

4. Télédétection satellitaire de l'environnement des pêcheries : les outils et le traitement de données

4.1 Les satellites météorologiques

par Bernard GUILLOT
Antenne ORSTOM
Centre de météorologie spatiale de Lannion

Caractéristiques générales des satellites météorologiques

Le recours aux satellites pour les besoins de la météorologie commence avec les débuts de l'ère spatiale, et le premier vaisseau opérationnel, TIROS 1, a été mis en place il y a déjà 28 ans, le 1^{er} avril 1960; il inaugurerait une longue série d'engins qui ont assuré, depuis cette époque, un service continu.

Dès les origines également la création de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), par exemple, montre que les initiateurs des programmes avaient d'autres objectifs que météorologiques; en réalité, la multiplicité des services que l'on peut en attendre fait aujourd'hui de ces satellites un complément indispensable des satellites d'observation de la terre (du type landsat ou spot), pour l'étude de l'environnement terrestre.

Les caractéristiques essentielles des images qu'ils fournissent sont la répétitivité, et la grande extension spatiale des mesures. Les instruments qu'ils ont à bord sont en effet conçus pour que l'ensemble du globe terrestre soit surveillé de façon continue; c'est aussi pour cette raison que l'on a mis en place, au niveau mondial, une répartition des tâches, qui a conduit à créer deux types de vaisseaux spatiaux opérationnels, les satellites à défilement, et les satellites géostationnaires.

3.1. LES SATELLITES A DEFILEMENT

3.1.1. Histoire du programme

Nous décrivons ici brièvement les satellites de la série américaine Tiros, car ils présentent un certain nombre d'avantages, qui en font des instruments utilisables, à relativement peu de frais, à de multiples missions.

Les satellites en place actuellement, NOAA 9 et NOAA 10, sont les héritiers des premiers Tiros, Itos ou NOAA, et ils ont bénéficié, pour leur mise au point, des

expériences faites sur la série Nimbus, dont le dernier représentant est le satellite Nimbus 7, lancé en 1978.

On peut suivre l'histoire de ces développements sur le tableau 1 : « Satellites météorologiques de la série Tiros, NOAA ». On peut y voir :

- le caractère opérationnel de la série; prise de vue continue depuis 1960;

- les progrès dans la série; les premiers satellites n'étaient pas héliosynchrones: avec la série Itos commencent les transmissions automatiques d'images (transmission APT). Les caméras vidicon disparaissent après Itos 2 de la série ITOS-NOAA, qui inaugure au même moment le radiomètre VHRR (radiomètre à très haute résolution); les satellites actuels sont munis d'un radiomètre encore plus performant, Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR, à 4 puis 5 canaux, prévu pour permettre une correction de l'absorption atmosphérique;

- que la série expérimentale Nimbus évolue en parallèle des séries opérationnelles, pour lesquelles elle sert de banc d'essai: le radiomètre infra-rouge a été utilisé pour la première fois sur Nimbus 1 avant d'équiper la série Itos; de la même manière, il est envisagé d'employer, sur les futurs satellites Tiros, le radiomètre CZCS (Coastal Zone Colour Scanner), dont Nimbus 7 est aujourd'hui équipé, qui a été mis au point pour étudier les zones côtières, la couleur de l'eau, la pollution, les glaces, etc...

3.1.2. Les satellites actuels

L'originalité de la série actuelle tient au fait qu'il s'agit de deux satellites couplés, programmés pour une durée de vie de deux ans, et dont le remplacement est assuré à dates régulières. Le satellite expérimental Tiros N a été lancé le 13 octobre 1978; il a cessé d'être utilisé depuis le 1^{er} novembre 1980. Actuellement, fonctionnent NOAA 9, lancé le 12-8-1984, et qui fut rejoint par NOAA 10 le 17-9-1986.

TABLEAU 1

SATELLITES METEOROLOGIQUES DE LA SERIE TIROS/NOAA (renseignements obtenus à la station de Lannion, notamment auprès de J. Hamon et G. Rochard)

Tiros : télévision Infra-Red Observation Satellite
Noaa : National Oceanic and Atmospheric Administration

6.1.1. Satellites de la série Tiros

Tiros	1	01.04.1960		
	2	23.11.1960		
	3	12.07.1961		
	4	8.02.1962	Transmission	Stabilisation par spin. 130-140 kg, 48 × 107 cm;
	5	19.06.1962	d'images	Orientation fixe dans l'espace;
	6	18.09.1962	différés	non héliosynchrones
	7	19.06.1963		
	8	21.12.1963		
	9	22.01.1965		
	10	02.07.1965		

6.1.2. Satellites Itos : Improved Tiros Operational Satellites

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

6.1.3. Série expérimentale Nimbus. Satellites héliosynchrones

Nimbus	1	A	28.08.1964	DRIR (Infrarouge direct de nuit, en plus de l'APT de jour)
	2	B	15.05.1966	
	3	C	14.04.1969	
	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

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, 4 canaux
	B	29.05.1980	Echec
	C/7		Lancé le 23.06.1981, arrêt en janvier 1985; 5 canaux non lancé
	D	mai 1981	
	E/8	28/03/83	jusqu'à janvier 1986; 4 canaux
	F/9	12/12/1984	opérationnel au 19/11/1987; 5 canaux
	G/10	17/03/1986	opérationnel au 19/11/1987; 4 canaux

Ce sont des satellites héliosynchrones, placés sur des orbites quasi polaires, de telle sorte que le satellite « du matin » (NOAA 10) franchisse l'Equateur à 07h30 solaire, en orbite descendante, et le satellite « du

l'après-midi » (NOAA 9) à 15h00 solaire, en orbite ascendante, si bien que, dans les plus mauvaises conditions (aux basses latitudes), le même point de la surface terrestre soit vu au moins 4 fois par jour, à six heures d'intervalle.

Ils parcourent un peu plus de 14 orbites par jour, avec un décalage de 25° de longitude à chaque passage; leur champ de vue (trace de l'orbite) est de 2 800 km environ; un satellite qui passe au-dessus d'une antenne (de l'horizon à l'horizon) reste dans le champ de vue pendant 16 minutes; une station de réception peut capter les données dans une aire circulaire de 6 200 km de diamètre (élévation 0°), ou de 5 200 km (élévation 5°).

3.1.3. Les instruments des satellites; le radiomètre à très haute résolution (AVHRR)

Les satellites NOAA possèdent plusieurs instruments :

- la sonde infra-rouge à haute résolution (HIRS) (fig. 1) mesure le rayonnement infra-rouge (19 canaux) et visible (1 canal); la résolution géométrique (17 km au sous-point) est faible; cet instrument pourrait être utilisé pour des corrections atmosphériques des mesures plus perfectionnées réalisées par d'autres systèmes (Météosat, expérience en cours). Il a actuellement un usage spécifiquement météorologique;
- le dispositif de sondage stratosphérique (Stratospheric Sounder Unit, SSU) fournit des données sur la température de la stratosphère;
- l'unité de sondage micro-ondes (Microwave Sounder Unit, MSU) est héritée de Nimbus 6; elle mesure le rayonnement dans la bande de l'oxygène et peut, entre autres, servir à déterminer la température de l'eau sous les nuages (résolution 109 km au sous-point);
- le radiomètre à très haute résolution (AVHRR);
- le système de collecte de données (DCS), conçu par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) français, pour recevoir les données fournies par le système Argos;
- l'enregistreur de l'environnement spatial (Space Environment Monitor, SEM).

L'instrument le plus intéressant pour l'étude des phénomènes terrestres est le Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), qui mérite une étude détaillée.

Les auteurs des programmes spatiaux Tiros déclarent eux-mêmes qu'il a été conçu pour fournir des données utilisables en océanographie et en hydrologie, et pour l'étude de la neige et des glaces. Etant donné la qualité des données, il est évident qu'il peut rendre encore bien d'autres services.

Le tableau 2 : canaux du radiomètre AVHRR, donne le détail des mesures qu'il effectue, suivant le numéro des satellites dans la série; NOAA 10 a quatre canaux, et NOAA 9, cinq canaux. Le canal 1 enregistre le rayonnement dans une fenêtre assez étroite (0,58 - 0,68 µm); le spectre du canal 2 (proche infra-rouge) est

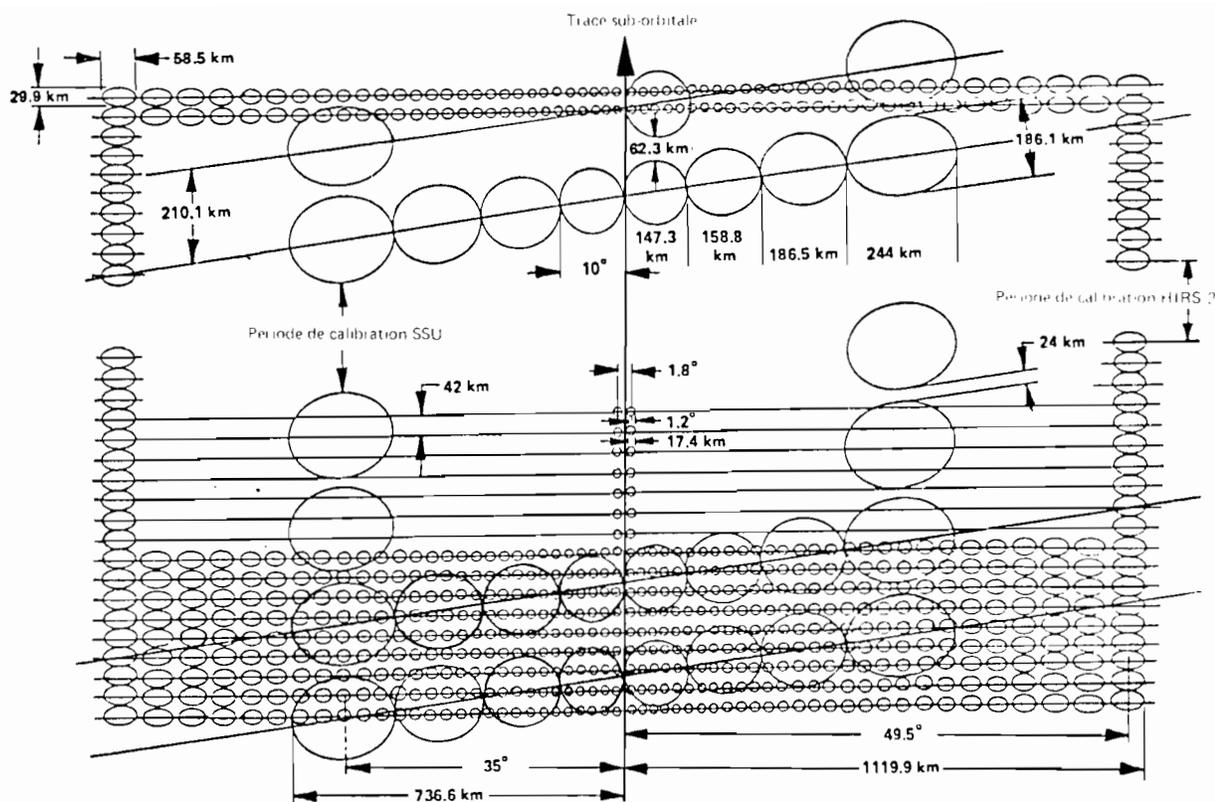


Fig. 1. Projection au sol des zones balayées par la sonde infra-rouge à haute résolution HIRS/2 et par le dispositif de sondage stratosphérique (Schwalb, 1978, fig. 10).

plus large (0,725 - 1,0 μm). Le canal 3 utilise la fenêtre à 3,7 μm ; de nuit, il enregistre la température au sol (rayonnement émis par la terre), et de jour le même rayonnement, plus une part, non négligeable, d'énergie solaire réfléchie; enfin, les canaux 4 et 5 captent, de jour comme de nuit, le rayonnement émis par la terre. Les canaux 3, 4 et 5 peuvent être utilisés, suivant diverses combinaisons, pour distinguer, dans les signaux reçus, la part prise par l'absorption atmosphérique dans l'émissivité de la terre.

3.1.4. Composition, forme et dimension des images AVHRR

Le module du radiomètre comprend :

- un dispositif de balayage, avec un moteur, et un miroir éclairant le champ de vue du télescope; le miroir tourne à 360 tours par minute, et réalise donc six lignes de balayage (ou lignes images) par seconde;

- un système optique secondaire sépare l'énergie en bandes spectrales discrètes, correspondant aux canaux du radiomètre.

Les données ainsi détectées sont chiffrées sur un processeur de bord, mises en mémoire, et lues à la cadence appropriée pour la transmission au sol.

Les canaux visibles et proche infra-rouge utilisent des détecteurs au silicium pour mesurer la radiation incidente; 99 % de cette énergie passe par eux, et le bruit est de 0,5 % albédo; les détecteurs infra-rouge sont refroidis à 105°K, avec un niveau de bruit inférieur à 0,12° K.

Chaque image AVHRR est donc constituée d'une succession de lignes, composées de points juxtaposés, et elle est construite de façon continue, par les mouvements combinés du satellite et du radiomètre; les intervalles fixes, entre les lignes, sont utilisés pour calibrer les instruments; le miroir explore en effet successivement la terre, de l'horizon à l'horizon, l'espace, l'intérieur du satellite, le vide, et la terre à nouveau le tour suivant.

Tableau 2 : canaux du radiomètre 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 6, 8 et 10
Avhrr 2 prototype	0,58-0,68	0,725-1,0	3,55-3,93	10,3-11,3	11,5-12,5	Noaa 7
Avhrr 2 série	0,58-0,68	0,725-1,0	3,55-3,93	10,3-11,3	11,5-12,5	Noaa 9

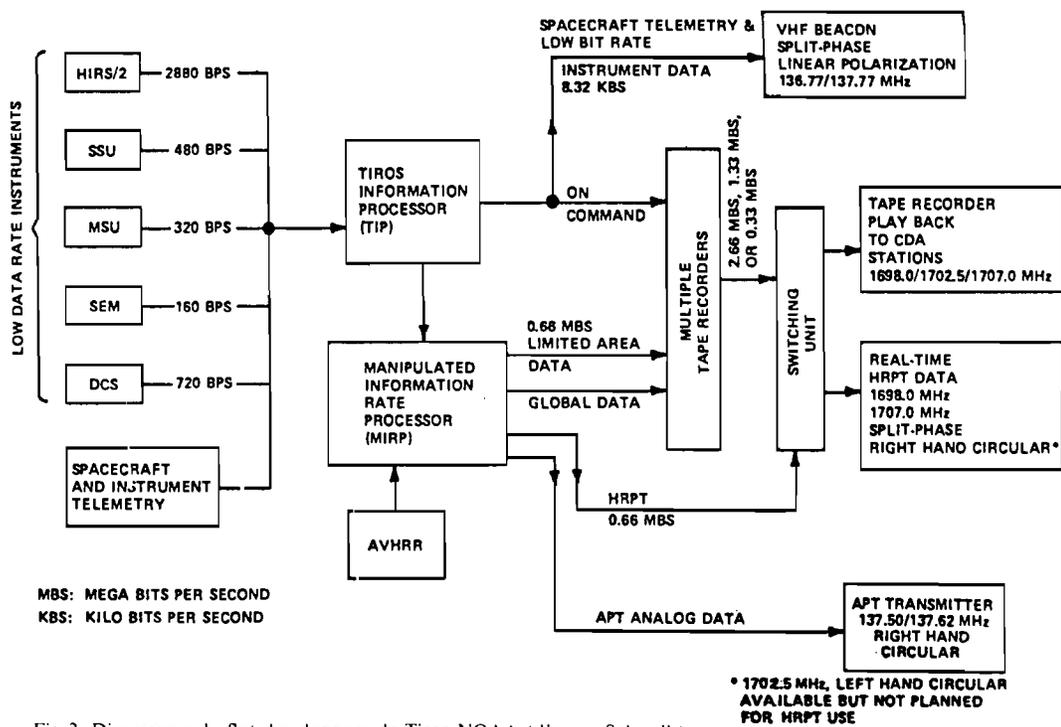


Fig 2. Diagramme du flot des données de Tiros-NOAA (d'après Schwalb).

L'altitude du satellite détermine le champ du balayage, qui comporte 2048 points; compte tenu de la résolution (1,1 km au point sous-satellite) et de la déformation subie par l'image à l'horizon, la largeur de l'image ainsi définie est de 2 800 km (1 400 km de part et d'autre du passage). La longueur de l'image varie avec la durée de la réception, qui dépend de la position de la station par rapport à l'orbite considérée; dans le meilleur des cas le champ de poursuite est de 16 minutes environ, soit 5760 lignes, et une longueur de 6 300 km environ (57° de latitude). Une image de ce type comporte 12 millions de points et 60 millions de chiffres, pour les cinq canaux.

Les mesures sont effectuées avec une très grande précision, une très haute résolution radiométrique; elles sont en effet chiffrées sur 10 bits et se trouvent ainsi réparties sur 1 024 valeurs. Les températures sont enregistrées au 1/8 de degré près, et les rayonnements visible et proche infra-rouge en 1 024 valeurs d'albédo. Ce haut niveau de précision, et la bonne calibration du radiomètre, expliquent la qualité des images ainsi obtenues.

3.1.5. La transmission des données AVHRR

Le système de transmission des données AVHRR (figure 2 : diagramme de données émises par les satellites Tiros-NOAA) livre deux sortes de produits :

- les transmissions APT (Automatic Picture Transmission) émettent des données AVHRR réduites; elles concernent deux canaux sur cinq, choisis sur commande, avec une résolution géométrique ramenée à 4 km, et une transmission en mode analogique. Ces données sont destinées en priorité à la météorologie;

les stations d'acquisition sont peu coûteuses, et il en existe un peu partout à la surface du globe (figure 3 « station APT équipées de matériel français »);

- la transmission des données à haute résolution (High Resolution Picture Transmission, HRPT) se fait par un signal à haute cadence, à raison de 66 540 mots de 10 bits par seconde; elle comprend les données AVHRR et celles des sondes à bas taux d'acquisition; les stations d'acquisition sont beaucoup plus chères et nécessitent en aval un important dispositif de gestion et de traitement des données; il en existe quelques unes (station de Mas Palomas : Canaries, agence spatiale européenne; de Sao José Dos Campos, Brésil) dans les limites de la ceinture intertropicale.

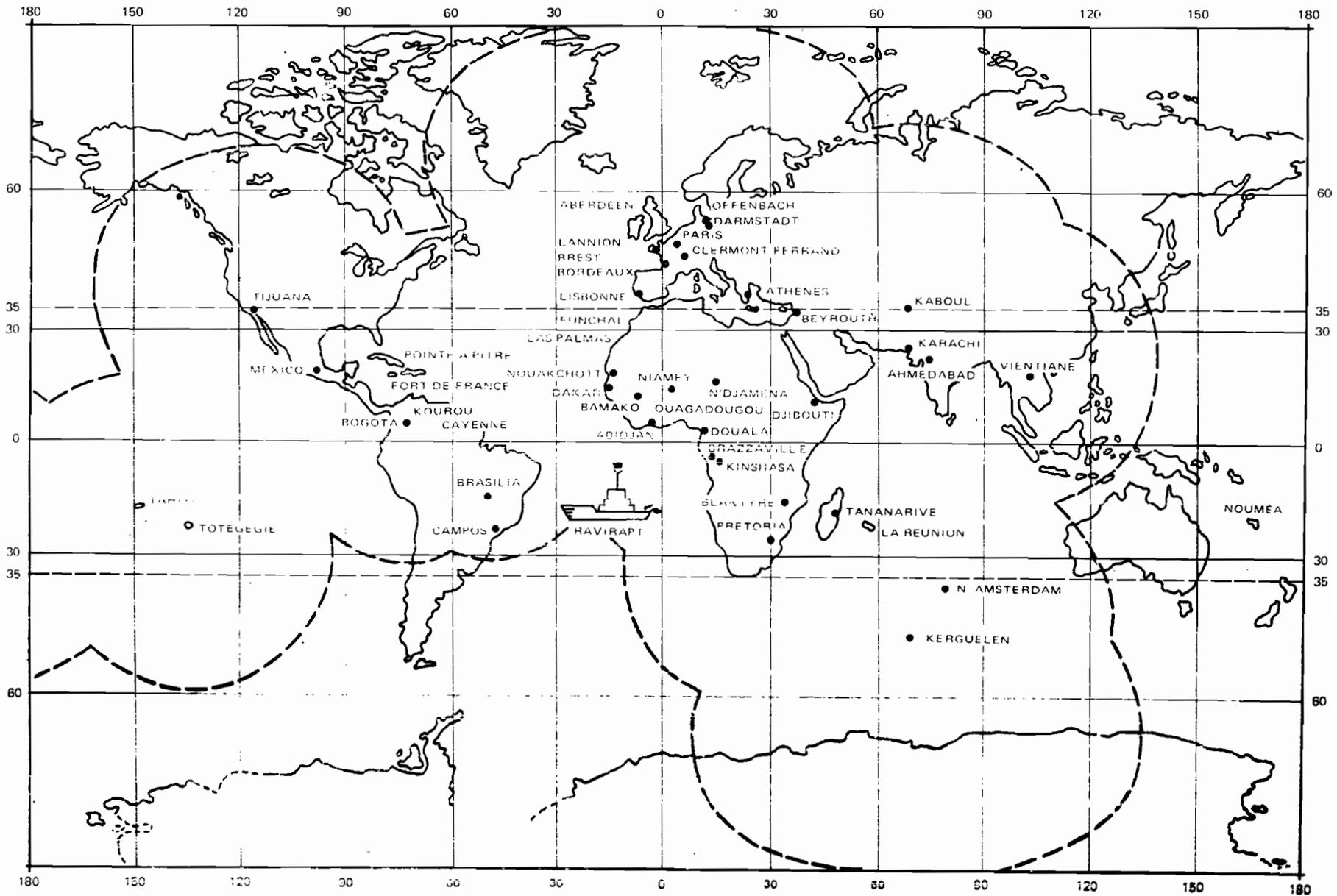
En outre les mémoires de bord du satellite enregistrent des données pour une transmission ultérieure aux centres de traitement de la NOAA. Cinq mémoires d'une capacité de $4,5 \times 10^8$ bits permettent de stocker :

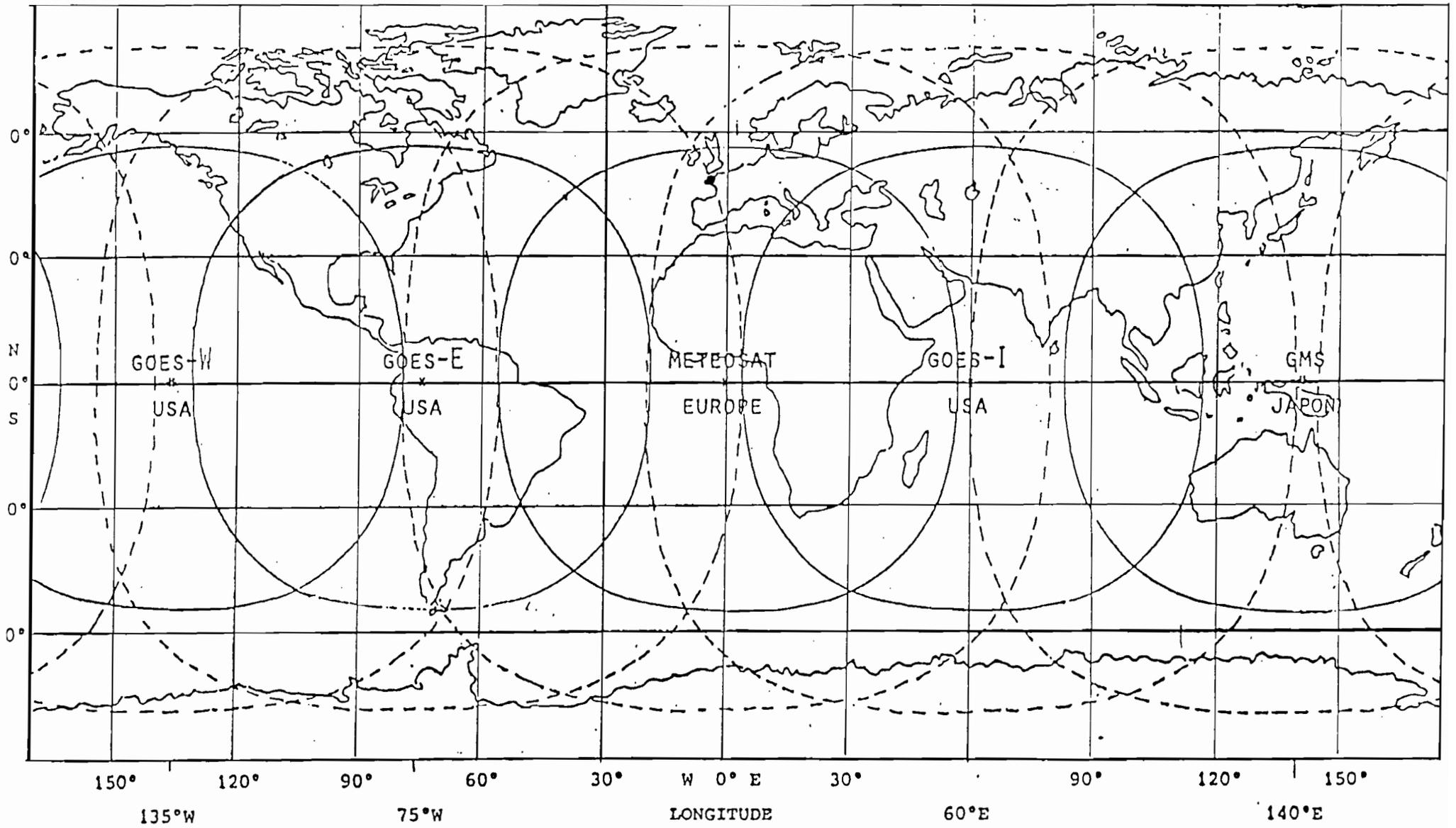
- 1 orbite complète (110 minutes) de données globales réduites (GAC);
- 10 minutes de données à haute résolution (HRPT = données LAC);
- 250 minutes de données à basse cadence d'acquisition (données TIP).

Les données AVHRR LAC (Local Area Coverage) sont enregistrées hors du champ des stations de réception, pour servir à des études. La NOAA effectue ce service à la demande, pour des institutions de recherche nationales ou étrangères.

Les données globales réduites (Global Area Coverage, 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

Fig. 3. Stations AP7 equipées de matériel français (fourni par J. Hamon).





----- limite des communications radio
—— limite des images

Fig 4. Champs d'observation des satellites geostationnaires meteorologiques.

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. La résolution est réduite à 4 km au point sub-satellite. Ces données servent, entre autres, à la constitution de cartes de température de surface de la mer (cartes GOSSTCOMP).

On peut noter, pour finir, que ces satellites émettent constamment des données, et qu'il suffit de se mettre à l'écoute pour les obtenir.

3.2. Les satellites géostationnaires

3.2.1. Généralités

Ces satellites sont complémentaires des précédents, car ils observent en priorité les basses latitudes; ils sont mis en place suivant un programme d'observation météorologique, à des emplacements convenus, dans le but d'obtenir des données, au même moment, de l'ensemble du globe (fig. 4: champ d'observation des satellites géostationnaires). Conçu pour être opérationnel, ce programme a subi d'importants retards: actuellement, les cinq sites prévus sont occupés :

- les sites à 75° W (GOES-EST), et à 135°W (GOES-WEST), sont occupés depuis plusieurs années de façon opérationnelle, par les satellites des séries américaines SMS (Synchronous Meteorological Satellite) et GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite);
- à 0° l'Agence spatiale européenne (ASE) a successivement mis en place Météosat 1, Météosat 2, et Météosat P2;
- le Japon a placé, à 140° Est, GMS 1 et GMS 2;
- un satellite américain (GOES 3) a été placé en 1979 à 60° Est, pendant l'année du GARP (Global Atmosphere Research Programme); ensuite, le site a été inoccupé, mais ce vide a été comblé par un satellite indien (INSAT) en août 1983, dont les informations ne peuvent être reçues qu'à la station de Hyderabad.

On peut regretter un manque de coordination entre les programmes, qu'ils soient Américain, Européen, Indien ou Japonais; les résolutions géométriques varient de l'un à l'autre d'un km au sous-point (SMS et GOES) à 1,5 km (GMS) et 2,5 km (Météosat) pour les canaux visibles; de 8 × 4 km (SMS, GOES) à 5 km (GMS et Météosat) dans l'infrarouge.

Ces satellites sont placés à environ 36 000 km de la surface de la terre, sur des orbites presque circulaires situées dans le plan de l'Equateur; ils parcourent, dans le sens de rotation de la terre, une orbite complète en 24 heures, et ils apparaissent donc comme immobiles par rapport à la terre; ils « voient » la terre à l'intérieur d'un cône de 17° d'angle au sommet, et le système de projection qui en découle donne des images de plus en plus déformées lorsque l'on se déplace du point sous satellite vers l'horizon. Chaque satellite prend une image toutes les 1/2 heures du globe terrestre.

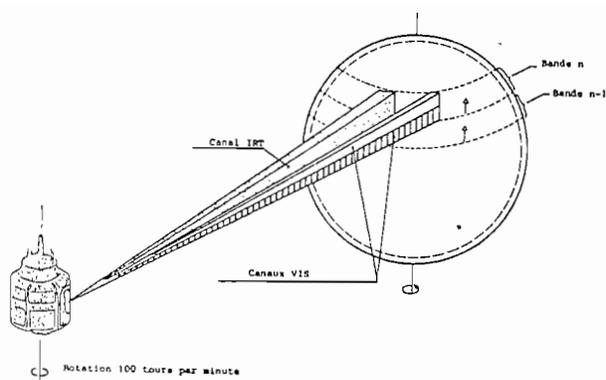


Fig. 5. Représentation schématique des champs instantanés de vue du radiomètre.

3.2.2. Le satellite Météosat

Il comporte trois canaux différents :

- le canal visible (VIS) mesure l'énergie solaire réfléchie, entre 0,4 et 1,1 μm ;
- le canal vapeur d'eau (VDE) capte le rayonnement émis par la couche la plus haute de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère (longueur d'onde comprise entre 5,7 et 7,1 μm);
- le canal infra-rouge thermique (IRT) enregistre l'énergie émise par la surface terrestre, entre 10 et 12,5 μm .

Les images sont constituées de pixels de 5 km de côté (infra-rouge et vapeur d'eau), et de 2,5 km (visible) au point sous satellite; le canal visible est constitué de deux récepteurs évoluant en parallèle (fig. 5: représentation schématique des champs instantanés de vue du radiomètre). Les images comprennent 5 000 lignes de 5 000 points (vis), ou 2 500 lignes de 2 500 points (infra-rouge et vapeur d'eau).

Les données sont transmises en permanence au sol; elles sont reçues à la station de Darmstadt (RFA), gérée par l'Agence Spatiale Européenne, qui effectue des traitements avant dissémination; la station du Centre de Météorologie Spatiale de Lannion (CMS) reçoit à son tour ces données disséminées.

3.2.3. Le satellite GOES EST

Composante orientale du programme américain, ce site se trouve à 75°W, presque à l'aplomb du point frontière triple séparant la Colombie, le Pérou et l'Equateur, entre les rios Caqueta et Putumayo. Cette situation en fait un observatoire privilégié pour le continent sud-américain dans son ensemble.

Plusieurs satellites se sont succédés à cet emplacement, assurant un service continu, de 1974 à 1984. Le premier, SMS 1, fut lancé le 17 mai 1974; il fut ensuite relayé par les GOES, par SMS 2, et, depuis 1981, par GOES 5 (1). Les images sont reçues à Lannion depuis les origines; la station a conservé jusqu'au 1-1-1986 une série continue d'archives photographiques, sur films à très grande précision, impressionnés à l'aide du Vizir, instrument qui transforme les données numériques en

64 niveaux de gris. Le radiomètre SMS ou GOES prend toutes les 1/2 heures des images du globe dans deux canaux :

- un canal infra-rouge « thermique » (10,5-12,5 μm), dont la résolution géométrique, au point sous satellite, est de 8×4 km (points rectangulaires de 8 km de long dans les lignes, et de 4 km de large le long de la ligne);
- un canal « visible », qui capte le rayonnement dans un spectre relativement étroit (0,55-0,75 μm), dont la résolution radiométrique est faible (valeurs d'albédo réparties en 64 comptes), mais dont la résolution géométrique est exceptionnelle à ce niveau (un kilomètre au sous point). Ce canal visible est en fait constitué de huit récepteurs disposés en parallèle; ceci introduit une certaine disparité dans les données, car aucun de ces récepteurs n'a la même courbe de sensibilité, d'où la création d'un lignage assez marqué sur les images.

La station de Lannion reçoit toutes les six heures (0 h, 6 h 00, 12 h 00, 18 h 00) une image IR et VIS, qui est reformatée et réémise ensuite sur Météosat, à l'attention des usagers de ce satellite. Cette fonction « relais » est assurée pour le compte de l'Agence Spatiale Européenne.

3.2.4. Champ d'application des données

Les satellites géostationnaires utilisés avec des méthodes appropriées constituent de précieux observatoires pour de nombreuses applications autres que météorologiques. En climatologie, ils rendent possible la constitution de cartes d'ensoleillement (ou de nébulosité), de vents, des zones convectives, des déplacements saisonniers des grandes cellules atmosphériques, etc; en

océanographie, ils peuvent être utilisés pour la cartographie des masses d'eau, des fronts thermiques et à des opérations d'aide à la pêche; en hydrologie, ils devraient rendre de très appréciable services de prévision et de surveillance des variations saisonnières des zones d'inondation et des crues des grands fleuves, des lacs temporaires, et même, avec l'aide des mesures au sol, d'estimation des débits; en agrométéorologie, les données thermiques, et visible (étude du gisement solaire à échelle fine, par exemple) devraient beaucoup faire progresser la connaissance du milieu physique.

3.2.5. Calibration des satellites

Dans le cadre du projet ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project), il a été prévu une collecte de données des satellites, et leur intercalibration. Les centres de traitement de secteur (SPC), affectés à chacun des satellites, envoient au centre d'étalonnage (SCC : Satellite Calibration Center) de Lannion des portions d'images sélectionnées. Le centre d'étalonnage est chargé de calculer les paramètres de normalisation intersatellites, par rapport à un étalon qui est constitué par des images, prises au même moment, par les satellites à défilement NOAA. Ces renseignements sont ensuite exploités par le centre mondial de traitement (GPC : Global Processing Center), pour produire un ensemble de radiances normalisées et étalonnées.

En ce qui concerne Météosat, les formats disséminés par l'Agence Spatiale Européenne contiennent des paramètres de calibration, qui permettent un étalonnage satisfaisant des données infra-rouge.

(1) La série a été interrompue du 29 juillet 1984 au 25 mars 1987, date de l'entrée en fonctions de GOES 7.