

"CLUB DU TEMPS LIBRE"

Mardi 12 Octobre 1982

Observation de la Terre par satellites

Devant 120 personnes, Monsieur BRACHET, président directeur général de la société SPOT-IMAGE, a fait un exposé très clair et fort bien illustré par des diapositives sur l'observation de la Terre par les satellites artificiels.

La Terre est un vaisseau spatial très particulier, qui décrit une orbite autour du Soleil, Terre que nous montre une magnifique photographie prise par Apollo en 1968.

C'est vers la fin des années 60 avec essentiellement les missions Gemini, puis Apollo, que des premières photographies, de très grande finesse, ont été obtenues de la surface terrestre. Les scientifiques examinant les clichés ramenés sur Terre par les astronautes ont pu en distinguer toute la richesse et ont proposé qu'une observation plus systématique de la Terre soit réalisée à partir de l'espace.

Elle eut tout d'abord pour objet d'observer la couverture nuageuse qui est considérable.

Un examen des premiers résultats laissait espérer qu'une observation plus systématique permettrait de mieux connaître notre planète, de mieux la gérer, de mieux en exploiter les ressources ; un outil tout à fait nouveau a été mis progressivement à la disposition des responsables de services météorologiques, de la découverte des gisements de pétrole et des ressources minières ; puis des responsables des exploitations agricoles et forestières, des explorations des ressources océaniques ...

I.- SATELLITES METEOROLOGIQUES.-

Le satellite Météosat (fig. 1), lancé le 22 novembre 1977 pour le modèle n°1 et en juin 1979 pour le modèle n°2, a été réalisé pour l'Agence Spatiale Européenne par le consortium Cosmos sous maîtrise d'oeuvre de l'Aérospatiale.

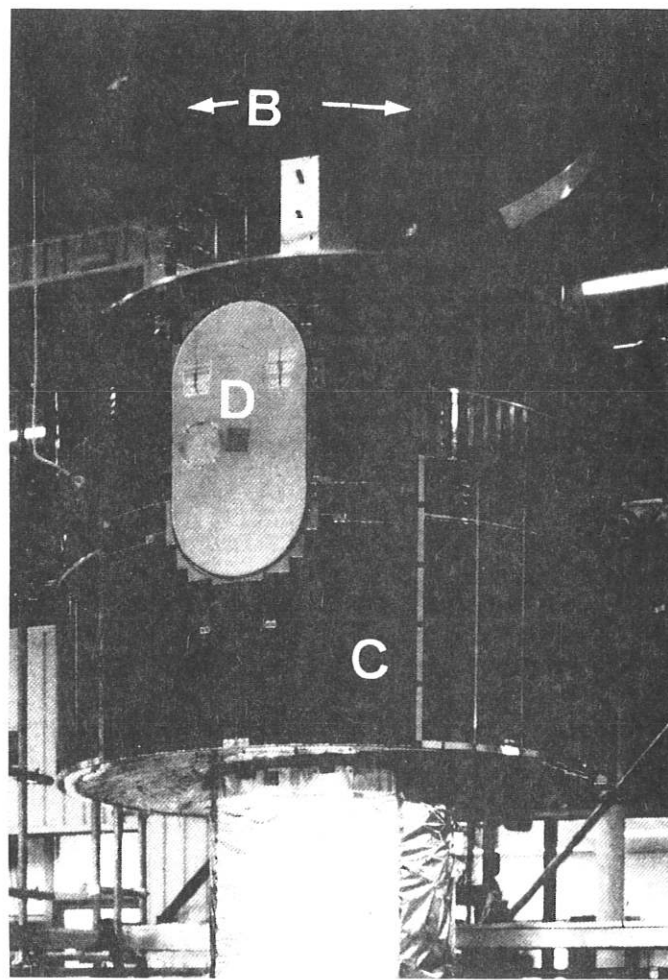


Fig. 1.- Météosat. B : Antenne VHF
C : Panneaux solaires
D : Ouverture du radiomètre

C'est un ensemble de corps cylindriques concentriques ayant une longueur hors tout de 3,2m. Le cylindre principal a un diamètre de 2,1m et contient la plupart des sous-systèmes du satellite ainsi que la principale partie de sa charge utile, c'est à dire le radiomètre.

Les radiomètres ont pour rôle de mesurer la puissance d'un rayonnement électromagnétique, soit le rayonnement incident, soit par comparaison avec un rayonnement "calibré" ce qui en donne alors une valeur absolue.

Il est placé en orbite géostationnaire (fig. 2) c'est à dire à 36000 km d'altitude et tourne sur lui-même à 100 tours par minute.

La figure 2 bis donne la trajectoire d'un second type d'orbite : l'orbite polaire héliosynchrone.

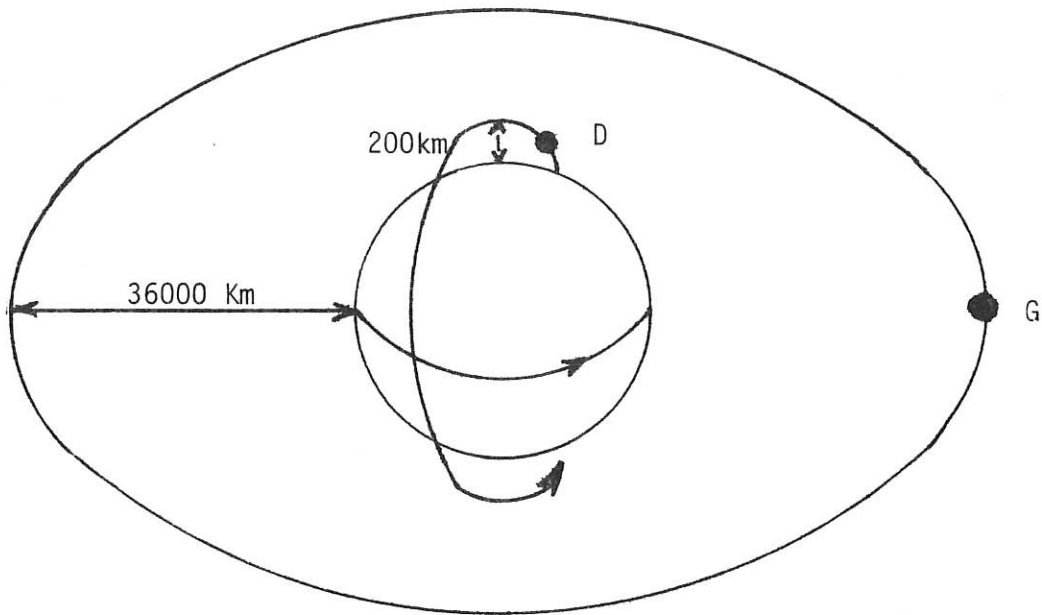


Fig. 2.- Satellite géostationnaire G et satellite à défilement D

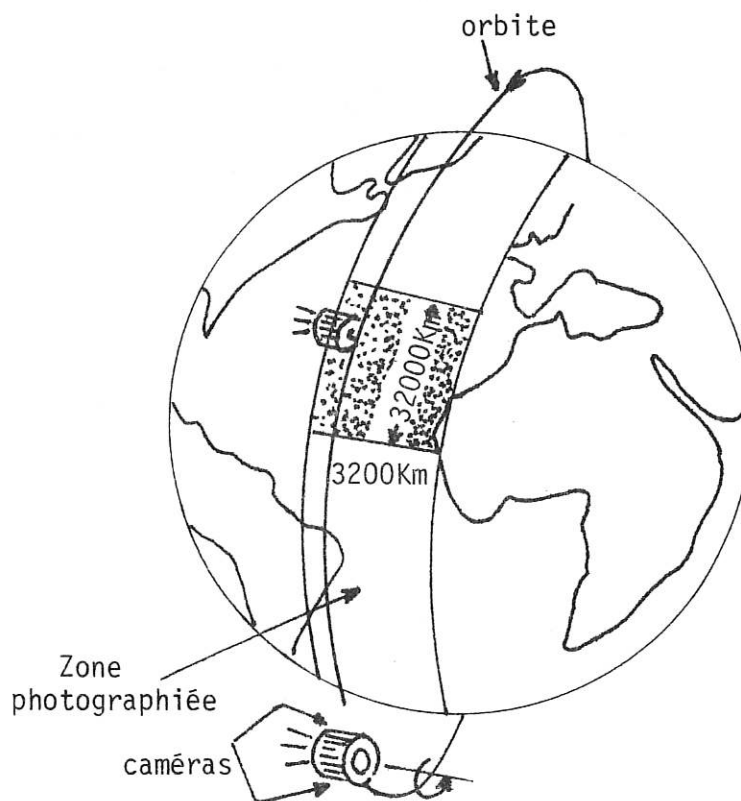


Fig. 2 bis.- Satellite météorologique polaire héliosynchrone.

Au cours de sa rotation, une caméra embarquée, appelée encore radiomètre, analyse ligne par ligne le disque terrestre vu d'un point de longitude 0° Est c'est-à-dire sur le méridien de Greenwich et sur l'Equateur.

Il existe tout un réseau de satellites de cette catégorie (satellites géostationnaires).

Il comprend :

- 2 satellites américains GOES, l'un placé au dessus de l'Océan Pacifique GOES W et l'autre au dessus de l'Amérique latine (GOES E).
- 1 satellite européen Météosat,
- 1 satellite japonais GMS sur l'Océan Pacifique occidental,
- Le satellite russe GOMS n'est pas encore en poste.

Chacun de ces satellites permet de couvrir un certain secteur de la surface terrestre (à peu près 90° de longitude, 155° Nord à 55° Sud en latitude) (fig. 3).

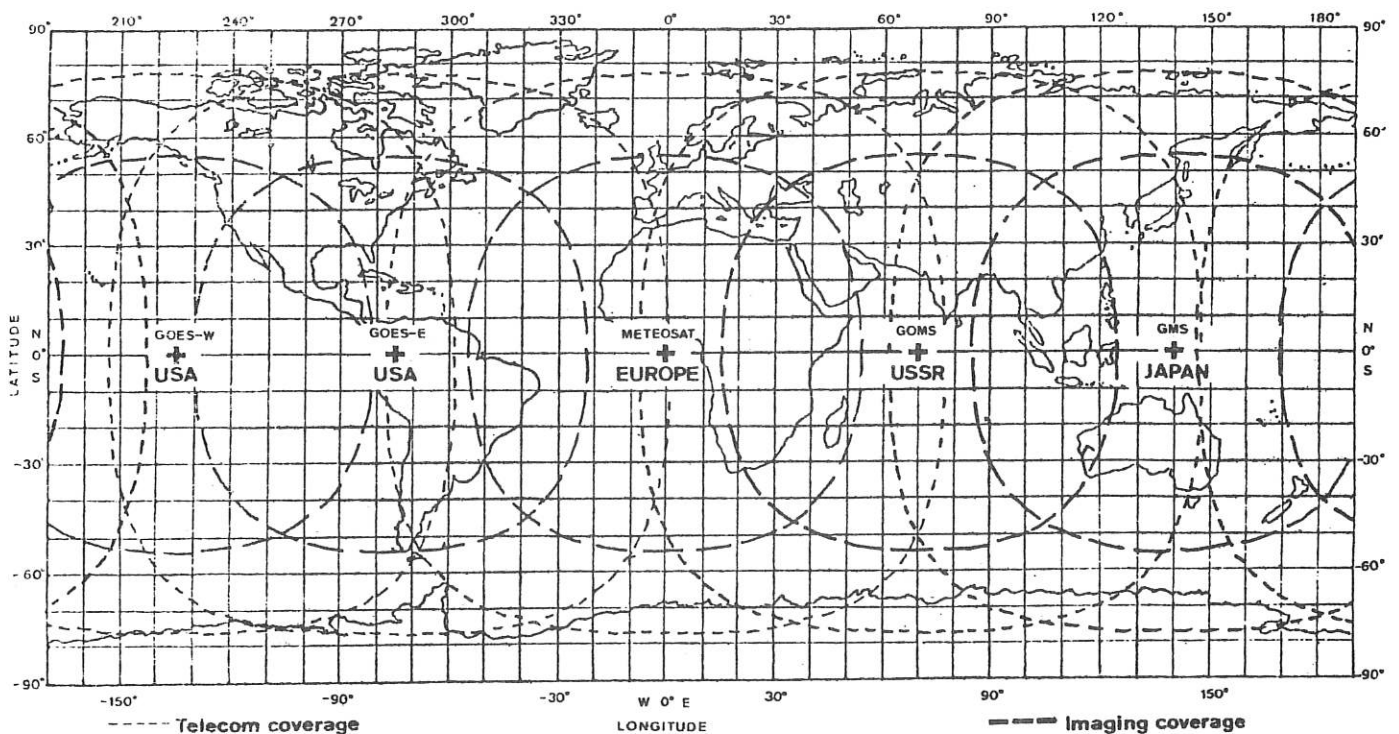


Fig. 3.- Couverture des satellites météorologiques géostationnaires participant à l'expérience FGGE.

Les stations de réception et les aires de visibilité des satellites.

Avec des appareils de télédétection comme ceux de Météosat, le seul signal que l'on puisse recevoir d'une zone visée est un rayonnement électromagnétique. Toutefois, le spectre électromagnétique couvre une large gamme de longueurs d'onde allant des rayons X très courts jusqu'aux grandes longueurs d'onde des fréquences extra-basses, même si seule une petite partie de l'ensemble du spectre présente un intérêt pour la météorologie. Le choix des longueurs d'onde que l'on captera dans cette partie du spectre est déterminé par le comportement de l'atmosphère dans les diverses bandes du rayonnement électromagnétique.

a.- Image dans le visible (fig. 4).

On estime à environ 40% la réflectivité moyenne de "albedo" du système terre-atmosphère. Ceci veut dire que 4/10 environ du rayonnement solaire incident sont renvoyés vers l'espace, sans modification de la longueur d'onde, par réflexion sur la surface du globe, sur les nuages et, dans une moindre mesure, par rétrodiffusion de la part des constituants de l'atmosphère.

La surface terrestre est normalement un mauvais réflecteur, surtout s'il s'agit d'une étendue d'eau.

La plupart des nuages sont au contraire de bons réflecteurs d'énergie rayonnante.

La réflectivité d'un nuage dépend surtout de son épaisseur, mais aussi, dans une certaine mesure, de la nature des particules qui le constituent (eau ou glace) et de leurs dimensions.

En météorologie appliquée, la détermination quantitative de l'albedo a peu d'intérêt, tandis que le contraste est important pour la définition de la forme des objets et en particulier des nuages.

b.- Image dans l'infrarouge thermique (IR) (Fig. 5).

Le rayonnement terrestre, appelé rayonnement infrarouge par abus de langage, est émis par la Terre et son atmosphère dans la gamme de températures de 200 à 300°K. Ce rayonnement est tout entier contenu dans une bande spectrale allant de 3 à 100 μm environ, mais son intensité maximale se situe à environ 10 μm ce qui correspond à une température planétaire moyenne de 250 K.

Une image I.R. est une carte thermique de la surface de la Terre et du sommet des nuages, sur laquelle les faibles radiances correspondent aux basses températures. Pour faciliter la comparaison avec une lumière visible, les valeurs de radiance sont inversées, de sorte que les températures les plus froides apparaissent

K = kelwin = température en degré Celsius + 273°

μm = 10^{-6} m = 0,000001 m.

radiance = quotient du flux lumineux que rayonne une surface par son aire.



Fig. 4.- Exemple d'image dans le visible. Image type en lumière visible prise en milieu de journée aux alentours de l'équinoxe d'automne, avec un bon éclairage de tout le disque terrestre. Les étendues d'eau et les zones de végétation font ressortir en raison de leur faible coefficient de réflexion les différentes teintes de gris et de blanc des nuages.

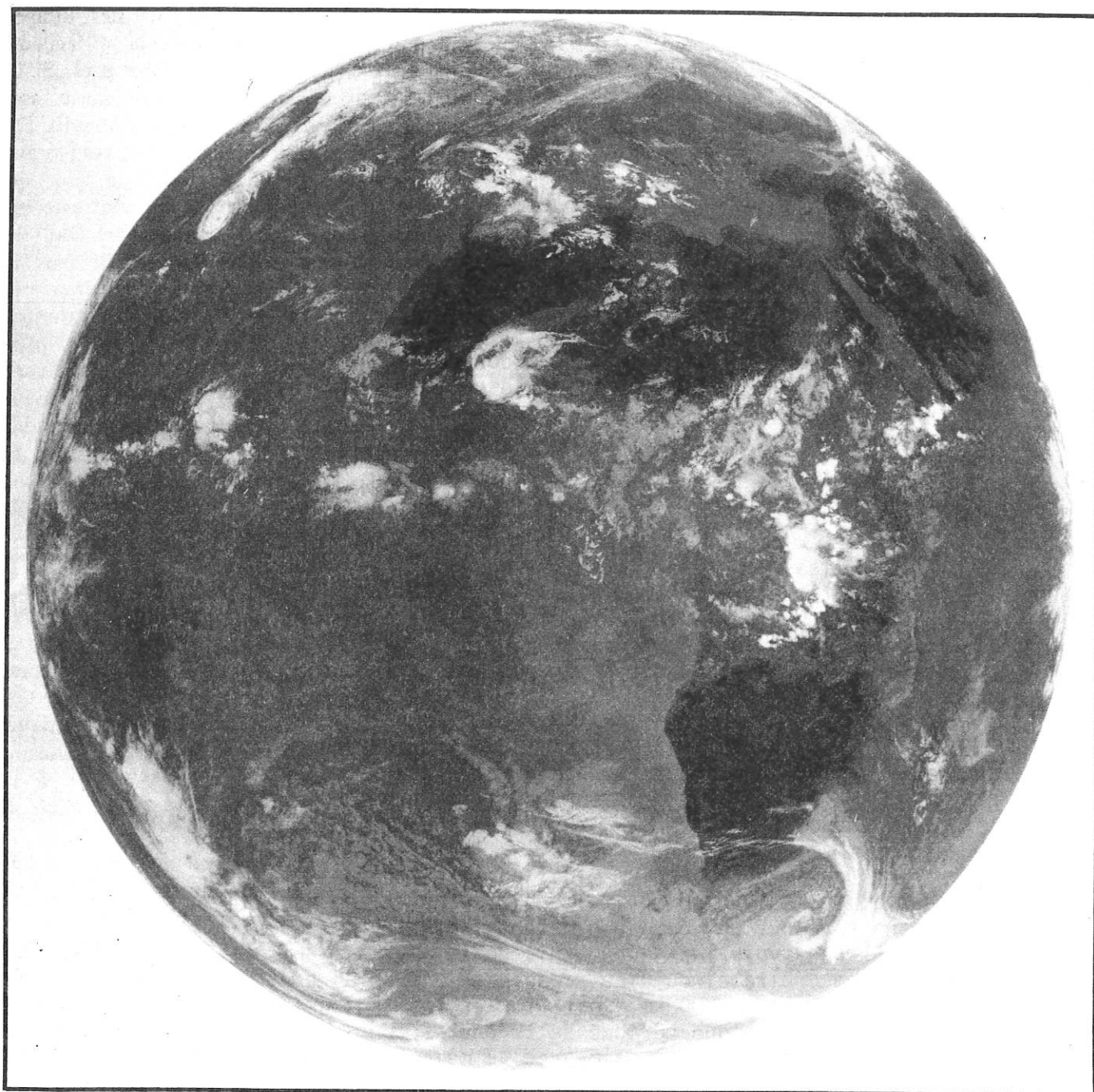


Fig. 5.- Image prise dans l'infra-rouge. Cette figure est l'illustration d'un régime de courants de forte amplitude au-dessus de l'Europe. Les vents maximum à 200 mb sont fléchés sur l'image IR. La bande nuageuse quasi-sinusoidale bien distincte (QSB) qui s'étend de 25°N à plus de 65°N est caractéristique de cette configuration de courants.

en blanc et les plus chaudes en sombre.

Les variations de température qui surviennent naturellement entre le jour et la nuit et selon les changements de saison et de latitude influenceront sur l'aspect global des images IR.

c.- Bande d'absorption de la vapeur d'eau (fig. 6) (6 à 7μ m).

L'imagerie dans le visible et l'infrarouge thermique utilisent des bandes du spectre dans lesquelles l'atmosphère est relativement transparente. Inversement on peut tirer parti de l'une des nombreuses régions d'absorption qui résultent des caractéristiques d'absorptivité des gaz constituant l'atmosphère. Or, les intervalles du spectre dans lesquels le rayonnement terrestre est absorbé par la vapeur d'eau atmosphérique présentent un intérêt particulier pour les météorologistes.

Les images sont disponibles jour et nuit toutes les demi-heures.

Elles permettent de mettre en évidence certains phénomènes non météorologiques, par exemple d'établir une cartographie de la température de la surface de la mer surtout en Atlantique, le long des côtes de l'Afrique et dans le golfe de Guinée qui est expédiée aux pêcheurs français qui pêchent le thon dans cette région.

Les figures 7 et 8 sont l'illustration d'un régime de courants de forte amplitude au dessus de l'Europe.

Les vents maximaux à 200 ms sont fléchés sur l'image IR.

Deux types d'orbites sont particulièrement adaptés à l'observation météorologique : l'orbite équatoriale géostationnaire que nous venons de voir avec Météosat et l'orbite quasi-polaire héliosynchrone (voir la figure 2 bis de la page 3). Un satellite placé sur un orbite circulaire rigoureusement polaire et d'altitude au moins égale à 1000 km "voit" toutes les régions du globe au moins une fois à chaque période de 12 heures. Un seul satellite permet alors l'observation globale avec le même instrument transporté d'un point à l'autre dans un temps très bref. Les observations en différents lieux géographiques ne sont pas simultanées et la couverture globale n'est obtenue que comme un assemblage d'observations partielles réparties dans un intervalle de temps relativement long, ce qui complique notablement l'interprétation et le raccordement aux observations météorologiques conventionnelles effectuées à heures fixes. Pour des raisons opérationnelles, les satellites météorologiques polaires passent à une heure locale (solaire), constante, ce qu'on obtient en choisissant une inclinaison non pas exactement polaire (90°) mais légèrement rétrograde ($101^\circ 7'$) pour laquelle la rotation du plan de l'orbite autour de l'axe de la Terre est égale à la rotation de la direction du Soleil, soit 1° par jour environ.

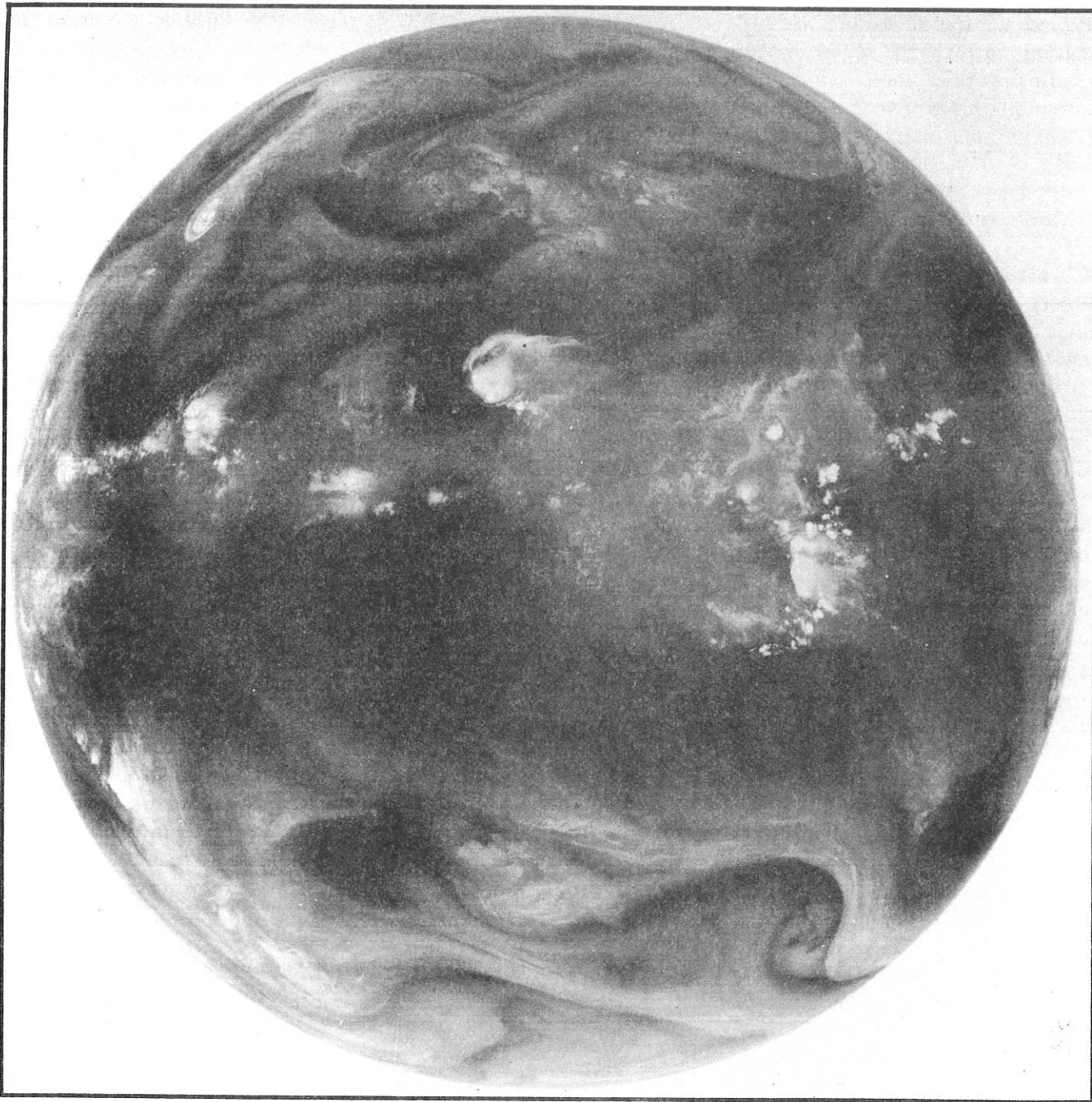


Fig. 6.- Exemple d'image dans la bande d'absorption de la vapeur d'eau.

Il s'agit d'une image IR prise dans la bande des $6\mu\text{m}$ (vapeur d'eau). Les zones plus claires correspondent à de faibles températures de rayonnement coïncidant avec des régions très humides, les parties sombres dénotant une atmosphère moins humide. D'une manière générale, cette image traduit le taux d'humidité dans les couches moyennes et supérieures de la troposphère.



Fig. 7.- Infra-rouge.

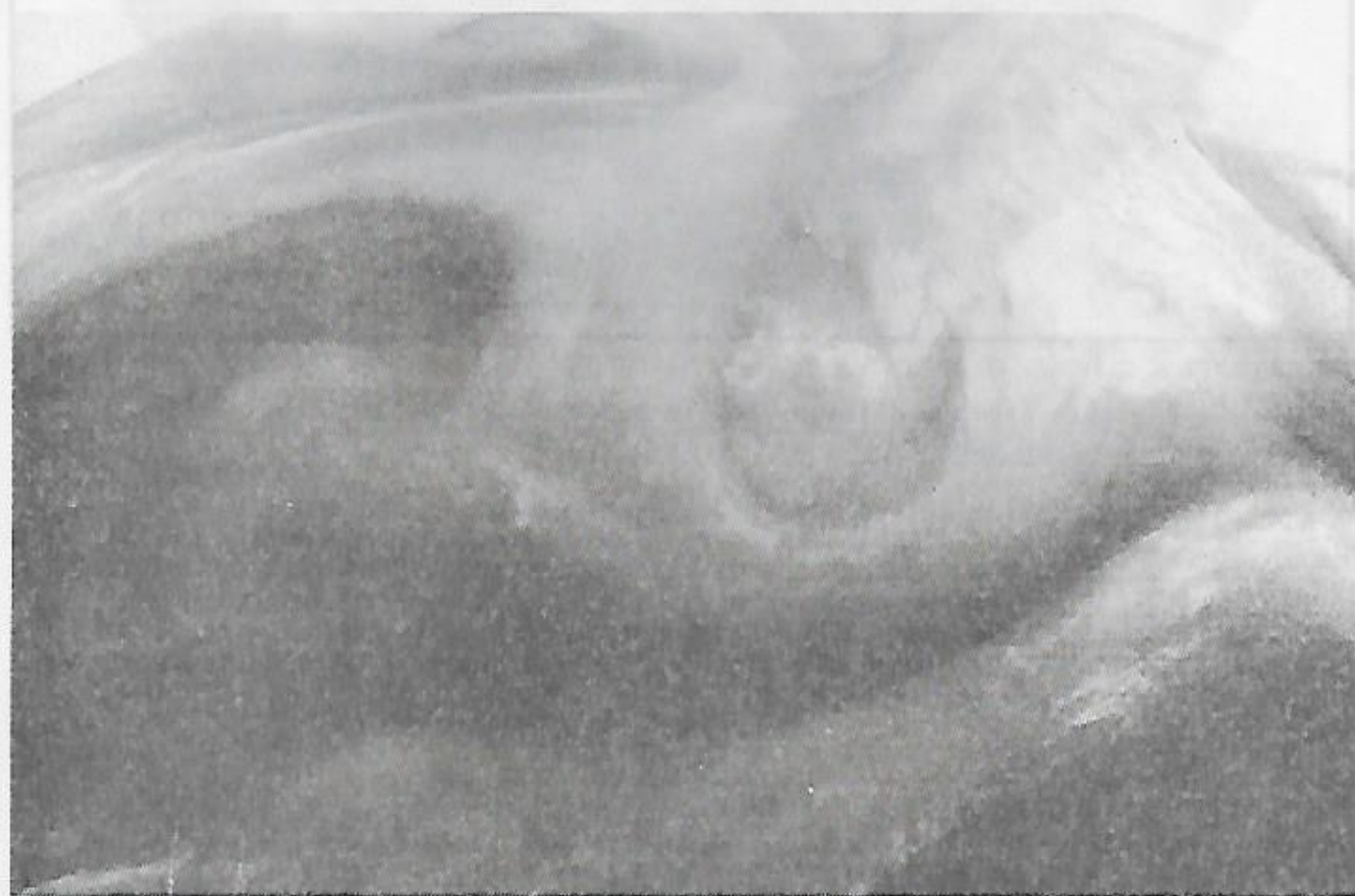


Fig. 8.- Visible.

Nous avons vu sur les diapositives deux exemples de cartographies thermiques obtenues à partir de satellites météorologiques basse altitude, l'une sur la Corse avec une échelle de température apparente variant entre 19° et 39°C. On constate que la mer est dans la zone des 20 à 25° avec des variations, et que la Terre varie de 30 à 37°.

L'examen systématique de ce genre d'images effectué dans l'infrarouge permet d'analyser des phénomènes de type végétation, activité industrielle, humaine ... (voir fig. 15 à la dernière page du compte-rendu).

2.- SATELLITES DE TELEDETECTION.

Ce sont des satellites d'observation qui fournissent des images de la surface terrestre beaucoup plus fines que les satellites précédents.

Le figure 9 nous montre un schéma du satellite américain Landsat.

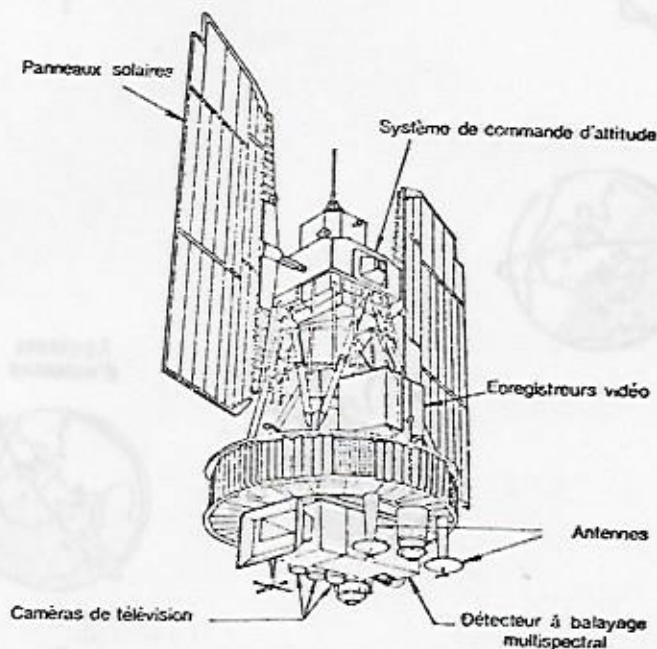


Fig. 9.-

Satellite Erts-Landsat.

Ces satellites sont placés sur des orbites quasi-polaires héliosynchrones (fig. 10).

Ils balayent une zone de terrain qui mesure dans le cas des satellites Landsat 85 km de large.

Ils observent essentiellement dans le domaine du visible avec une assez grande finesse d'analyse. Ils ne se contentent pas de prendre une image noir et blanc, mais ils utilisent plusieurs canaux de longueur d'onde ce qui permet ensuite de reconstituer une image couleur (fausses couleurs).

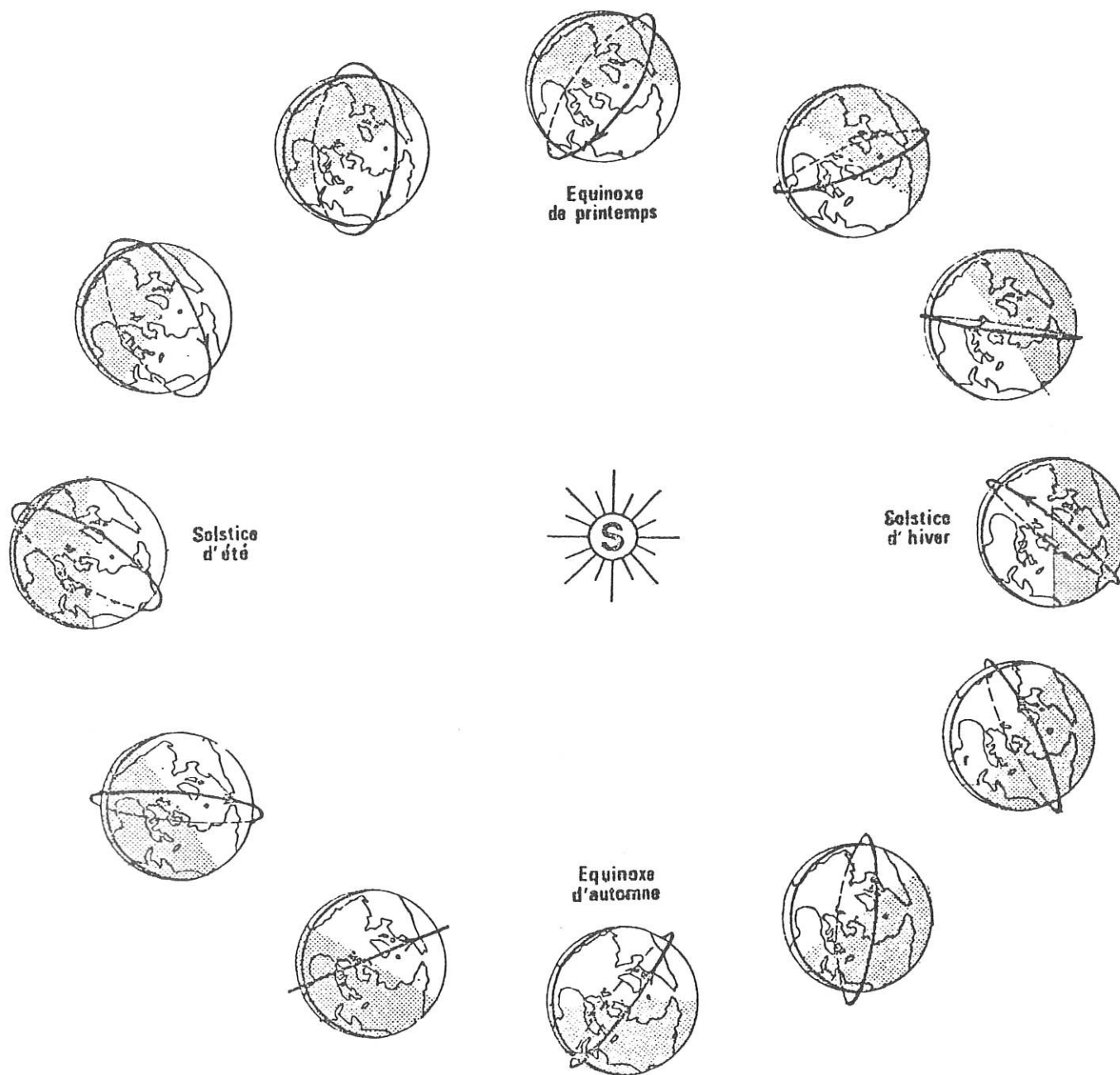


Fig. 10.- L'orbite héliosynchrone du satellite et sa précession.
 (dans le plan de l'écliptique)

L'angle formé par le plan de l'orbite et la direction Terre-Soleil demeure constant au cours de l'année ; le satellite passe donc aux mêmes heures locales au-dessus des mêmes régions de la surface de la Terre.

De telles images sont utilisées par de nombreux spécialistes dont par exemple ceux chargés de l'étude du littoral, qui analysent son évolution, l'effet des transports de sédiments, la pollution des rivières, le contenu en eau des sols ... (services du Ministère de l'agriculture, agences financières de bassins, services de cartographie ...).

Elles servent aussi pour de la cartographie classique.

Il nous a été projeté au cours de la conférence une diapositive représentant la région parisienne au 125/1000è.

Cependant, les performances du satellite Landsat restent souvent insuffisantes pour de nombreuses applications, notamment en France où la taille du parcellaire est trop petite par rapport à la finesse de l'analyse par ce satellite.

Aussi le CNES se proposa de mettre en place un système d'observation de la terre : SPOT (satellite pour l'observation de la Terre) (fig. 11).

L'instrument de prise de vues est conçu pour fournir des images de deux types :

- soit des images noir et blanc (une seule bande spectrale de 0,51 à 0,73 dite panchromatique) avec une résolution très fine : 10m,
- soit des images en couleurs (trois bandes spectrales de 0,50 à 0,59 m, de 0,61 à 0,68 m et de 0,79 à 0,89 m) avec une résolution de 20m.

Cet instrument appelé H.R.V. (à Haute Résolution dans le Visible) fait appel à une technologie nouvelle : les CCD.

Contrairement aux instruments du satellite Landsat qui balayaient le paysage ligne par ligne à l'aide d'un miroir qui oscille très vite et réfléchit les rayonnements vers un petit nombre de cellules détectrices, l'instrument H.R.V. analyse d'un seul coup toute une ligne grâce aux 6000 détecteurs alignés en barrettes (pour chacune des bandes spectrales. Ils permettent de couvrir 60 km en visée verticale) (fig. 12 - 13).

L'instrument H.R.V. sera orientable latéralement, ce qui permettra de viser des points précis à surveiller très fréquemment. Il y aura deux instruments H.R.V. identiques sur le satellite afin d'augmenter la surface étudiée à un instant donné et mieux profiter des possibilités de pointage de chacun des instruments.

En tenant compte de ces nouveautés technologiques, l'orbite choisie est une orbite héliosynchrone (telle que le satellite repasse toujours à la même heure solaire au-dessus du même paysage), presque circulaire, située à environ 825km d'altitude et qui permet de couvrir l'ensemble du globe, en 26 jours correspondant à 369 révolutions. (fig. 14).

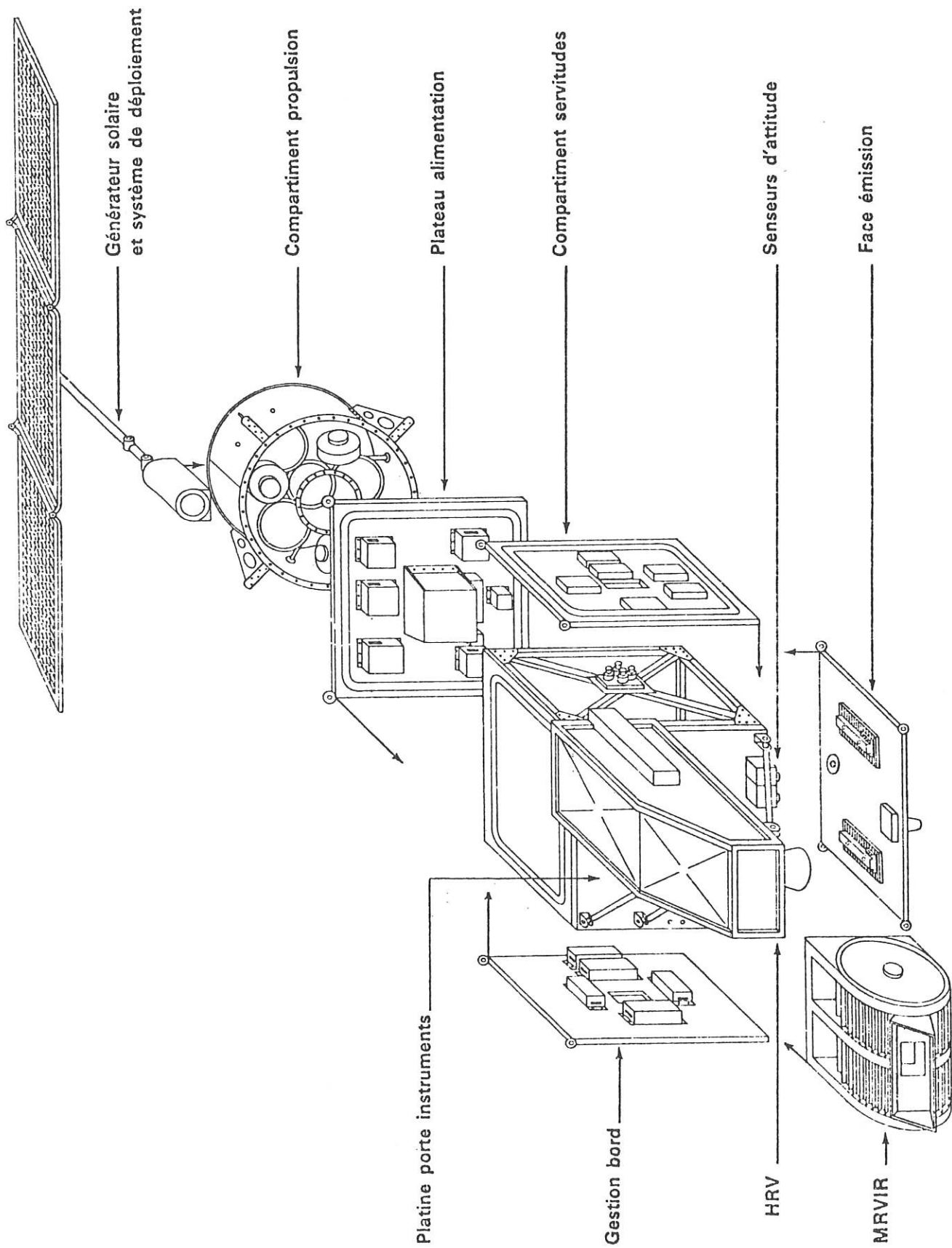
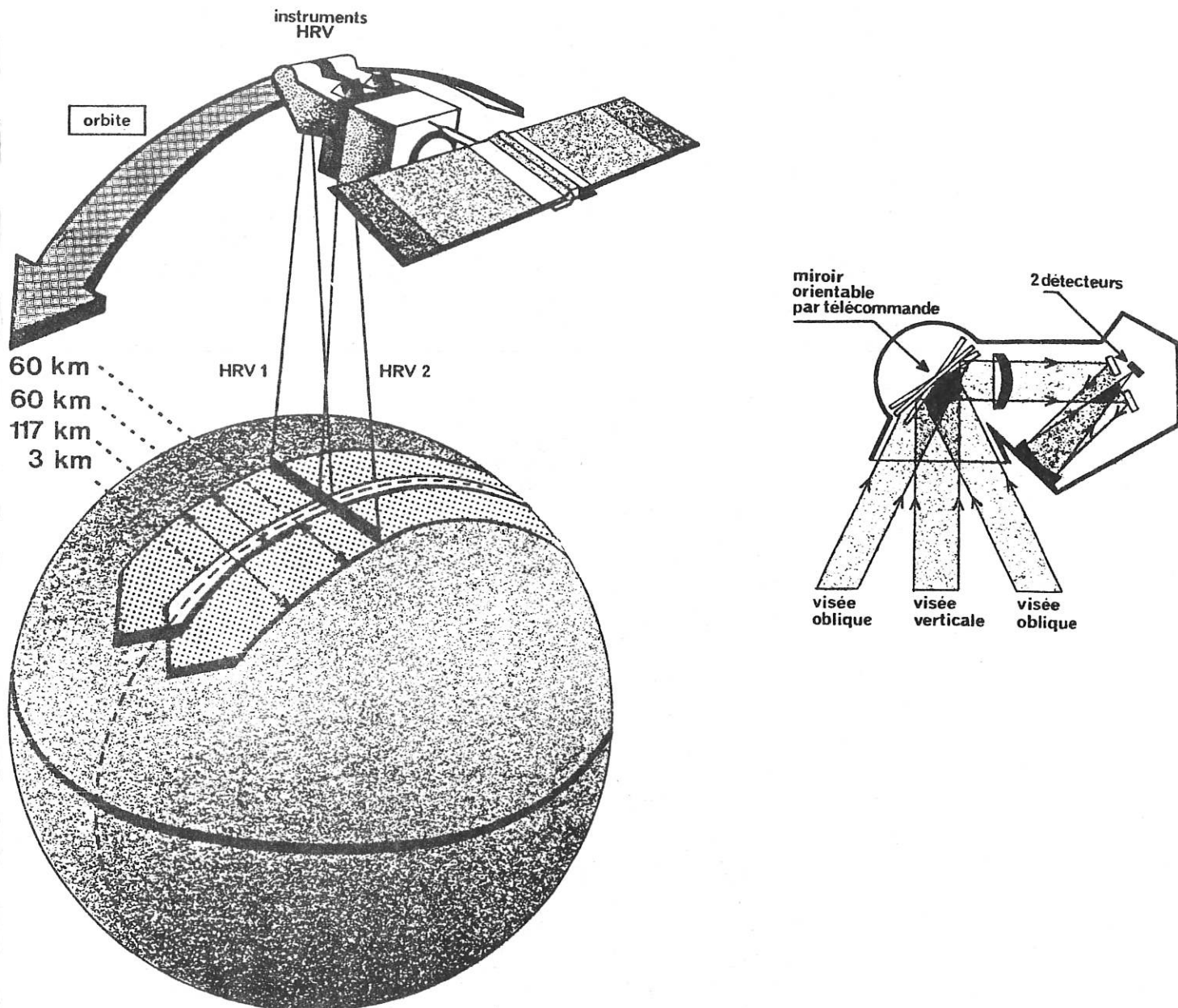


Fig. 11.- Satellite SPOT
(un seul HRV a été représenté)



Caractéristiques de l'instrument HRV	Mode multibande	Mode panchromatique
Bandes spectrales	0,50-0,59 μm	0,51-0,73 μm
.....	0,61-0,68 μm	
.....	0,79-0,89 μm	
Champ de l'instrument	4,13 degrés	4,13 degrés
Dimension du pixel en visée verticale	20 m \times 20 m	10 m \times 10 m
Nombre de pixels sur une ligne	3 000	6 000
Longueur d'une ligne balayée au sol, en visée verticale	60 km	60 km
Codage du pixel	3 \times 8 bits	6 bits DPCM (1)
Débit d'information	25 M bits/sec.	25 M bits/sec.

(1) DPCM est un mode de compression de données qui permet de conserver 256 niveaux de gris.

Fig. 12.- (d'après le CNES). Caractéristiques de l'instrument HRV et couverture complète du globe en visée verticale

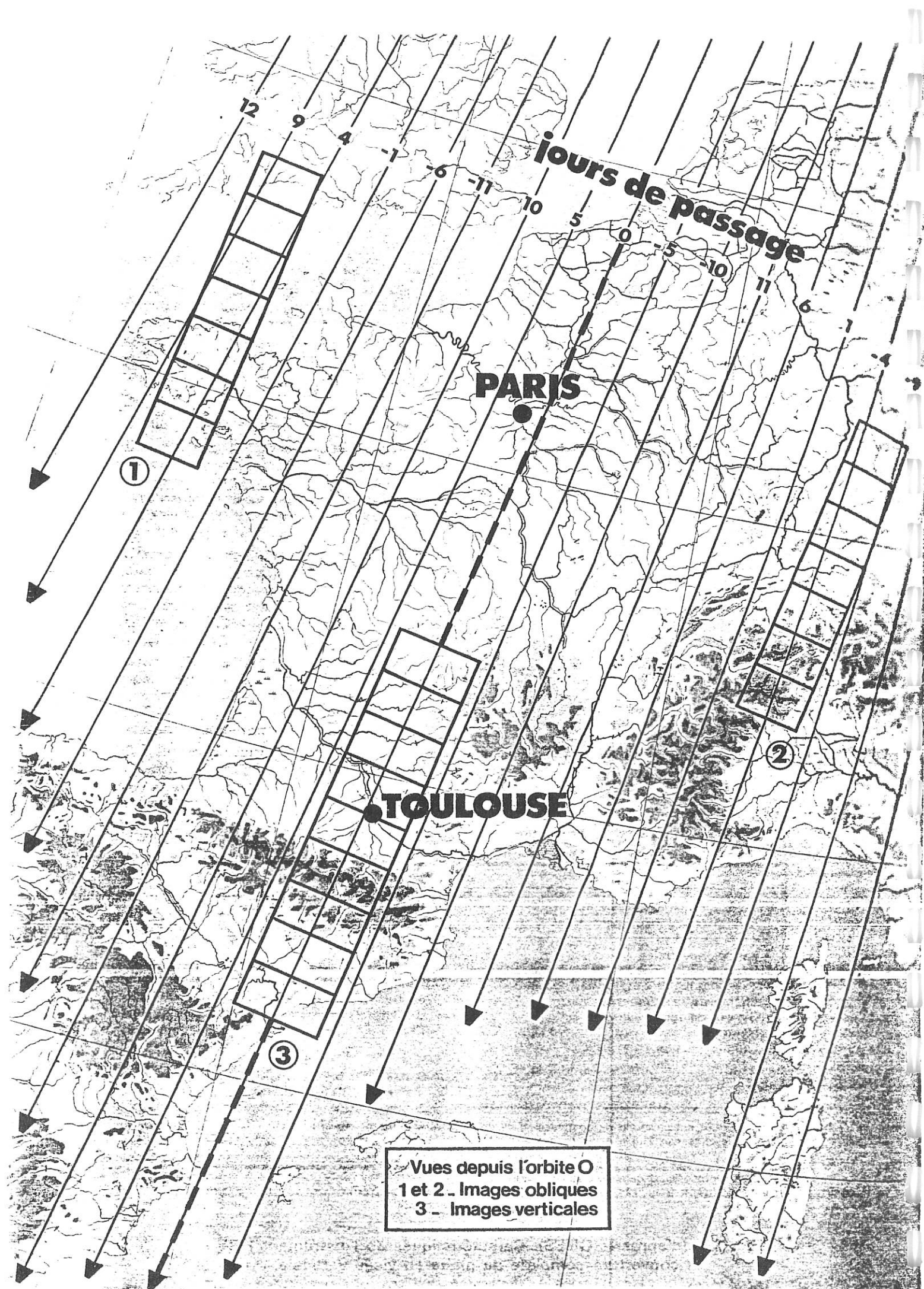


Fig. 13.- Couverture de la France par SPOT

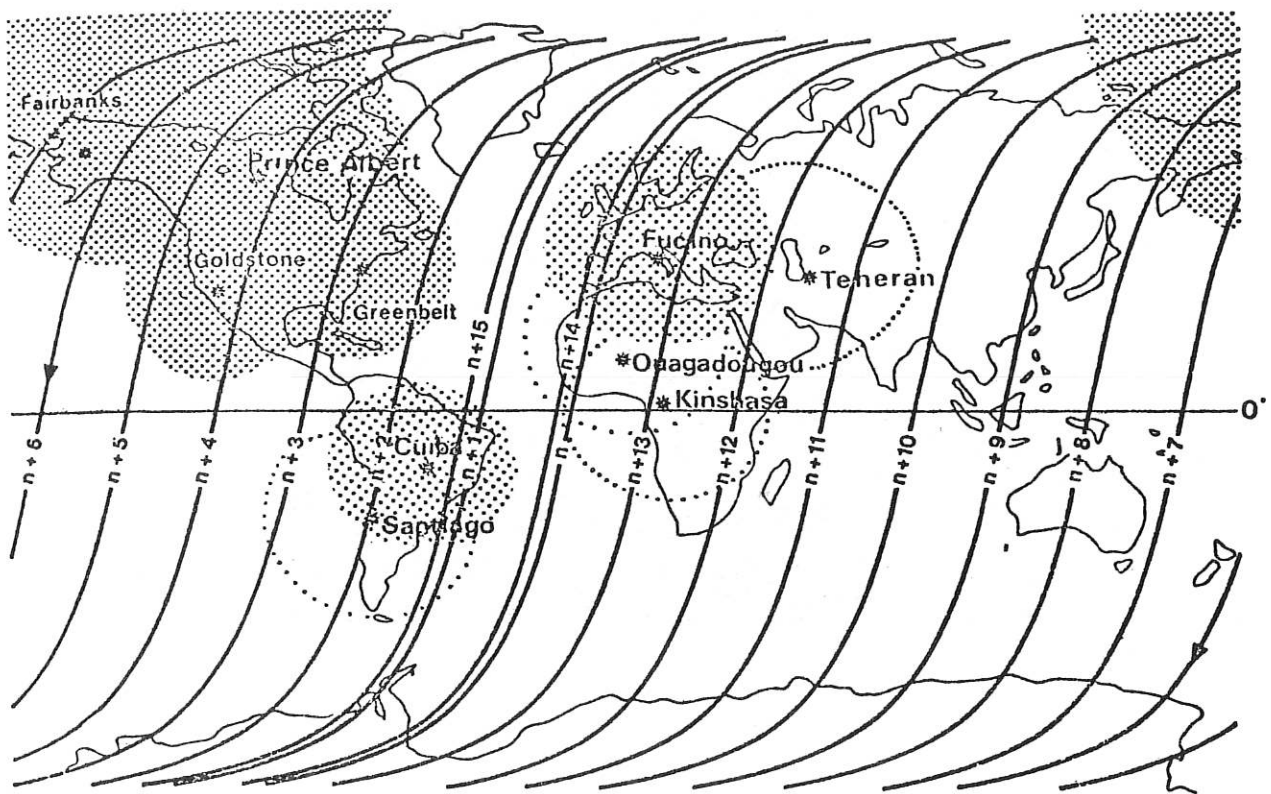


Fig. 14.- Passages et stations de réception.

Les possibilités offertes par le pointage des 2 H.R.V. seront très intéressantes. A chaque passage du satellite les deux instruments peuvent choisir 2 images dont la dimension varie de 60km à la verticale à 80km en visée oblique, dans une bande de terrain de plus de 900km. Ceci permet, dans la mesure du possible d'éviter les zones nuageuses (fig. 12).

Pour préparer les futurs utilisateurs à l'exploitation des images SPOT, l'I.G.N. participe à la réalisation de simulations d'images, avec le CNES.

Les simulations d'images sont réalisées selon un programme établi en collaboration avec des organismes représentant les futurs utilisateurs (I.F.P., B.R.G.N., B.D.P.M., O.R.S.T.O.M., I.N.R.A.). Ceux-ci évaluent actuellement ces simulations dans différents domaines d'application : géologie, agriculture, études de la végétation, etc ...

Deux types de simulations sont réalisés.

Certaines possèdent les caractéristiques géométriques de SPOT pour étudier par exemple les applications cartographiques et l'intérêt de la stéréoscopie dans l'interprétation. Elles sont obtenues à l'aide de photographies aériennes numérisées (fig. 15).

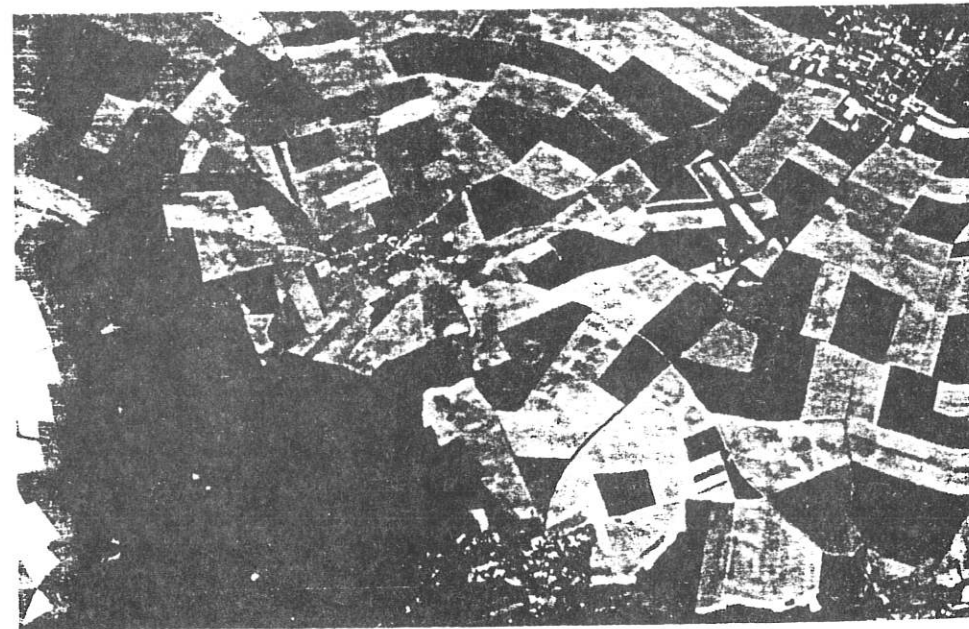
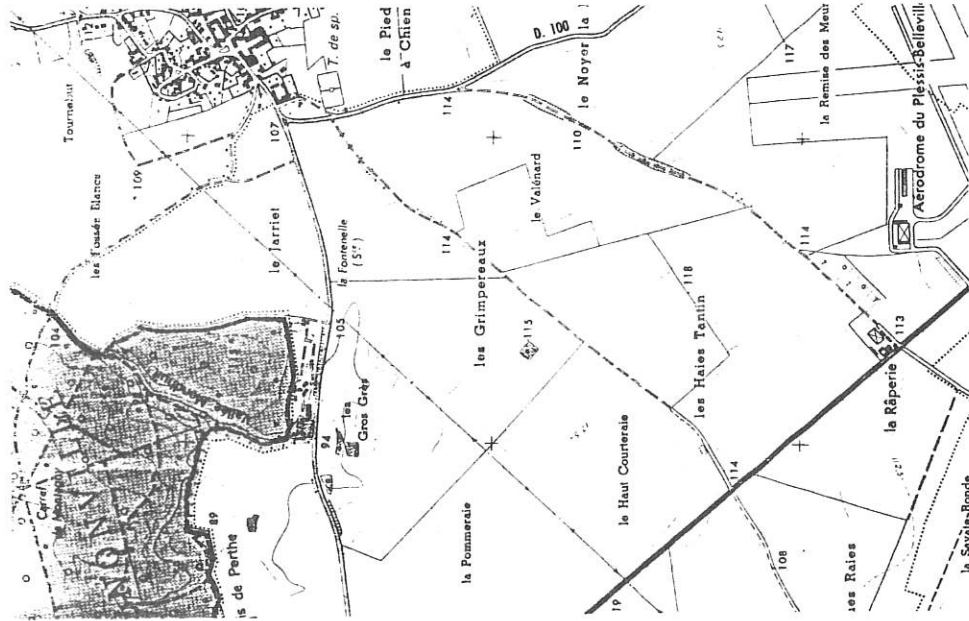


Image panchromatique
résolution 10 mètres



Carte à 1 : 25 000

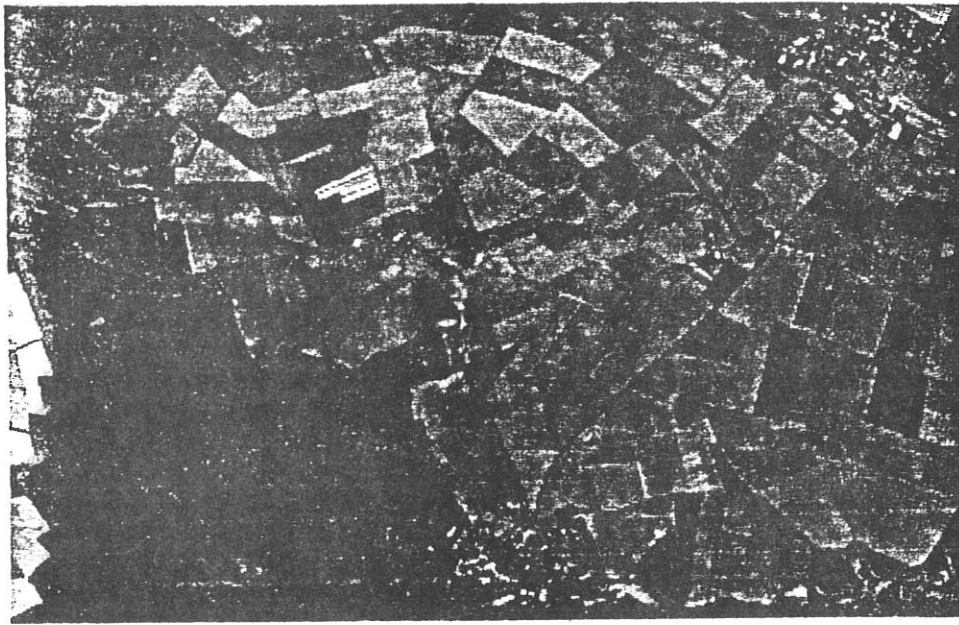


Image multispectrale
résolution 20 mètres

Fig. 15 . Simulations d' image SPOT.

D'autres simulations représentent l'aspect radiométrique des images SPOT. Obtenues à l'aide de scanners aéroportés elles sont utilisées pour évaluer les possibilités d'identification des détails et d'interprétation thématique (fig.16 , exemple en thermographie).

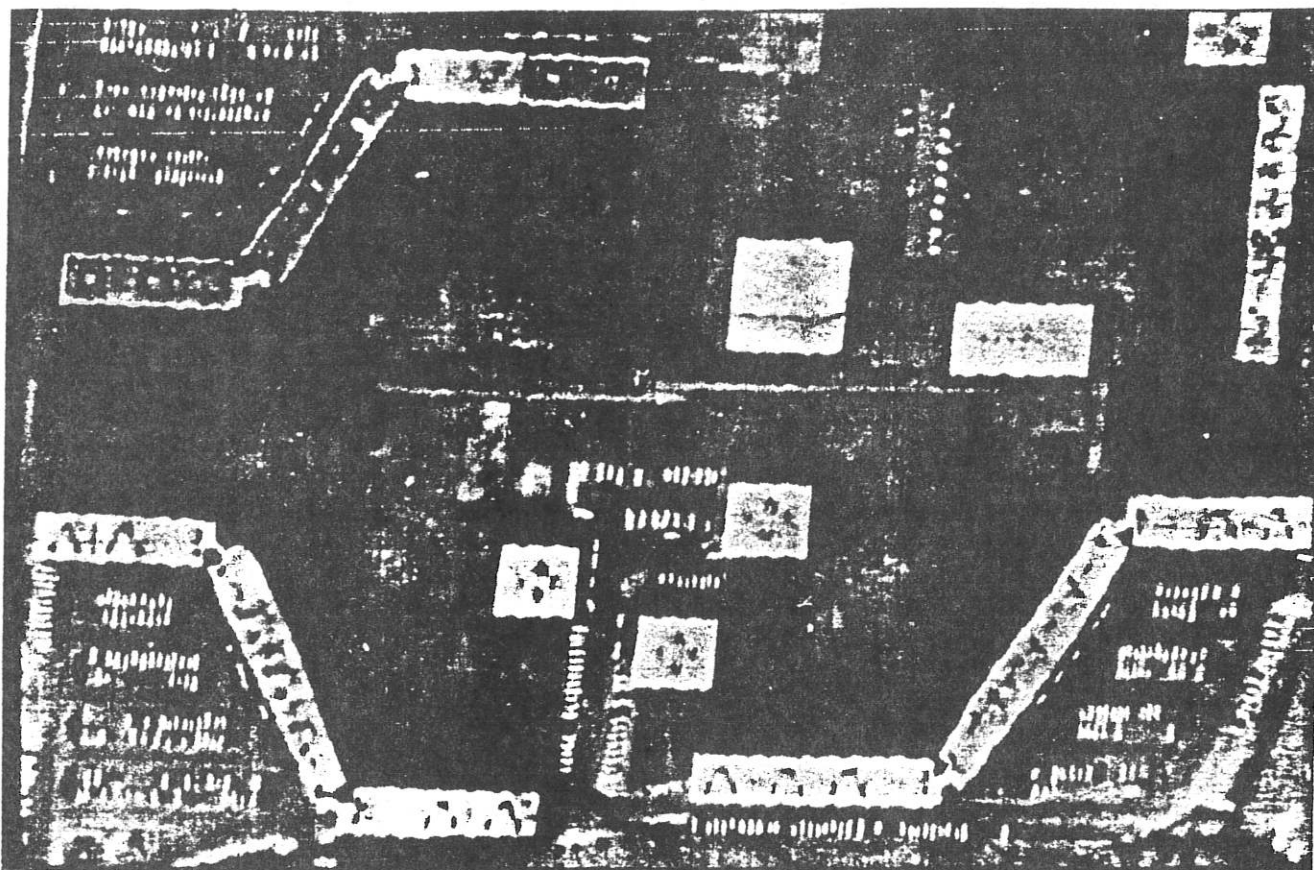
3.- OBSERVATION DANS LE DOMAINE DU RADAR.-

Les observations optiques vues précédemment sont sujettes aux limitations dues à la couverture nuageuse.

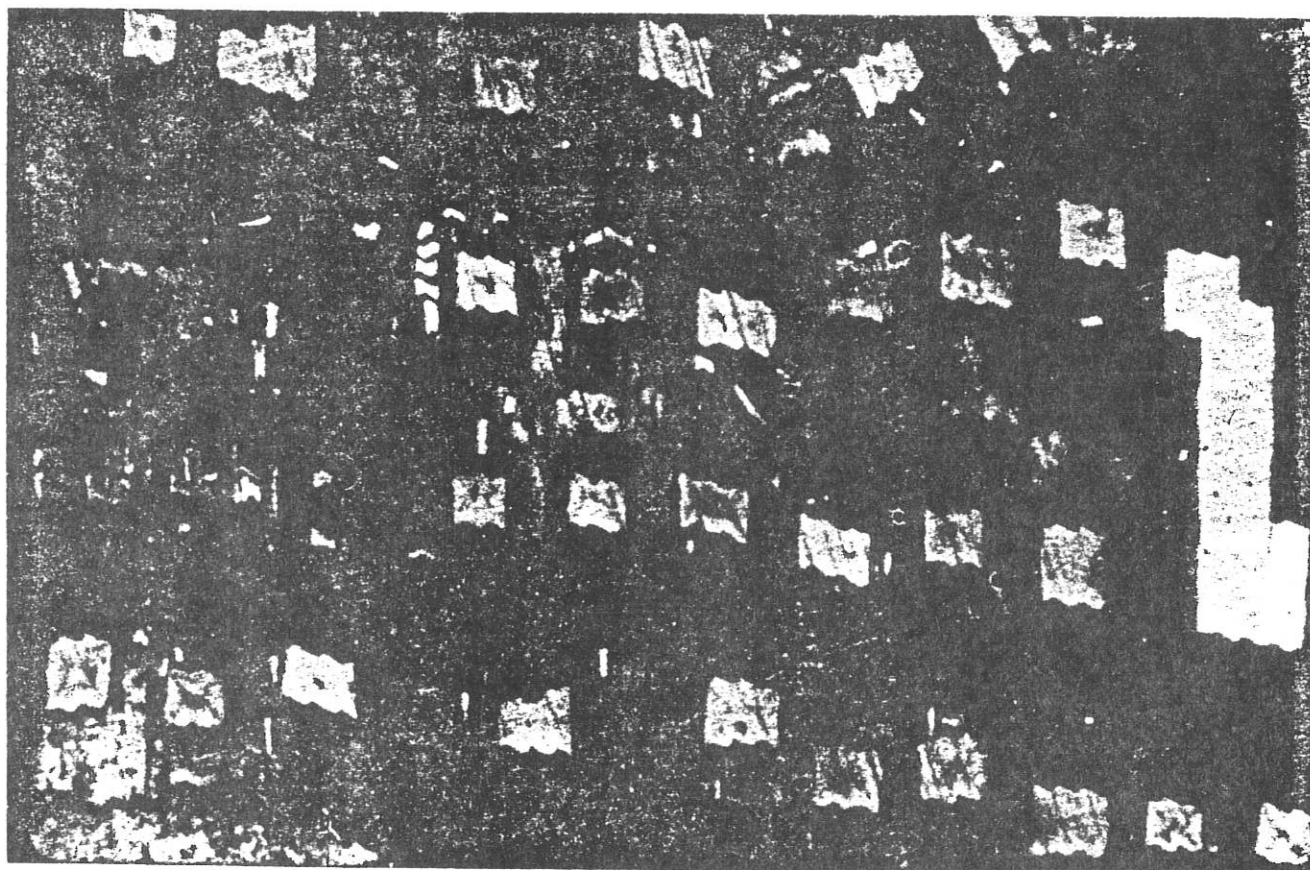
Une observation radar qui permet de former des images est insensible à la présence de nuages.

Une première expérience a eu lieu en 1978 avec un satellite américain Seasat qui n'a fonctionné que 3 mois mais a permis d'obtenir des résultats extrêmement intéressants.

De telles observations permettent en particulier de déterminer la vitesse du vent à la surface de la mer ainsi que l'amplitude et la longueur d'onde de la houle sur le plan mondial.



- Exemple de thermographie sur habitat collectif. Les immeubles sont en cours d'isolation. Les traits noirs sont le réseau de chauffage urbain.



- Exemple de thermographie sur habitat pavillonnaire. Les pavillons peuvent être classés selon le degré d'isolation. On peut aussi repérer, sur chaque pavillon, des fuites locales.

ANNEXE 1

Quelques réflexions et calculs pour préciser les idées concernant la circulation des satellites artificiels autour de la Terre. Les calculs, même approchés, sont souvent utiles pour mieux comprendre les phénomènes.

Les calculs sont simples = un crayon et une feuille de papier suffisent pour les effectuer, à défaut d'une calculatrice élémentaire de poche.

Ils supposent que la Terre est sphérique et que l'orbite du satellite est circulaire.

Nous avons choisi le satellite Landsat 2 qui circule à 920 Km au-dessus du sol terrestre et qui fait le "tour" de la Terre en 103 minutes (fig. 1).

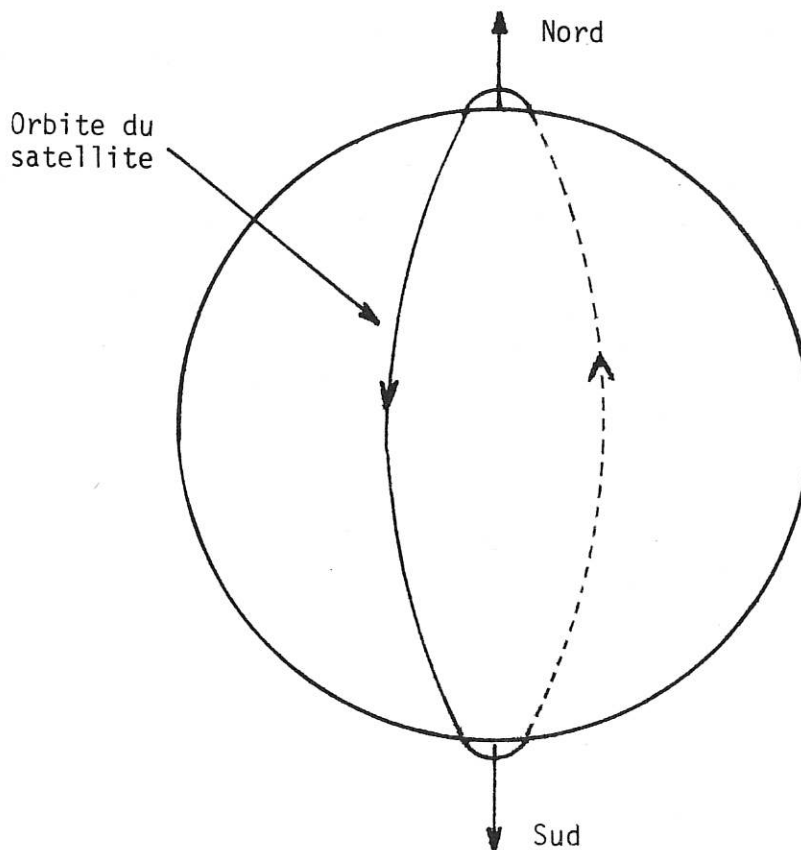


Fig. 1.- La Terre est supposée immobile

Calcul de la vitesse le long de l'orbite.-

- le rayon R_0 de la Terre est de 6370 Km.
- le rayon R de l'orbite est donc de $6370 + 920 = 7290$ Km.

La circonférence décrite a une longueur de :

$$2 \pi R = 2 \times 3,1416 \times 7290 = 45804 \text{ Km.}$$

ce qui pour la vitesse V du satellite sur l'orbite, en une minute, donne :

$$\begin{aligned} 45804 : 103 &= 447,7 \text{ Km/min.} \\ \text{ou } 447,7 : 60 &= 7,41 \text{ Km/sec.} \\ \text{ou } 447,7 \times 60 &= 26682 \text{ Km/heure.} \end{aligned}$$

Trace de l'orbite à la surface de la Terre.-

- Supposons que le plan de l'orbite passe par la ligne des pôles NS de la Terre. Ce plan, dans l'espace, est fixe par rapport aux étoiles de l'Univers.

Si la Terre ne tournait pas à l'intérieur du cercle de la trajectoire, la projection de celle-ci (soit sa trace) sur la surface terrestre, serait un cercle fixe passant par les pôles, soit un méridien (fig. 1).

- Mais, voilà : la Terre tourne à l'intérieur du cercle de l'orbite de l'Ouest vers l'Est ; il en résulte que la "trace" n'est plus un méridien, ni même une courbe fermée sur elle-même (fig. 2).

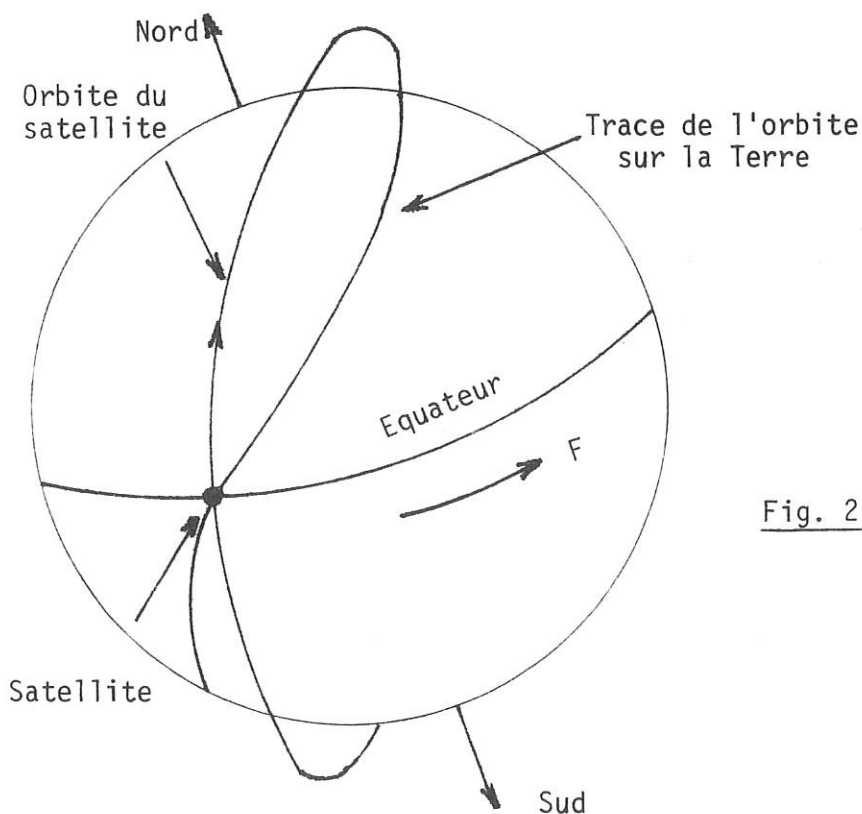


Fig. 2.- La Terre tourne dans le sens de la flèche F.

- Soyons plus précis (fig. 3) :

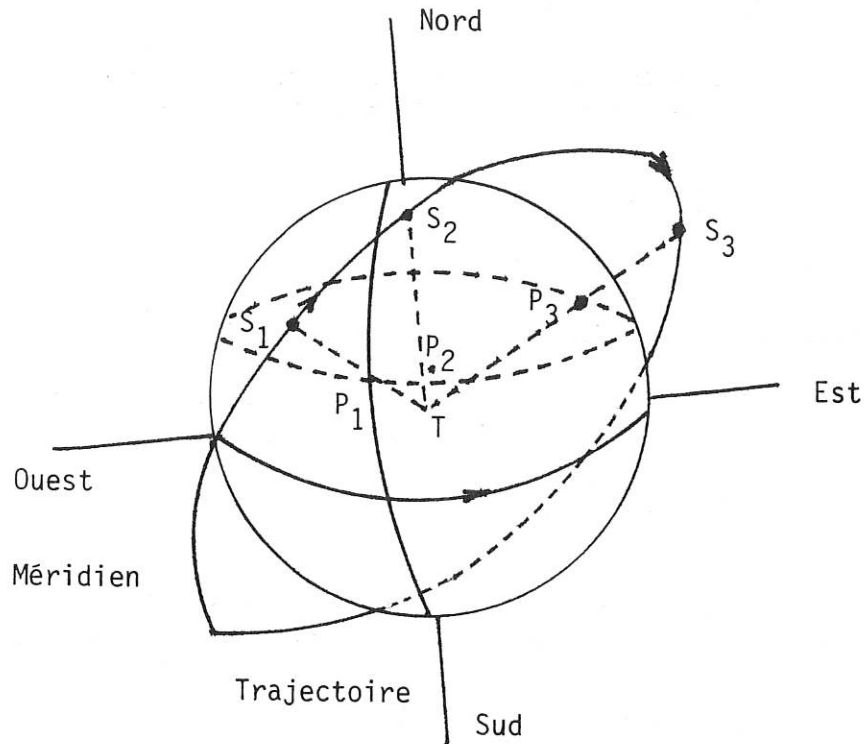


Fig. 3.- Le satellite décrit la trajectoire qui l'amène en S_1 à la verticale de la ville P_1 .

Quand il a fait un tour complet, alors qu'il est en S_1 , la ville est en P_2 .

En S_2 , puis S_3 il serait au-dessus de P_2 et P_3 , $\overline{TP_1}$, $\overline{TP_2}$, $\overline{TP_3}$ sont les verticales des lieux P_1 , P_2 , P_3 .

Prenons le satellite, allant vers le Nord, au point S_1 quand il traverse le plan équatorial ; sa projection sur la Terre est en P_1 .

Quand il revient dans le plan équatorial au bout de 103 minutes, la Terre a tourné vers l'Est et le point P_1 s'est déplacé en P_2 d'une longueur facile à calculer.

Valeur de la circonférence de la Terre :

$$6370 \times 2 \times 3,1416 = 40023 \text{ Km.}$$

Durée d'un tour de la Terre :

$$23 \text{ h } 56 = 1436 \text{ minutes.}$$

Le déplacement de P est alors de :

$$P_1 P_2 = \frac{40023 \times 103}{1436} = 2870 \text{ Km.}$$

La trace du satellite dans le plan équatorial est décalée vers l'Ouest de 2870 Km ; à son deuxième passage, le décalage sera de :

$$2870 \times 2 = 5740 \text{ Km.}$$

$$\text{à son 3ème de } 2870 \times 3 = 8610 \text{ Km}$$

$$\text{à son nème de } 2870 \times n =$$

Pour que la trace, dans le plan équatorial, parcourt toute la longueur de l'Equateur, il faut donc :

$$\frac{40023}{2870} = 13,95 \text{ révolutions } \approx 14$$

On trouve d'ailleurs le même résultat en divisant la durée d'un tour de la Terre (1436 minutes) par la durée d'une révolution :

$$\frac{1436}{103} = 13,94 \text{ révolutions } \approx 14$$

Mais si nous prenons un nombre entier de révolutions qui ramène le satellite dans le plan équatorial, soit 14, il atteint ce plan au "kilomètre"

$$2870 \times 14 = 40180$$

soit

$$40180 - 40023 = 157 \text{ Km}$$

à l'ouest de la 15ème orbite qui devrait être la première du cycle suivant (Fig. 4.).

La trace qui est une courbe sans fin qui s'enroule sur la Terre un peu à l'image d'une pelote de ficelle n'est pas fermée sur elle-même au bout de 14 révolutions (une journée). Il faut rattraper l'intervalle de 2870 Km entre 2 traces après un décalage de 157 Km par jour, il faut donc :

$$\frac{2870}{157} = 18 \text{ jours.}$$

pendant lesquels le satellite aura effectué :

$$14 \times 18 = 252 \text{ révolutions.}$$

(Des calculs plus précis que les nôtres qui tiennent compte, en particulier, du renflement de la Terre au niveau équatorial et du phénomène de précession, donnent 251 révolutions).

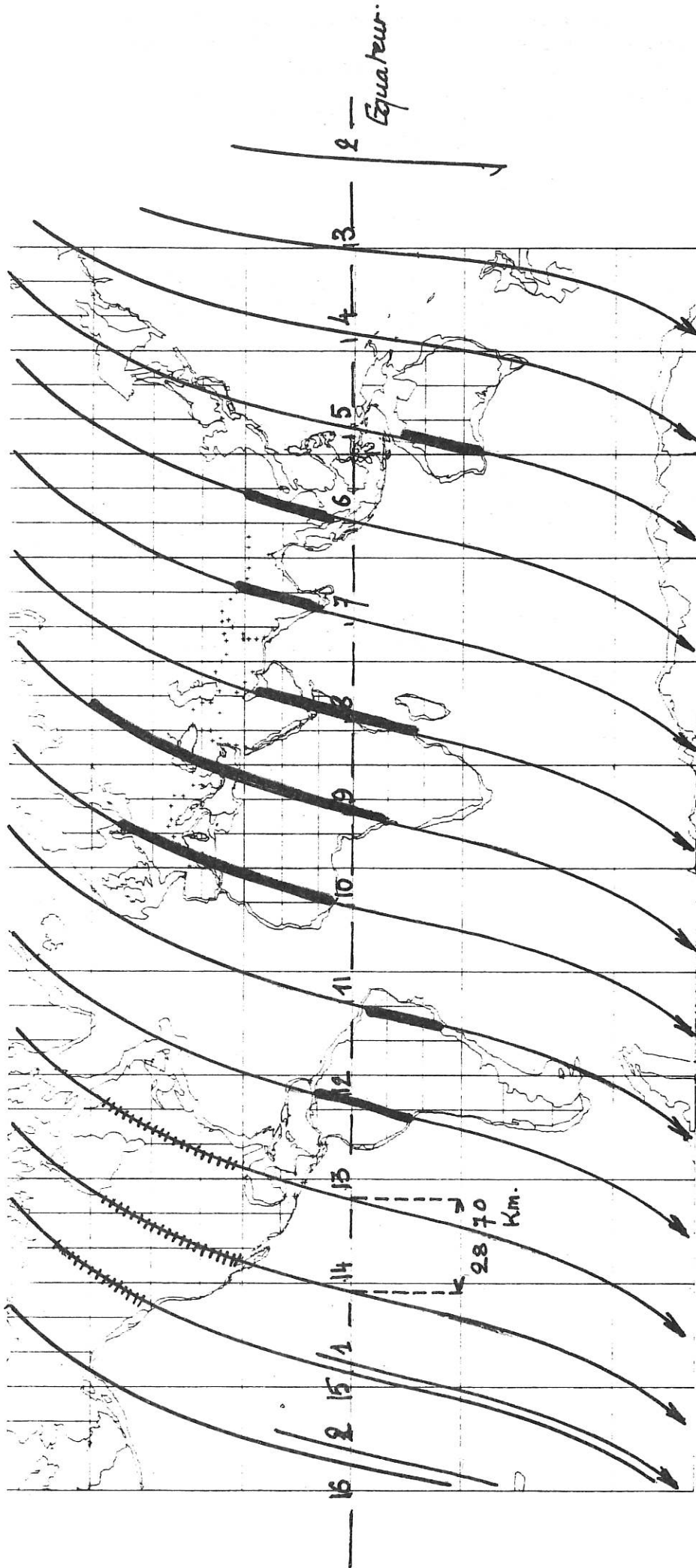


Fig. 4.- Ce schéma simplifié montre les traces des 14 orbites d'une même journée, distantes de 2870 km à l'équateur. La 15e orbite, première du lendemain, est à 157 km à l'ouest de 1.

Programme d'acquisition de la NASA pour cette journée : en noir, les données enregistrées en mémoire et transmises de nuit lors du passage en vue d'une station américaine ; en hachures, les parties reçues en temps réel par ces stations.

Le tracé de la 252^{ème} révolution se retrouve dans une situation identique par rapport à la première révolution ; cela constitue un cycle de révolution ; les traces d'un même satellite coïncident donc à chaque cycle ; pour l'observation de la Terre on s'efforce de maintenir cette régularité cyclique en corrigeant l'orbite si celle-ci vient à se dégrader.

Remarque.-

La trace serait une courbe fermée sur elle-même, au bout d'un tour de la Terre, en 24 heures, si la période de révolution du satellite était un diviseur de 24 heures ;

1,5 par exemple : 24 : 1,5 = 16

ou 2 : 24 : 2 = 12

avec une période de 1 h 5 (= 90 minutes), la trace couperait l'équateur en des points distants de :

$$\frac{40000}{16} = 2500 \text{ Km.}$$

et la dernière trace rejoindrait la première, mais ceci conduirait à une ouverture considérable des capteurs pour obtenir une couverture totale à l'Equateur.

ANNEXE 2

Comment un satellite se maintient sur son orbite, sans s'échapper, sans retomber.

Nous ne considérerons que le cas d'une orbite circulaire (fig.1)

- 1.- Si le satellite était immobile, comme la pomme de Newton, il tomberait sur la Terre, suivant la verticale du lieu, soumis à la seule attraction universelle (force de gravitation).

Si cette force vaut :

$$F_0 = mg$$

à la surface du sol ($g = 9,81 \text{ m/sec/sec} = 0,00981 \text{ Km/sec/sec}$ (1))

Elle diminue au fur et à mesure que l'on s'élève.

Avec 6370Km pour le rayon de la Terre, à 920 Km d'altitude, elle ne vaut plus que :

$$F = m \gamma = mg \frac{6370^2}{7290^2} = mg \frac{40576900}{53144100} = m \cdot 0,7635 g = 0,007489$$

- 2.- Mais le satellite tourne avec une certaine vitesse V ; nous simplifierons le vocabulaire en disant qu'il est soumis à une force centrifuge qui tend à l'éloigner de la Terre comme le caillou d'une fronde qu'on lâche. La valeur de cette force centrifuge est donnée par la formule :

$$F_c = m \frac{V^2}{\text{Rayon}} \quad V \text{ vaut, nous l'avons vu : } 7,41 \text{ Km/sec et } R = 7290 \text{ Km}$$

$$F_c = m \frac{7,41^2}{7290} = \frac{54,90}{7290} m = m \cdot 0,007532$$

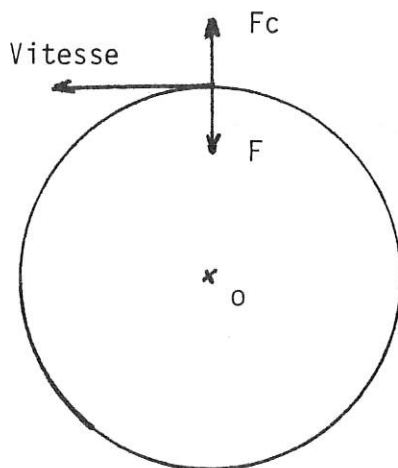


Fig. 1

L'approximation de nos calculs :

$$F = m \cdot 0,007489$$

$$F_c = m \cdot 0,007532$$

A la différence près de

$$0,000043 \quad (= \frac{5,73}{1000})$$

$$F = F_c$$

Avec des calculs rigoureux on trouverait que F est exactement égal à F_c .

Conclusion toute simple :

Le satellite circulaire reste sur son orbite car force centrifuge et attraction par la Terre s'équilibrent en chaque point.

Ainsi, à une altitude donnée, il faut communiquer au satellite, qu'on veut placer sur orbite, une vitesse suffisante pour l'empêcher de retomber sur la Terre.

Cette vitesse est d'autant plus faible que le point de mise en place sur l'orbite est plus élevé. Voir le tableau ci-dessous :

Hauteur au-dessus de la surface de la Terre	Vitesse à donner
6400 Km	5650 m/sec = 20340 Km/h
64000 Km	2410 m/sec = 8676 Km/h
224000 Km	1330 m/sec = 4788 Km/h
380000 Km (la Lune)	1020 m/sec = 3672 Km/h

(1) Accélération.

Au niveau du sol, soit à 6370Km du centre de la Terre, un corps en chute libre parcourt une verticale à une vitesse croissante.

Cette vitesse est proportionnelle au temps ; au bout d'une seconde elle est de 9,81 m/sec, au bout de deux secondes, de 19,62 m/sec.

D'une manière générale, elle augmente de 9,81 m/sec au cours de chaque seconde. La vitesse de chute subit donc une accélération ($g = 9,81 \text{ m/sec/sec}$).

A une hauteur h au-dessus du sol, soit à

$$6370 + h \quad \text{Km}$$

du centre de la Terre, la règle est identique, mais l'accélération γ a diminué suivant la règle

$$\frac{\gamma}{g} = \frac{(6370)^2}{(6370 + h)^2}$$

Avec $h = 920 \text{ Km}$

$$\frac{\gamma}{g} = \frac{6370^2}{7290^2} = 0,763$$

et $\gamma = 9,81 \times 0,763 = 7,490 \text{ m/sec/sec}$.

ANNEXE 3

Météosat.

Le secteur sol (implanté à Darmstadt en R.F.A.)

Le principal moyen de communication entre le satellite et le sol est la station d'acquisition des données, de télémessures et de poursuite (DATTS). L'élément essentiel de cette station est une antenne parabolique de 15m de diamètre orientable dans tous les sens. Le pointage de cette antenne peut être soit manuel soit commandé par programme, mais normalement il s'effectue en poursuite automatique avec verrouillage sur la télémessure du satellite. Les données d'images brutes reçues par la station sont ensuite transmises, par une liaison de surface, au système informatique sol et au centre de commande de Météosat. Pour localiser le satellite en orbite, la station émet des signaux de télémétrie qui sont relayés par le satellite vers un répéteur basé au sol et reviennent par le même chemin.

Spot.

Mise en orbite et séquence d'acquisition d'altitude.

Spot sera lancé par une fusée Ariane fin 1984.

Sa mise en orbite et la séquence d'acquisition d'altitude se déroulera de la façon suivante :

- vol du 1er étage de la fusée,
- séparation 2ème étage,
- éjection de la coiffe,
- séparation du 3ème étage,
- préacquisition du lanceur,
- séparation du satellite,
- déploiement du panneau solaire,
- acquisition soleil - configuration 12 h.
- acquisition d'orbite,
- calage du panneau solaire en fonction de l'heure locale.

Spot Image.

Spot Image, la première société commerciale au monde constituée spécifiquement pour la distribution des données issues de satellites de télédétection est née le 1er juillet 1982. Elle a pour mission principale la diffusion et la commercialisation des images que fourniront les satellites Spot à partir de 1984.

PRINCIPAUX SATELLITES D'OBSERVATION DE LA TERRE ⁽¹⁾

	DATE DE LANCEMENT	RÉSOLUTION SPATIALE	BANDES SPECTRALES	RÉPÉTITIVITÉ	MISSION
LANDSAT 2	janv. 75	79 × 57 m	0,5 — 0,6 μm 0,6 — 0,7 0,7 — 0,8 0,8 — 1,1	18 j.	observation de la terre — occupation et utilisation du sol — géologie
LANDSAT C	mars 78	visible : 79 × 57 m IR : (240 m) ²	id + canal thermique		id. + humidité des sols
LANDSAT D	1982	Vis-IR proche : (30 m) ² IR lointain : (120 m) ²	6 canaux de 0,5 à 12,6 μm	16 j.	id. mais meilleure résolution
SPOT	1984	(20 m) ² ou (10 m) ²	0,49 — 0,59 μm 0,61 — 0,69 0,80 — 0,91 0,5 — 0,9 μm	26 j.	id.
HCMM	avril 78	(500 m) ²	10,5 — 12,5 μm 0,5 — 1,1 μm	1,5 à 3,5 j.	humidité des sols — géothermie — cartographie thermique des effluents — champs de neige
NIMBUS G	été 78	(800 m) ²	4,7 μm 8 11,2 autres radiomètres	2 à 3 j.	pollution de l'air — océanographie — bilan radiatif terrestre
SEASAT	été 78		radars		océanographie
METEOSAT	nov. 77 Juin 79	(2,5 km) ² — vis. (5 km) ² — IR	0,5 — 1,1 μm 5,7 — 7,1 10,5 — 12,5		satellite météorologique géostationnaire — 36000 km 1 image toutes les demi-heures
GEOS B et C	été 78	id.	id.		id.

(1) Landsat 1 a été mis hors-service. Quand un satellite NASA est en projet, il est qualifié par une lettre qui devient un chiffre quand celui-ci est opérationnel : Landsat C deviendra Landsat 3.

A ce tableau, il convient d'ajouter certaines missions d'observation de la terre (caméra métrique, radar) de la navette spatiale (Space lab) et les satellites météorologiques de la NOAA de la série TIROS.