figure la trace de l'orbite d'un satellite, et les courbes externes, en pointillé, les limites de l'image correspondante qui résulte du balayage latéral des détecteurs ;
- b - les chiffres indiquent les temps, en minutes, écoulés, depuis le passage du noeud ascendant. Ces chiffres permettent de connaître les heures d'arrivée et de sortie du satellite par rapport à la zone d'acquisition de la station (fig. 13)
- c - la croix en haut de l'instrument fixe l'emplacement du pôle Nord, et la courbe du bas correspond à l'équateur de la carte de référence.

On a représenté (figures 12a et 12b) deux trajectographes différents, suivant que nous nous intéressons à la partie de l'orbite ascendante ou descendante.

6.3.2 - Détermination pratique des images, et secteurs d'images, utiles pour l'étude d'une zone donnée.

Plusieurs opérations conduisent à la détermination des images, et des secteurs d'images, utilisables dans un cadre géographique particulier. Il faut tout d'abord se procurer la carte de référence éditée par la Météorologie Nationale.

Ce document doit en outre être complété par une représentation de la zone d'acquisition de la station de Lannion, indiquée par la courbe en tiretés épais de la figure 13, de façon à ce que l'on puisse savoir s'il est possible d'obtenir des données¹.

Dans le cas d'un utilisateur dont la zone d'intérêt serait constituée par exemple par les plaines côtières des parties septentrionale et centrale de la Tunisie (de la côte Nord au Chott Djerid) on se trouverait en situation assez favorable. Pour avoir des données complètes (visible et infrarouge thermique) avec le satellite NOAA-VI, seuls conviennent les passages de jour, qui se produisent alors le matin, en orbite descendante. L'application du trajectographe sur la carte montre que la meilleure orbite, passant entre Tunis et Gabès, est celle qui franchit l'équateur à la longitude 1°Est, les limites externes de la trace se situant à 15°Est et 12°Ouest. Si l'on veut éviter de trop grandes déformations de l'image, on peut convenir que toutes les orbites dont la longitude du noeud descendant est comprise entre 10°Est et 8°Ouest conviennent.

¹ Pour simplifier la lecture de la figure 13, nous avons seulement figuré la zone d'acquisition à 0° sur l'horizon, qui correspond aux limites maximales.

Une fois les orbites choisies, il reste à déterminer le temps de passage du satellite sur la zone. Pour un passage à 1°Est (noeud descendant), les temps d'acquisition HRPT sont situés entre les minutes 40 et 42 (après le noeud ascendant) et plus précisément entre 40'20" (soit un peu avant que le satellite aborde les côtes tunisiennes) et 41'40" (soit un peu après qu'il ait dépassé la rive Sud du Chott Djerid). Ceci fait, il ne reste plus qu'à demander une mise au format TRLI des données HRPT correspondantes².

² Cette demande ne doit pas être faite trop tardivement car les données sont régulièrement détruites, la mise en archive des bandes ne durant que quelques mois au plus.

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Direction générale :
24, rue Bayard - 75008 PARIS

Service des Publications :
70-74, route d'Aulnay - 93140 BONDY

O.R.S.T.O.M. Éditeur
Dépôt légal : 4e trim. 1981
I.S.B.N. : 2-7099-0616-3
Imp. S.S.C.