

Qui est Robert GENTY ?

Né à Nantes, Robert GENTY est Docteur es Sciences (Doctorat d'État, ingénieur de l'école Supérieure d'Électricité, diplômé de l'école libre des Sciences Politiques, membre titulaire de l'Académie de Marine et de l'Académie des Sciences d'Outre-Mer, membre correspondant de l'Académie Internationale d'Astronautique.

Juge unique mondial des records de l'Espace.



Apparemment très diversifiée, sa carrière scientifique présente un caractère d'unité fondée sur l'étude, le développement et la pratique de la navigation sous toutes ses formes. Il enseigne la Mécanique spatiale dans de nombreuses Écoles Supérieures. Ses articles et ses conférences sur l'espace, la mécanique et la navigation ont remporté un succès considérable en France et à l'étranger.

Ses travaux sur le cosmos l'ont conduit à de profondes réflexions quant à la construction de l'Univers et son évolution, réflexions qui sont à la base de son ouvrage "Univers Spinoziste ou Dieu Mécanicien", édition Cerdicim, et prolongent incontestablement la pensée du Révérend Père TEILHARD de CHARDIN dont il est véritablement imprégné.

A. BAILLY

Satellite héliosynchrone type SPOT

et ses applications géophysiques, géodésiques et topographiques

Par M. Robert GENTY,
Professeur de mécanique spatiale
à l'ENST
Juge unique mondial des
records de l'espace

(Conférence faite le 23 septembre 1982 devant l'association française de topographie).

Dès l'avènement de l'ère spatiale les savants conçurent le projet d'utiliser les satellites artificiels à des mesures géodésiques. C'est qu'en effet les satellites volent relativement haut, à plusieurs centaines voir plusieurs milliers de kilomètres, permettant d'être vus simultanément de lieux très éloignés comme les côtes "Est" et "Ouest" de l'Atlantique par exemple.

On peut, au principal, distinguer trois méthodes d'emploi des satellites artificiels en matière de géodésie.

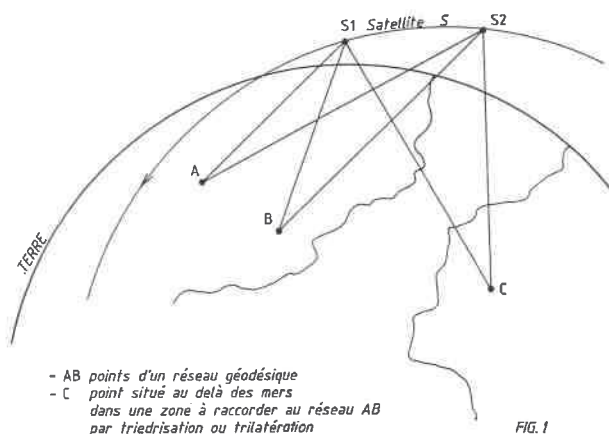
a) TRIÉDRISATION

La triangulation est un procédé plan en première approximation. Mais si l'un des points visés se trouve à quelques centaines de kilomètres d'altitude, les constructions géométriques affectent 3 dimensions et non plus 2 seulement. Le volume défini par le satellite artificiel et les stations géodésiques à terre servant de points de base est donc un polyèdre, et dans le cas général un trièdre. Sa détermination porte le nom de triédration. On comprend que des observations simultanées d'un même satellite artificiel S en S_1 et S_2 à partir de 2 points géodésiques A et B ainsi qu'un 3^e point C permettent de rattacher, par triédration,

le point C au réseau géodésique de A et B. (fig. 1).

b) TRILATÉRATION

A partir du même schéma, il est possible de placer le point C dans le système géodésique de A et B par le procédé de trilatération. Il suffit de mesurer les distances qui séparent C des diverses positions du satellite, lui-même repéré de la même façon par rapport aux points A et B (fig. 1)



c) DISPOSITIF DOPPLER

Si le satellite est le siège d'une émission radioélectrique, il est clair que la fréquence apparente de cette émission pour un observateur donné, en C par exemple, varie en fonction de la vitesse de rapprochement du satellite. Or cette vitesse de rapprochement passe par un minimum en S_0 au moment où le satellite commence à s'éloigner de C après s'en être rapproché (fig. 2).

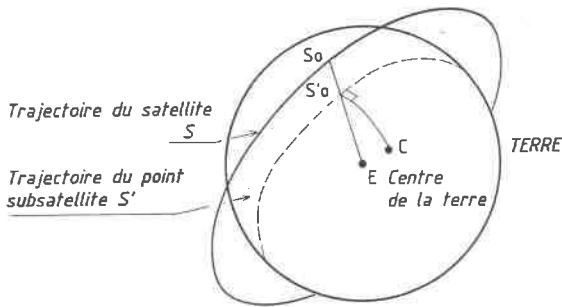


FIG. 2

De cette mesure, on peut déterminer la position du grand cercle passant par C et perpendiculaire à la ligne subsatellite CS_0 à la surface de la Terre. La ligne subsatellite est elle-même définie à partir de critères géodésiques et le grand cercle précité constitue un lieu géométrique du point C. Plusieurs mesures de référence pour le même point C donnent sa position par rapport au système géodésique de base.

Au surplus ces remarques correspondent à des situations acquises.

a) Le procédé de triédrisation a été mis en œuvre avec l'un des premiers satellites placés sur orbite, Echo 1 lancé le 12.08.60 par les américains. Son inclinaison orbitale valait $i = 47^\circ 22'$. Les altitudes au péri-gée et à l'apogée étaient respectivement 1 524 km et 1 685 km (que nous représenterons par la fraction 1 524/1 685 km). Les observations effectuées à l'aide de ce satellite ont permis d'établir la jonction géodésique entre la France et l'Afrique du Nord.

b) La trilatération a fait l'objet d'une expérimentation fructueuse du satellite français Starlette dûment équipé à cette fin et lancé le 06.02.75 avec une inclinaison orbitale $i = 49^\circ 80'$ et les altitudes péri-gée/apogée = 806/1 109 km. Les premiers échos laser y afférents obtenus par les stations de Grasse (France) et de la Grande Canarie (Espagne) ont contribué à la définition du géoïde GRIM2 et à l'étude des marées terrestres.

c) Enfin la méthode Doppler est couramment employée non seulement pour les déterminations géodésiques, mais aussi dans la résolution des problèmes de navigation, cousine germaine de la géodésie.

Les satellites les plus normalement utilisés en cette occurrence, sont ceux de la série Transit, en particulier les suivants lancés par les américains les :

19.12.62 avec $i = 90^\circ,62'$	698/725 km
16.06.63 avec $i = 89^\circ,97'$	724/757 km
28.09.63 avec $i = 89^\circ,90'$	1 075/1 127 km
04.06.64 avec $i = 90^\circ,42'$	854/956 km
13.12.64 avec $i = 89^\circ,86'$	1 025/1 084 km
13.08.65 avec $i = 90^\circ,01'$	1 089/1 194 km

entre autres.

On peut remarquer que tous ces satellites sont du type polaire, c'est-à-dire que leur plan orbital passe en permanence par l'axe des pôles terrestres. Il en résulte que toutes les latitudes sont successivement survolées.

En vérité tous ces satellites, aussi bien Echo que Starlette ou Transit — appelés satellites à défilement — ont un comportement souvent apparemment baroque vu de la Terre.

C'est la raison pour laquelle ils ont été qualifiés "d'aléatoires", alors qu'en réalité il est tout à fait possible de prévoir leur position à chaque instant (fig. 3).

Ainsi Tiros 1 lancé par les américains le 01.04.60 avec une inclinaison orbitale de $48^\circ,4'$ et un rapport péri-gée/apogée = 693/750 km, destiné initialement à des mesures météorologiques, présentait si fréquemment ses caméras face au Soleil, qu'il était dans l'impossibilité pratique d'effectuer des prises de vue au moment même où elles auraient été les plus utiles.

Telstar 1 lancé également par les américains le 10.07.62 avec $i = 44^\circ,79'$ et le couple altitude péri-gée/apogée = 952/5 632, était un satellite pour le moins capricieux se levant et se couchant aux points les plus divers de l'horizon et à des heures souvent indues.

Malgré le gros effort de la France qui — à l'époque — construisit le complexe de Pleumeur-Bodou comportant une antenne orientable en site et montée sur un chariot roulant sur une voie circulaire de 30 m de rayon, il fallut bientôt abandonner le système et le procédé pour la réception des images et des sons venant d'outre-Atlantique.

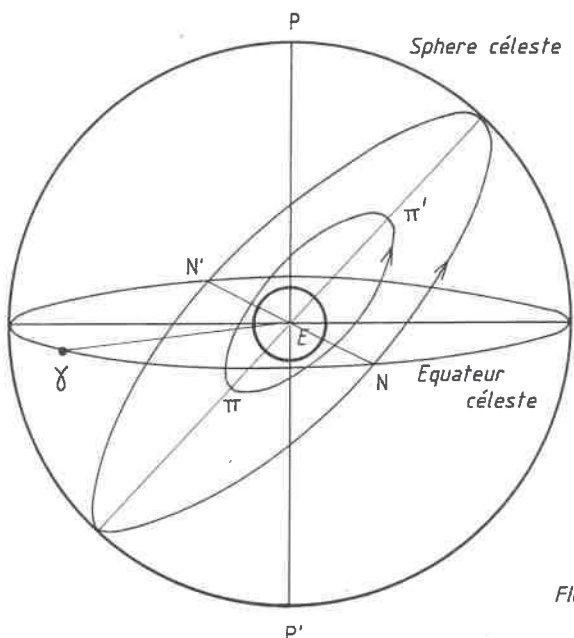


FIG. 3

Il apparut alors absolument indispensable de "domestiquer" les orbites afin de rendre les satellites pleinement opérationnels en définissant leurs formes, leurs dimensions et leur position dans l'espace par le choix judicieux des conditions de lancement et des paramètres orbitaux.

GÉOSTATIONNAIRE

Bien entendu, la première solution qui vint à l'esprit fut celle des satellites géostationnaires.

Rappelons qu'il s'agit d'un véhicule spatial placé sur une orbite équatoriale à une distance du centre de la Terre telle que sa vitesse angulaire de déplacement autour de ce point, mesurée par rapport aux étoiles, soit exactement égale à celle de la rotation de la Planète sur elle-même, mesurée dans les mêmes conditions.

Ce satellite est alors fixé par rapport à tous les points de la terre et c'est le seul qui jouisse de cette propriété.

Par ailleurs, il éclaire radioélectriquement une calotte sphérique terrestre atteignant les latitudes de $\pm 81^\circ$ réduite à $\pm 76^\circ$, compte tenu des garanties prises par les radioélectriciens. Les intersections de cette calotte avec l'équateur se situent respectivement, dans le cas pratique, à $\pm 76^\circ$ de longitude de chaque côté du méridien contenant la direction du satellite en cause.

Ces dispositions correspondent à une altitude d'environ 36 000 km ce qui est un chiffre très important impliquant de grosses difficultés de lancement et de grandes dépenses d'énergie.

Aussi bien dans certains cas particuliers il est bon de penser à des solutions différentes. Mais comment obtenir la réalisation de satellites "domestiqués" autres que les géostationnaires ?

DIVORCES

Pour tenter de résoudre ce problème, il faut commencer par trouver les raisons de la fantaisie apparente des satellites comme Tiros 1 et Telstar 1 pour ne parler que de ceux-là.

La situation inexploitable des premiers satellites artificiels tient à ce qu'on pourrait appeler un double divorce entre les éléments naturels c'est-à-dire le Soleil et la Terre avec leur particularités, et les éléments techniques créés par l'homme, c'est-à-dire les satellites artificiels.

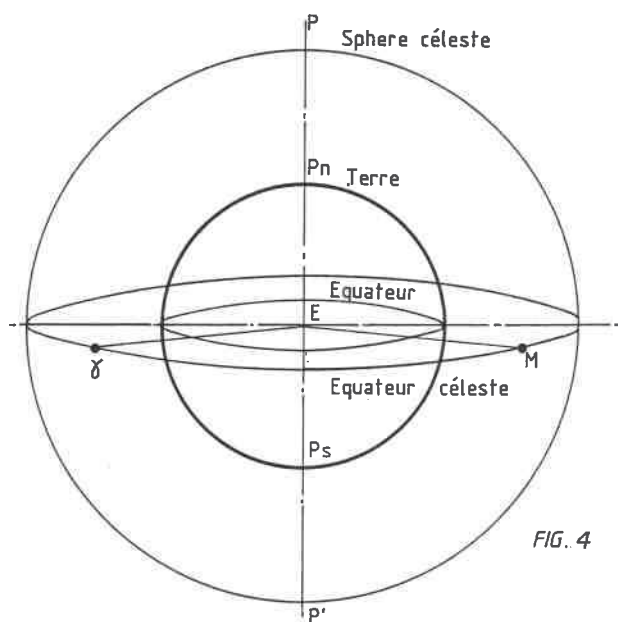


FIG. 4

Premier divorce

Le Soleil, n'étant pas une étoile fixe, semble se déplacer par rapport aux étoiles et son passage au méridien se décale tous les jours d'environ 1° , en s'éloignant vers l'Est de l'intersection E du plan de l'écliptique avec le plan de l'équateur. Ce mouvement est régulier pour le Soleil dit moyen M. Il s'ensuit donc que le mouvement du satellite artificiel étant repéré par rapport aux étoiles, sa position par rapport aux divers points de la Terre ne saurait être régie par une relation horaire simple (fig. 4).

Ce phénomène s'aggrave d'ailleurs, du fait que l'intersection EN du plan orbital et du plan de l'équateur, n'est pas fixe dans l'espace comme le voudraient les lois de Kepler. La raison en est la suivante : ainsi que nous l'avons vu, la Terre n'est pas tout à fait sphérique, mais plutôt ellipsoïdale. La partie massive équatoriale excédentaire baptisée souvent "bourrelet terrestre" agit en fonction de la loi de Newton sur toute masse en sa présence, par exemple un satellite artificiel (fig. 5).

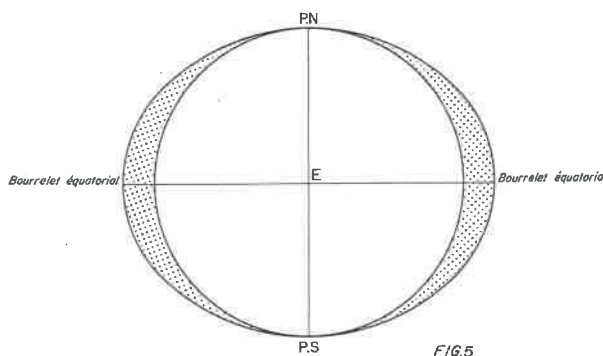


FIG. 5

Or le système complet du satellite artificiel en gravitation possède ce que l'on appelle en mécanique rationnelle : un moment cinétique constant.

Le moment cinétique n'est au demeurant pas autre chose que le moment géométrique du vecteur "quantité de mouvement" $\vec{m}\vec{v}$ (m masse du satellite, v sa vitesse), pris par rapport au centre de la Terre. Le moment cinétique que nous représentons par $\vec{m}\vec{q}$, est alors $\vec{m}\vec{q}$ vecteur perpendiculaire au plan orbital avec son origine au centre de la planète.

Dans le même ordre d'idée, la mécanique rationnelle explique que, par application du théorème du moment cinétique, toute agression du système par une force extérieure se traduit, non pas par un entraînement de la masse correspondante (ici la masse m) avec une accélération proportionnelle à la force d'agression, mais bien par un basculement du système tout entier autour du rayon vecteur du satellite, avec une vitesse angulaire proportionnelle à la force d'agression.

Cette remarque au surplus tout à fait générale dans l'ensemble de l'univers, conduit dans le cas singulier du satellite artificiel de la Terre à reconnaître que le plan orbital — compte tenu de l'action newtonienne du bourrelet terrestre — se met à tourner autour de la ligne des pôles de la planète avec une vitesse angulaire proportionnelle à la force f d'agression newtonienne, produite à chaque instant sur le satellite par l'élément correspondant du bourrelet terrestre (fig. 6, fig. 7).

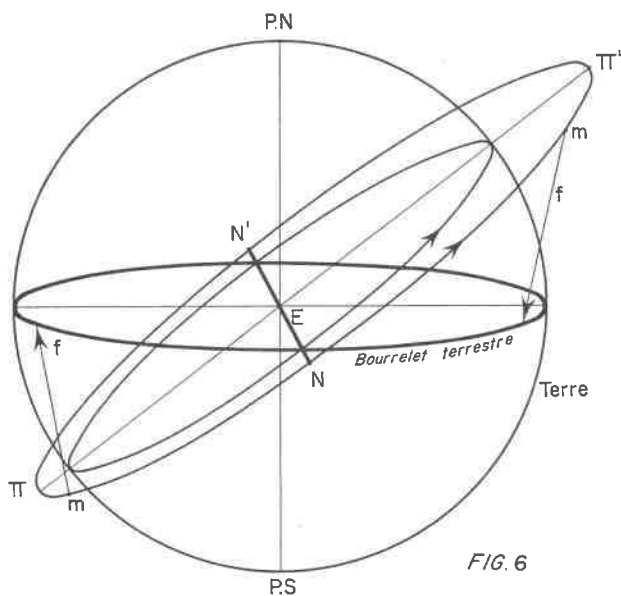


FIG. 6

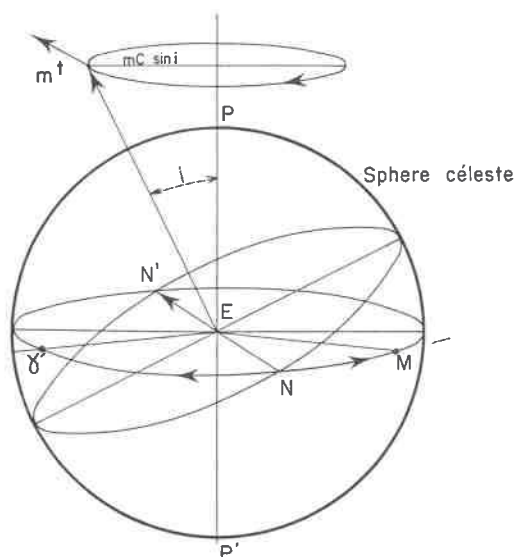


FIG. 7

$$a^7 = [6.638 \cos i]^2 \quad \text{avec } a \text{ rayon exprimé en } 10^3 \text{ km}$$

Les conditions du problème sont telles que cette vitesse angulaire — pratiquement constante — est dirigée vers l'Ouest si le lancement du satellite est effectué dans le secteur Est, et vers l'Est dans le cas contraire.

On voit donc que pour un tir optimal sur le plan énergétique, c'est-à-dire réalisé dans le secteur Est, afin de profiter au maximum de la vitesse de rotation de la Terre, l'intersection du plan orbital avec l'équateur appelée aussi ligne des nœuds EN, tend à se rapprocher de cette autre ligne fondamentale déjà définie comme étant l'intersection du plan de l'écliptique — contenant à tout moment le Soleil et la Terre — avec le plan équatorial, à savoir E χ . On se souvient qu'à ce propos il a été précisé plus haut que la direction du Soleil moyen s'éloigne en permanence de cette même ligne fondamentale.

Voilà donc le divorce grave auquel nous assistons, à l'origine des déboires rencontrés par les premiers ingénieurs du cosmos.

Satellite héliosynchrone

Fort heureusement le mal trouve en lui son propre remède. Il suffit en effet de lancer le satellite artificiel dans le secteur Ouest pour obtenir un mouvement de la ligne des nœuds en direction de l'Est c'est-à-dire dans le même sens que celui du Soleil moyen.

De plus en choisissant bien l'inclinaison orbitale et l'altitude du satellite, on peut faire en sorte que le mouvement de la ligne des nœuds — cette fois vers l'Est — soit doté de la même vitesse que celle du déplacement du Soleil moyen c'est-à-dire sensiblement 1° par jour.

Un tel satellite est dit héliosynchrone, qualificatif qui lui a été donné en 1963 par le Colonel ANDRÉ du service de documentation de l'Armée. Il est caractérisé par le fait que l'angle compris entre la ligne des nœuds du satellite et la direction du Soleil moyen est maintenu constant.

On peut donner à cet angle telle valeur que l'on souhaite — par exemple, on peut le rendre nul. Dans ces conditions le satellite repasse à l'équateur dans son mouvement ascendant, à midi vrai local à chaque révolution. C'est pourquoi on l'a appelé satellite midi. En matière de météorologie il est très avantageux parce que pendant 1/2 révolution il conserve le Soleil derrière lui pour un éclairage optimal de la Terre, mettant à profit avec un excellent rendement ses caméras opérant dans le visible. Pendant l'autre 1/2 révolution, il se trouve dans la nuit où ses appareils à infrarouge travaillent également dans les meilleures conditions.

Une formule simple résume l'ensemble de ces propos.

$$a^7 = (6\,638 \cos i)^2$$

où "a" représente le 1/2 grand axe de l'ellipse orbitale exprimé en 10³ kilomètres et où i est l'inclinaison du plan de l'orbite sur l'équateur.

Deuxième divorce

On sait que la période de révolution d'un satellite artificiel dépend essentiellement de la longueur du grand axe de l'orbite.

Or, il n'y a aucune raison a priori, pour qu'il existe une relation simple entre cette période et celle de la rotation de la Terre sur elle-même mesurée par rapport au Soleil, c'est-à-dire celle de l'alternance des jours et des nuits qui détermine très généralement les activités des hommes.

Satellite horaire

Pour remédier à cet état de chose et situer la course d'un satellite héliosynchrone dans le cadre de la vie de chaque jour, il faut et il suffit qu'il fasse un nombre entier de révolutions en 24 heures c'est-à-dire en 86 400 s de jour solaire moyen.

Il est alors possible de constater que le véhicule en cause, revient — sans y rester — tous les jours à la même heure à la verticale d'un même point du globe, en suivant d'ailleurs toujours le même chemin relatif par rapport à celle-ci.

Un tel satellite est appelé horaire.

Cette disposition comporte évidemment des avantages qu'il ne faut pas hésiter à qualifier de considé-

Tableau des satellites horaires

Nbre de révolutions	Durée de révolution T			Altitude en km
	en sec.	en mn.	en h.	
16	5 400	90	1 h 30	282
15	5 760	96	1 h 36	526
14	6 171	102,576	1 h 42 34,56 s	901
13	6 647	110,466	1 h 50 27,95 s	1 270
12	7 200	120	2 h	1 689
11	7 854	130,551	2 h 10 33,06 s	2 169
10	8 640	144	2 h 24	2 730
9	9 600	160	2 h 40	3 392
8	10 800	180	3 h	4 190

rables d'où le succès des satellites horaires pour la météorologie certes mais aussi et surtout pour la navigation ainsi que la géodésie et — pourquoi pas — dans l'avenir, les télécommunications.

Il n'est pas inutile, en ce point de notre exposé, de faire un peu d'histoire.

Dès le lancement du premier satellite artificiel par l'URSS, à savoir le Spoutnik 1, le 04.10.57, les astronomes du monde entier se penchèrent sur le phénomène de gravitation terrestre et purent effectivement constater le déplacement angulaire de la ligne des nœuds. On peut citer à cette occasion : Anthony, Blitzer, Brouwer, Garfinkel, Groves, Jaramillo, King Hele, Kosai, Sir Harrie SW Massey, Robert E., Roberson, Sterne, Strubble, Sturm, Vinti, Weisfeld, Wheelon, entre autres.

Ils établirent très correctement la formule de ce mouvement qu'ils baptisèrent "précession de la ligne des nœuds".

Personnellement confronté avec ce même problème, j'ai tout de suite pensé à une explication purement mécanique faisant intervenir le bourrelet terrestre d'une part et le moment cinétique du système gravitationnel d'autre part. J'obtins finalement la même formule que les astronomes précités par une voie essentiellement vectorielle, formule que je communiquai à l'Académie des Sciences en 1963.

Dès lors, il était tentant d'utiliser ce mouvement de précession en le renversant pour passer du fameux divorce dénoncé plus haut à un aimable arrangement entre le mouvement de la ligne des nœuds et celui de la direction du Soleil moyen; toutes deux contenues dans le plan de l'équateur. Il s'agissait donc dès cette époque de ce que le Colonel André avait nommé "satellite héliosynchrone", appellation qui non seule-

ment subsista mais gagna rapidement les milieux cosmiques du monde entier.

En fait, cette idée émise au sein des sphères spatiales françaises et européennes n'eut alors qu'un succès d'estime tout au plus.

États-Unis

Les américains furent plus diligents puisque le 31.01.61 ils lancèrent Samos 2 avec $i = 97^\circ,4$ et un couple périégée/apogée tel que 474/557 qui remplissait exactement les conditions de l'héliosynchronisme.

Ils placèrent ensuite Nimbus 1 sur orbite le 28.08.64 avec $i = 98^\circ,66$ et 429/937 km.

Puis ce fut Tiros 9 lancé le 22.01.65 avec $i = 96^\circ,41$ et 705/2 582 km. Ensuite vinrent les 10 ESSA (Environnement Sciences Service Administration) dont les 5 premiers ont pour caractéristiques respectives :

- N° 1 - du 03.02.66 avec $i = 97^\circ,91$ et 702/ 845
- N° 2 - du 28.02.66 avec $i = 101^\circ$ et 1 356/1 418
- N° 3 - du 02.10.66 avec $i = 101^\circ,06$ et 1 383/1 493
- N° 4 - du 26.01.67 avec $i = 102^\circ$ et 1 328/1 443
- N° 5 - du 20.04.67 avec $i = 101^\circ,97$ et 1 361/1 423

Enfin ce furent les Landsat avec $i = 99^\circ$, 1 à l'altitude moyenne de 900 km.

On peut citer aussi bien entendu :

Nimbus 7 avec $i = 99^\circ,3$ et 944/957
NOAA 7 avec $i = 99^\circ,9$ et 837/857
et plus près de nous :

Tiros N (le satellite du système Argos de positionnement à terre et en mer) avec $i = 99^\circ$ à l'altitude moyenne de 854 km.

C'est ainsi que les États-Unis d'Amérique placèrent sur orbites héliosynchrones 66 satellites de 1962 à 1969.

On compte actuellement près de 200 satellites héliosynchrones américains en gravitation.

URSS

En revanche, il ne semble pas que les soviétiques aient beaucoup développé ces systèmes de satellites.

On peut mentionner néanmoins la série des Météors.

N° 28 - $i = 98^\circ$ et 602/685

N° 29 - $i = 98^\circ$ et 628/658

N° 30 - $i = 98^\circ$ et 589/678

AGENCE SPATIALE EUROPÉENNE

L'Europe quant à elle n'est pas absente du palmarès avec :

Iris (Esro 2) du 17.05.68, $i = 97^\circ,16$ et 334/1 085

Aurora (Esro 1) du 03.10.68, $i = 93^\circ,74$ et 260/1 540.

Il est évident que le satellite héliosynchrone n'a pas tout à fait gagné ses lettres de noblesse en Europe ni en URSS. Doit-on en conclure que seuls les améri-

cains ont su apprécier ses qualités exceptionnelles ? Ce serait porter un jugement trop hâtif sur les événements présents et futurs.

En vérité, l'Europe et plus encore la France ont bien senti le besoin de se doter d'un ou de plusieurs satellites héliosynchrones.

Aussi bien le projet français SPOT dont l'avancement se poursuit normalement est de ce type avec $i = 98^\circ,2$ et une altitude moyenne de 832 km.

Le satellite qu'utilise le système SARSAT de sauvetage des avions et bateaux en perdition est aussi un héliosynchrone avec $i = 99^\circ$ et 854 km d'altitude moyenne.

Ce sont tous les deux des satellites de positionnement donnant des résultats de très grande précision, par conséquent aptes à contribuer utilement au développement de la géodésie mondiale.

Cette vocation des deux satellites en cause est bien la marque que le satellite héliosynchrone, parent pauvre de l'effort cosmique actuel tout au moins en Europe et en URSS, a devant lui un bel avenir dans de nombreuses applications dont la géodésie n'est pas l'une des moindres.

Dessins de Philippe RAIA (AFT n° 219) Setam Consult.

