

# Les débuts de l'ère spatiale

par Robert Kandel

## Avant-propos

**P**our la plupart, nous lecteurs et rédacteurs de ce Bulletin appartenons à la génération qui a vécu, certains comme acteurs, tous comme spectateurs, la révolution spatiale. Nos enfants et petits-enfants ne voient rien de remarquable dans les images de la Terre lorsqu'on présente la météorologie à la télévision ; nous sommes tous devenus des cosmonautes. Et, bien sûr, pour beaucoup d'entre nous qui avons travaillé dans la recherche, le développement de l'outil spatial et ses nouvelles possibilités ont joué un rôle déterminant dans notre vie professionnelle. C'est pour cela qu'il nous a semblé important de préparer ce numéro du Bulletin, pour présenter certains aspects de cette révolution dans les activités de recherche au CNRS et plus généralement en France, en Europe, et dans le monde.

## 4 octobre 1957 : Spoutnik-1

L'ère spatiale commence le 4 octobre 1957, à 19 heures 28 temps universel (22 heures 28 à l'heure de Moscou), avec le lancement par l'Union Soviétique de *Spoutnik*, premier satellite artificiel de la planète Terre (Figs. 1 et 2). A l'Observatoire de Harvard (Cambridge, Massachusetts, USA), où je travaillais avec d'autres étudiants et chercheurs, la nouvelle est arrivée dans la soirée, et nous avons passé le reste de la nuit à discuter des implications de cet exploit pour l'avenir de la science, aux Etats-Unis comme ailleurs.



Fig. 1 - Préparation de Spoutnik-1 (photo S.P. Korolev RSC Energia, Moscou)  
*Preparation of Spoutnik-1*

Cet exploit n'aurait pas dû surprendre. A partir de 1950, en préparant leurs contributions à l'Année géophysique Internationale (AGI de 1957-1958), les scientifiques américains comme soviétiques avaient

bien prévu, en plus des bases scientifiques en Antarctique et ailleurs, en plus de campagnes de mesures au sol, en mer, et dans les airs, d'embarquer des instruments d'observation de la Terre sur des satel-



Fig. 2 - Spoutnik-1 expliqué à Moscou  
*Explaining Spoutnik-1 to the Moscow public*

lites artificiels. A l'observatoire Harvard-Smithsonian, on avait commencé à mettre en place un système pour collecter les données et les analyser, mais les télex n'étaient pas encore installés le 4 octobre. Dans la bousculade des semaines qui ont suivi, nous avons reçu des observations venant d'astronomes professionnels et amateurs du monde entier. Les programmes de calcul n'étaient pas encore au point, et je me souviens qu'une des orbites calculées passait en partie sous terre !

L'analyse de l'orbite de Spoutnik et de la propagation de ses signaux radioélectriques a bien donné quelques résultats scientifiques, mais cela comptait peu à côté de l'impact psychologique énorme de cet astre brillant traversant le ciel d'ouest en est, de ce bip-bip relayé par les radios dans tous les pays du monde (Fig. 3). Ce qui a surpris, ce qui a choqué les Américains, était de découvrir que les pionniers de l'espace étaient Soviétiques et non Américains. Et partout dans le monde, beaucoup

d'observateurs affirmaient que cet exploit démontrait la supériorité du système communiste dans la marche vers l'avenir. Aux Etats-Unis, le Congrès trouve rapidement des crédits pour l'enseignement des sciences, pour des bourses, et pour la recherche. Et il devient urgent – au moins pour la fierté nationale sinon pour la sécurité du pays – de mettre en orbite des satellites américains. Spoutnik a donné le signal de départ de la course spatiale. Mais comment était-on arrivé là ?



Fig. 3 - Première page du New York Times, 5 octobre 1957. L'article sous la carte avec l'orbite note que le satellite a huit fois la masse du satellite américain projeté Vanguard.  
 Front page of the New York Times, October 5, 1957. The article below the orbit diagram compares the satellite's mass to that of the Vanguard project.

## 24 mai 1543 : Copernic

En un sens, l'ère spatiale commence le 24 mai 1543, quand Copernic reçoit sur son lit de mort la première édition de son opus *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. Cet ouvrage déloge la Terre du centre de l'univers pour la reléguer, planète parmi d'autres, en orbite autour du Soleil. Avec cet ouvrage, compulsé par les grands astronomes de l'époque, commence la révolution de l'astronomie et de la physique. Avec la Terre désormais une planète parmi d'autres, on peut imaginer que les autres planètes sont d'autres mondes, comme le nôtre. Avec, à la place de la cosmologie géocentrique où la Terre était d'essence différente du reste de l'univers, le nouveau système du monde organisé autour du Soleil, on peut imaginer le voyage vers la Lune et au-delà.

Dans l'imagination au moins, l'ère spatiale commence, et l'imagination saisit l'occasion. Dès 1584, à Venise, Giordano Bruno publie *De l'Infinito, Universo e Mondi*. En 1686, le philosophe et poète Bernard de Fontenelle publie ses *Entretiens sur la Pluralité des mondes habités*, traduits d'ailleurs en anglais dès 1718. Le physicien néerlandais Christiaan Huygens, astronome à l'Observatoire de Paris, développe ces idées dans *Cosmotheoros*, publié en 1695. Plus tôt, Cyrano de Bergerac avait imaginé des moyens de propulsion spatiale plutôt rocambolesques dans son *Histoire comique des états et empire de la Lune et du Soleil*. Les Anglais s'y mettent aussi : en 1638

l'évêque Francis Godwin de Hereford publie *The Man in the Moone : or a Discourse of a Voyage thither*. Tout le monde connaît, bien sûr, le voyage *De la Terre à la Lune* de Jules Verne, publié en 1865, avec son point de lancement (par canon !) en Floride, non loin du Cap Canaveral. En 1875, Achille Eyraud décrit un *Voyage à Vénus*, à l'aide d'une fusée à eau ! Du côté des russes, Konstantin Edouardovitch Tsiolkovski (1857-1935) raconte en 1892 le voyage vers la Lune ; mais il fait bien plus, travaillant sur les équations du vol spatial.

## 5 juillet 1687 : Isaac Newton

Il faut rappeler que même si Copernic a mis la Terre parmi les planètes, il n'a point éclairci la mécanique planétaire et céleste. De ce côté, l'ère spatiale commence le 5 juillet 1687, avec la publication de l'ouvrage de Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, ouvrage qui établit les lois du mouvement et de la gravitation universelle. Dans son *Traité du système du monde*, une version plus accessible du livre III des *Principia*, publié en anglais en 1728, Newton examine le mouvement d'une pierre projetée horizontalement d'un sommet de montagne. Cette pierre retombe de plus en plus loin sur le sol quand on augmente la vitesse de projection, jusqu'à une vitesse à laquelle elle ne tombera plus, mais restera en orbite autour de la Terre. Voilà, en équations, la conception d'un satellite artificiel. Dès 1733, dans la XIV<sup>e</sup> de ses *Lettres philosophiques*, Voltaire fait l'éloge de Newton, et en 1738 il publie *Éléments de la philosophie de Newton*. Plus tard, au début du XIX<sup>e</sup> siècle, Pierre Simon

Laplace (1749-1827) étendra le travail de Newton, considérant notamment les complications entraînées dans les orbites des divers corps célestes et des planètes par les perturbations gravitationnelles des planètes.

## 1881-1930 : Russie, Etats-Unis

Du côté des russes, Tsiolkovski publie en mai 1903 son ouvrage de pionnier «*L'exploration de l'espace cosmique à l'aide de moteurs à réaction*», développant pour la première fois les équations qui s'appliquent à des fusées à plusieurs étages. Avant Tsiolkovski, le technicien Nikolai Ivanovitch Kibalitchitch avait eu l'idée d'un véhicule habité, propulsé par une fusée à carburant solide, projet qu'il rédige peu de jours avant son exécution pour sa participation à l'assassinat du Tsar Alexandre II le 1<sup>er</sup> mars 1881 par l'organisation révolutionnaire terroriste *Narodnaya Volya* (la volonté du peuple).

Ces travaux étaient peu connus en dehors de la Russie. Aux Etats-Unis, Robert Hutchins Goddard (1882-1945) envisage l'emploi de carburants liquides dès 1909, et obtient un premier brevet dès 1914. Il est le premier, le 16 mars 1926 à faire voler une fusée propulsée par un mélange d'essence et d'oxygène liquide. Ce petit engin atteint une altitude de 12m50. Dès 1929 la Smithsonian publie son exposé *A method for reaching extreme altitudes*. Ses travaux attirent peu d'attention avant sa mort, mais la NASA a donné son nom au *Goddard Space Flight Center* près de Washington et au *Goddard Institute for Space Studies* à New York.

### 1923-1945 : Allemagne

Du côté des Allemands, c'est en juin 1923 qu'Hermann Oberth (1894-1989) publie son livre *Die Rakete zu den Planetenraumen* (les fusées vers l'espace interplanétaire), sur la base d'une thèse présentée à Heidelberg mais rejetée à cause de sa teneur «excessivement spéculative». Inspiré par Jules Verne, Oberth arrive indépendamment aux équations de Tsiolkovski. Son livre très lu en Allemagne traite à la fois de la technologie des fusées et de la vision de l'exploration spatiale. Oberth anime la *Verein für Raumschiffahrt* (VfR, société d'amateurs du vol spatial), fondée en 1927 à Breslau (aujourd'hui Wrocław, Pologne). En 1929 il publie *Die Wege zur Raumschiffahrt* (la voie du vol spatial), et il conseille Fritz Lang dans son tournage du premier film spatial *Die Frau im Mond* (La Femme dans la Lune). En 1930, la VfR commence à tester des fusées à carburant liquide. Dès 1932, elle reçoit des crédits des militaires allemands. En effet, si le Traité de Versailles interdisait à l'Allemagne de développer une aviation militaire, il ne contenait aucun alinéa sur les fusées.

Parmi ceux qu'Oberth inspire, il y a le jeune Wernher von Braun (1912-1977), le premier civil employé par la *Reichswehr* pour la recherche sur les fusées. Lorsque les Nazis prennent le pouvoir en 1933, certains des membres de la VfR émigrent ou quittent la Société, mais d'autres rallient l'effort militaire du Troisième Reich. Von Braun, membre du parti Nazi à partir de 1937, devenu directeur du centre secret de

Peenemünde sur la côte de la Baltique, est promu *Untersturmführer* des SS, puis *Sturmbahnführer* (Colonel) en 1943. Son travail avec le général Dornberger, aidé par les milliers de travailleurs esclaves à Peenemünde puis à l'usine souterraine Mittelbau-Dora rattachée au camp de Buchenwald, mène au développement puis à la production industrielle de la fusée A4 (Fig. 4). Plus connue sous le sigle V-2 (*Vergeltungswaffe* ou arme de vengeance), cette fusée est le premier engin balistique opérationnel à carburant liquide (brûlant un mélange alcool-eau avec de l'oxygène liquide). Six mille de ces fusées ont été construites, et plus de trois mille tirées, surtout à partir de 1944, quelques-unes vers Paris, la plupart vers Anvers et Londres, faisant plusieurs milliers de victimes. Et n'oublions pas que la mortalité parmi les travailleurs esclaves de Dora a été au moins double... !

Von Braun et ses collaborateurs avaient bien d'autres projets, dont

un tandem intercontinental A9-A10, le *Projekt Amerika*, et un projet A9/A10/A11 de satellisation. À l'approche de l'Armée Rouge en avril 1945, il quitte Peenemünde pour le sud de l'Allemagne avec quelques 500 collaborateurs et de nombreuses fusées, et se rend à l'armée américaine le 2 mai 1945. Notons toutefois que les Soviétiques avaient acquis en août 1944 les débris d'une A4 tirée en Pologne et récupérée par l'armée de résistance polonaise, et ils ont également capturé ou recruté de nombreux ingénieurs et techniciens allemands dans les mois suivant la reddition. Cependant, l'usine de Dora, dans ce qui devait être la zone d'occupation soviétique, avait été libérée par l'armée américaine le 11 avril. Avant l'arrivée des Soviétiques, les Américains ont pu expédier aux États-Unis une centaine de V-2 ainsi que plusieurs tonnes de documentation. Le 15 octobre 1945, à Cuxhaven, les occupants britanniques ont invité des spécialistes américains et soviétiques à observer le lancement d'une V-2 par des



Fig. 4 - Chaîne de montage de V-2, Mittelbau-Dora, photo US Army, 1945  
V-2 assembly line at Mittelbau-Dora

techniciens allemands (projet *Backfire*). Au cours de ce même mois, les Etats-Unis démarrent le projet *Paperclip*, transférant von Braun et son équipe aux Etats-Unis. Dans la zone soviétique, on remet en marche la production de fusées, mais dès octobre 1946, on transfère tous les spécialistes allemands comme soviétiques en U.R.S.S.

### 1945-1957 : l'U.R.S.S.

Le chemin de *Sputnik* était bien engagé. Et chemin est le mot qui convient, car son équivalent russe est *pout'*, un *poutnik* est un routard, et *sputnik* peut être un compagnon de route (pas nécessairement au sens politique), donc un objet accompagnant notre planète, un satellite dans son orbite autour du Soleil. Certes, les Soviétiques ont tiré profit du savoir-faire allemand à partir de 1945, mais ils s'étaient en fait engagés sur le chemin de *Sputnik* bien avant. En Russie devenue soviétique, le travail de Tsiolkovski avait inspiré toute une génération de chercheurs et d'ingénieurs comme d'écrivains de science-fiction. L'idée du vol spatial cadrait bien avec l'idéologie du progrès par la science. En 1921, le gouvernement soviétique établit un laboratoire de recherche et développement de fusées à application militaire ; sa première fusée à carburant liquide est lancée en 1933.

Toutefois, la route vers *Sputnik* n'était pas sans embûches. Sergueï Pavlovitch Korolev (Fig. 5 : 1907-1966), nommé chef d'un important institut de recherche à Moscou dès 1932, est arrêté pour « sabotage » en 1938, condamné

à huit ans de travaux forcés et envoyé au *goulag* de Kolyma. En 1940, on le transfère au *charachka* (goulag scientifique) NKVD CKB-29 de Moscou, dirigé par Andreï Toupolev, également prisonnier. Libéré en 1944, Korolev prend part aux missions soviétiques de récupération de matériel, de spécialistes et de documents en Allemagne occupée.

Par la suite, Korolev joue le rôle – longtemps tenu secret – de « concepteur principal » des fusées, satellites, et sondes interplanétaires soviétiques. Père fondateur du programme spatial soviétique, il reçoit le Prix Lénine en 1957, la médaille d'or Tsiolkovski de l'Académie des sciences de l'URSS en 1958.



Fig. 5 : S.P. Korolev

Premier directeur en 1946 du nouveau Bureau spécial de conception, aujourd'hui la *S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia*, Korolev fait d'abord lancer des V-2 allemands de *Kapoustin Yar* (au sud-est de Stalingrad) en 1947, puis il dirige le développement de la fusée

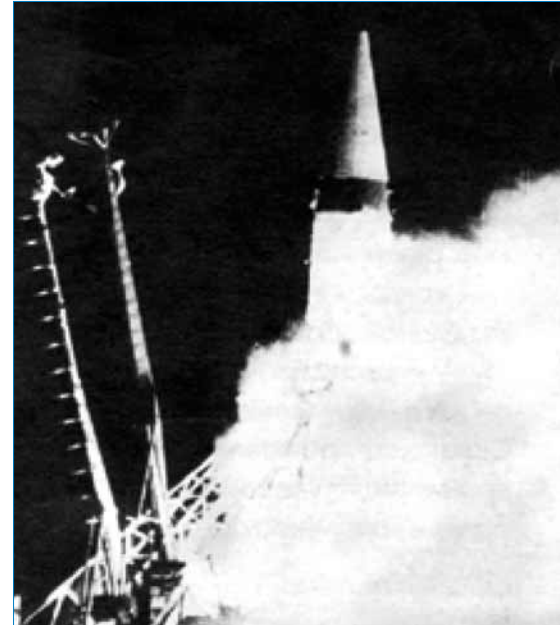


Fig. 6 - Lancement de la fusée R-7 Semiorka (photo S.P. Korolev RSC Energia)  
Launch of the R-7 Semiorka rocket

R-7 *Semiorka*, à 8 000 km de rayon d'action (Fig. 6).

Cette fusée à vocation militaire, pouvant porter une charge thermonucléaire d'une puissance de 3 à 5 mégatonnes de TNT, testée pour la première fois en mai 1957 à Baïkonour (Tyuratam, Kazakhstan), propulse dans l'espace le premier satellite artificiel de la Terre, *Sputnik-1*. Et c'est l'ambassadeur de l'URSS aux Etats-Unis qui a le plaisir, et l'honneur, d'annoncer à Washington cette première, le soir du 4 octobre 1957, lors d'une réception de scientifiques et d'administratifs impliqués dans l'organisation de l'Année géophysique internationale.

### 1945-1957 : Etats-Unis

Et aux Etats-Unis, pendant ce temps ? Après tout, von Braun et

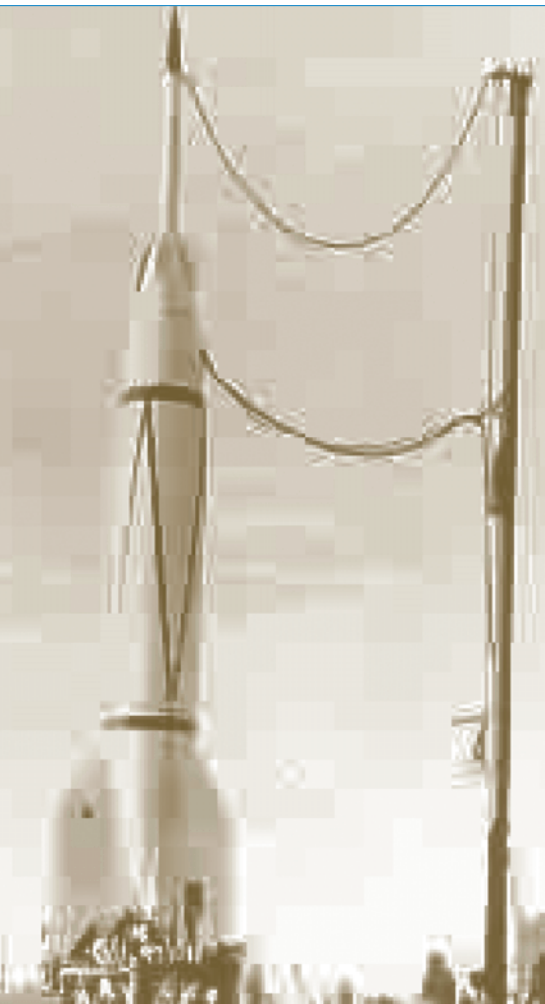


Fig. 7 - V-2 avec WAC-Corporal en 2<sup>e</sup> étage, sur le pas de tir de White Sands  
V-2 with a WAC-Corporal second stage  
on the White Sands launch pad.

Dornberger avaient livré à l'Armée américaine l'équipe principale allemande d'ingénieurs et techniciens de fusées, accompagnée de tout un train chargé de matériel. Von Braun pensait sans doute à son rêve de voyage spatial, mais il voulait certainement aussi être du côté des vainqueurs dans tout futur conflit. Avec les explosions des premières bombes nucléaires en 1945, le rôle militaire potentiel des fusées à longue portée change

d'ordre de grandeur. Toutefois, aux Etats-Unis, encore seuls à posséder l'arme nucléaire, les politiques et militaires ne s'inquiètent guère d'une menace venant de l'Union Soviétique encore dans les ruines de l'après-guerre. On n'a aucune idée d'une course à l'espace. Néanmoins, dès 1946, l'aviation de l'Armée établit le projet *RAND* (*Research and Development*), produisant un premier rapport sur un projet de satellite artificiel de la Terre (*Preliminary Design of an Experimental World-circling Spaceship*).

Dans la communauté scientifique américaine, il n'y avait pas d'unanimité sur l'intérêt des fusées intercontinentales, des satellites ou du vol spatial. Néanmoins, malgré les réductions des crédits militaires entre 1945 et 1950, l'Armée, avec l'équipe de von Braun ainsi que presque 200 V-2 capturés, procède entre 1946 et 1952 au tir d'une soixantaine de fusées, certaines portant un *WAC-Corporal* en deuxième étage (Fig. 7), la plupart depuis la base de *White Sands* (Alamogordo, Nouveau Mexique), quelques autres du Cap Canaveral (Floride), et une depuis le porte-avions *Midway* dans l'Atlantique.

L'objectif de l'Armée était surtout d'acquérir de l'expérience pour le développement de missiles militaires, mais elle a accepté d'embarquer des charges utiles scientifiques dès le 2<sup>e</sup> lancement, le 16 avril 1946. En plus du *Naval Research Laboratory*, de nombreux laboratoires industriels et universitaires ont fait voler des instruments pour la mesure des rayons cosmiques, du rayonnement solaire ultraviolet, et des propriétés physiques de la

haute atmosphère. On a aussi embarqué quelques expériences de biologie, et on a fait de nombreux essais de photographie de la Terre depuis l'espace. En 1947, un vol de V-2 fournit la première photographie de la couverture nuageuse à partir d'altitudes supérieures à la centaine de kilomètres, bien plus que ce que l'on pouvait atteindre par ballon (Fig. 8). Avant 1951, un rapport secret *RAND* avait examiné l'intérêt d'utiliser des satellites artificiels pour la surveillance météorologique, définissant les caractéristiques nécessaires de telles plateformes. L'idée des satellites était donc en l'air quelques années avant *Sputnik*.

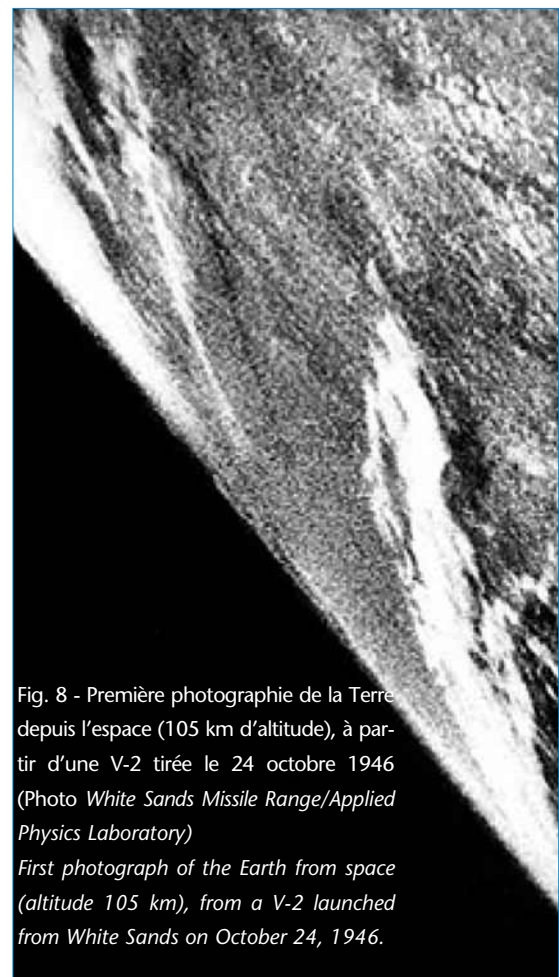
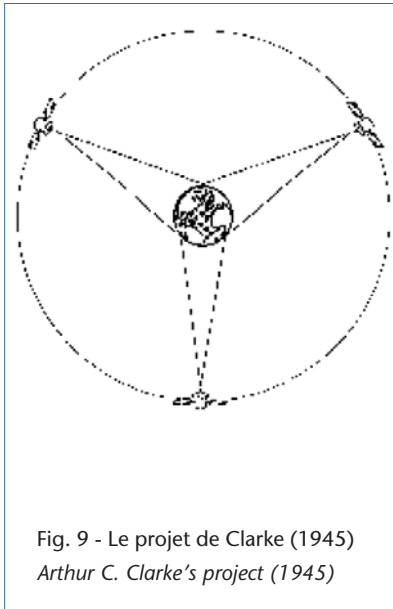


Fig. 8 - Première photographie de la Terre depuis l'espace (105 km d'altitude), à partir d'une V-2 tirée le 24 octobre 1946  
(Photo *White Sands Missile Range/Applied Physics Laboratory*)

*First photograph of the Earth from space (altitude 105 km), from a V-2 launched from White Sands on October 24, 1946.*



Rappelons aussi que déjà en 1945, Arthur C. Clarke (1917- ), alors instructeur radar à la *Royal Air Force*, aujourd'hui auteur renommé de science-fiction, avait écrit deux articles dans le magazine *Wireless World* dans lesquels il «invente» en quelque sorte le concept d'utiliser des satellites en orbite géostationnaire (Fig. 9 : satellites en orbite circulaire à 35 800 km dans le plan équatorial, tournant autour de la Terre en 24 heures) comme relais de télécommunications, trois plates-formes de ce type pouvant assurer une couverture mondiale (à part les zones polaires). Clarke les imaginait en stations habitées, mises en service à partir de 1995; dans la réalité on assure ces fonctions avec des satellites non habités, et cela depuis 1975 déjà.

Tout en poursuivant les essais de fusées au *White Sands*, l'Armée installe le groupe de von Braun au *Redstone Arsenal* (devenu le *NASA Marshall Space Flight Center*) à Huntsville dans l'Alabama, où il

développe la fusée Redstone. En même temps, von Braun continue de rêver de vols habités, et il propose en 1946 un projet de station spatiale, en forme toroïdale et en rotation pour fournir une pesanteur artificielle. Mais depuis, américains comme soviétiques se sont passés de pesanteur artificielle dans leurs stations habitées, et il n'y en a pas non plus dans l'assemblage de la Station Spatiale Internationale.

Bien des scientifiques américains avaient conscience du potentiel énorme de l'espace scientifique, et en préparant l'Année Géophysique Internationale ils ont réclamé le développement de satellites artificiels pour l'observation scientifique. A la suite de la réunion de 1954 à Rome, l'administration Eisenhower prend l'engagement de construire et de lancer des satellites dans le cadre de l'AGI, insistant sur le caractère civil et non militaire du projet. Avec une charge très faible d'instruments sophistiqués, la fusée *Vanguard* devait être construite *indépendamment* de la fusée *Redstone* de l'Armée (de terre) développée par von Braun comme de la fusée Atlas de l'Armée de l'Air (mais avec un lanceur de premier étage très similaire il est vrai au missile *Viking* de la Navy).

Le lancement de Spoutnik bouscule ce projet, faisant monter la pression pour un lancement immédiat d'un satellite américain. En 1957, après le choc des premiers essais de bombes nucléaires soviétiques en 1949, après la guerre de Corée, après la répression de la révolution hongroise, la course aux armements entre les Etats-Unis et l'Union Soviétique s'accélère.

*Spoutnik* fait voler en éclats la confiance des Américains en leur supériorité technique. Les 84 kg de la sphère, la brillance dans le ciel crépusculaire de son lanceur en orbite, confirment que les Soviétiques disposent de fusées extrêmement puissantes.

Que des satellites soviétiques puissent survoler (et photographier ?!) impunément les bases militaires américaines et que des missiles armés de charges thermonucléaires puissent atteindre le territoire national, met sérieusement en question la sécurité nationale. Le 10 octobre la question fait l'objet d'une réunion du *National Security Council*. Le 3 novembre (40<sup>e</sup> anniversaire de la révolution bolchevique), les Soviétiques réussissent un deuxième lancement, Spoutnik-2 avec le chien Laïka à bord et une masse totale de 508 kg en orbite. Les Etats-Unis cherchent alors à tout prix à lancer *Vanguard* avant la fin de l'année. Le prix sera élevé. Le 6 décembre 1957, sous les yeux de millions de téléspectateurs aux Etats-Unis et ailleurs sur le globe, la fusée *Vanguard* s'élève lentement du tarmac du Cap Canaveral, pour basculer et exploser 6 secondes après. Venant après les deux réussites soviétiques, quelle catastrophe !

Le projet *Vanguard*, séparé des projets militaires, apparaît alors comme un luxe dangereux. Lors d'une réunion secrète avec le Secrétaire (ministre) de l'Armée et d'autres officiels à Washington le 29 octobre, von Braun qualifie la première spatiale soviétique de «tragédie nationale», et déclare que son équipe de

## LES DÉBUTS DE L'ÈRE SPATIALE

la fusée *Redstone (Jupiter-C)* de l'Armée peut sans difficulté mettre en orbite un satellite de taille. On lui donne le feu vert, et le 31 janvier 1958, moins de quatre mois après *Sputnik-1*, on lance avec succès le premier satellite américain, *Explorer-1*. La charge utile de ce satellite

comporte un compteur Geiger fourni par James Van Allen (1914-2006) et ses collègues de l'Université d'Iowa, pour mesurer la variation du flux de rayons cosmiques avec la latitude géomagnétique. L'orbite du satellite, très elliptique, atteignait 2500 km à l'apogée ; les signaux

indiquaient un flux de rayons cosmiques extrêmement fort à des altitudes voisines de 1200 km, très faible à d'autres. Avec *Explorer-3*, lancé avec succès le 26 mars 1958, des données plus complètes démontrent que la Terre est entourée de ceintures de radiations (parti-

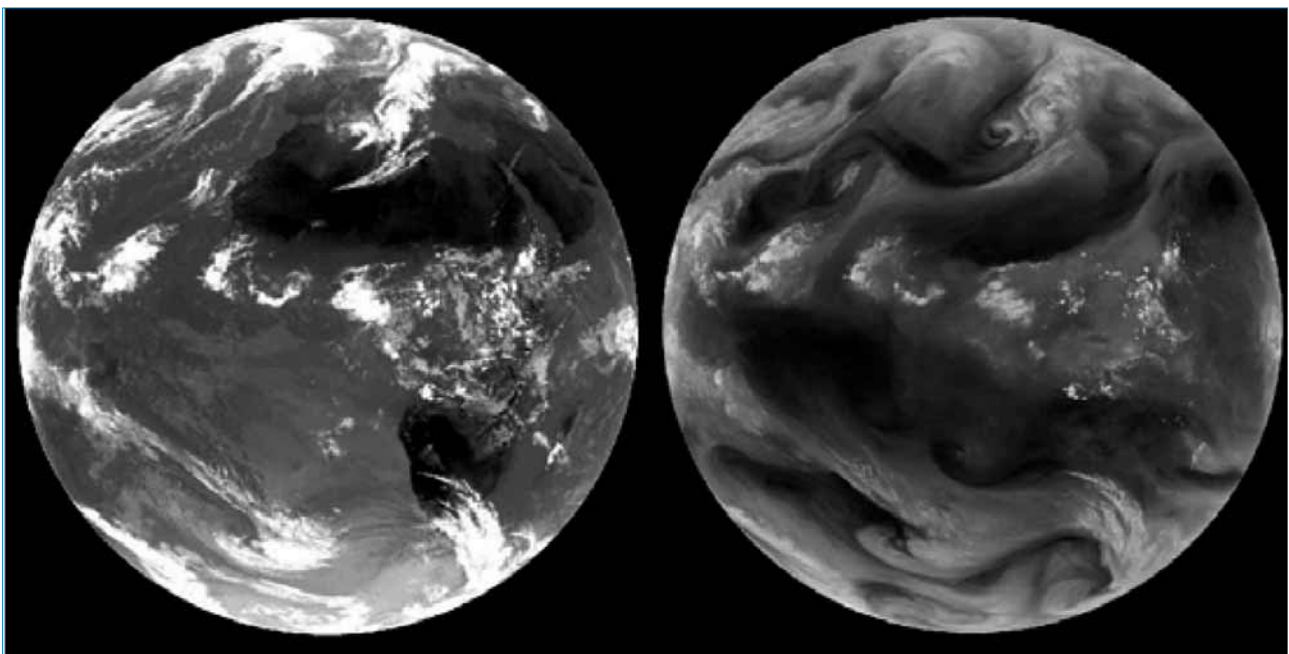


Fig. 10 - Deux images de la même moitié de la Terre (images Meteosat du 20 octobre 1998 à 12h TU). Source : R. Kandel, échelles de brillance arbitraires adaptées d'images Eumetsat. Le plus clair correspond au signal infrarouge thermique le plus faible, donc aux sommets froids de nuages élevés. • A gauche, l'image dans le canal infrarouge («fenêtre» vers 11  $\mu\text{m}$  de longueur d'onde) révélant en noir les surfaces continentales les plus chaudes (notamment les déserts du Sahara, de la Namibie et de l'Arabie) là où il n'y a pas de nuages. • A droite, l'image dans le canal «vapeur d'eau» (vers 6  $\mu\text{m}$ , dans la bande d'absorption de la molécule  $\text{H}_2\text{O}$ ,) montre les mêmes nuages élevés en blanc. Le plus noir correspond à des régions de faible humidité dans la haute troposphère, permettant l'évasion du rayonnement infrarouge des couches moins froides à quelques km d'altitude, mais les températures y sont bien plus faibles que celles des surfaces les plus chaudes. On ne voit pas les contours des continents. L'effet de serre naturel de la vapeur d'eau bloque l'évasion vers l'espace du rayonnement IR émis par les surfaces et les couches basses de l'atmosphère.

*Two simultaneous images of the same Earth disk (Meteosat, October 20, 1998, 12h UT). Source: Eumetsat, image brightness scales adapted by R. Kandel. White (on the disk) corresponds to the weakest thermal infrared signals, i.e. to cold high cloud tops.*

*• On the left: image in the infrared "window" channel (around 11  $\mu\text{m}$  wavelength); in black, the warmest cloud-free land surfaces (in particular the Sahara, Namibian and Arabian deserts). • On the right: the image in the "water-vapor" channel (around 6  $\mu\text{m}$  in the absorption band of the  $\text{H}_2\text{O}$  molecule) shows the same high clouds as white. The darkest areas correspond to regions with low water vapor content in the upper troposphere, allowing escape of infrared radiation from warmer tropospheric levels at several km altitude, where however temperatures are still significantly lower than at the surface. Coastlines do not appear. This natural water-vapor greenhouse effect prevents direct escape to space of 6- $\mu\text{m}$  IR radiation emitted by the surface and low atmospheric levels.*

cules chargées d'origine solaire, piégées par le champ magnétique terrestre), celles qu'on appelle les ceintures de Van Allen. A vrai dire, *Sputnik-2* avait déjà obtenu des mesures qui auraient pu faire soupçonner l'existence de ces ceintures entre 500 et 700 km d'altitude, mais la découverte est bien celle de Van Allen à l'aide des premiers *Explorers*.

### L'aventure spatiale depuis 1958

La course vers l'espace, commen-

cée comme un sprint des deux superpuissances, s'intensifie le 12 avril 1961, avec le premier vol habité de Yuri Alexeïevitch Gagarine (1934-1968), puis le 20 juillet 1969 avec le premier pas sur la Lune de Neil Armstrong (1930-). Au cours des années suivantes, d'autres pays – notamment la France, puis d'autres pays européens, le Japon, la Chine, l'Inde, le Brésil – se mettent dans la course, devenue un marathon de masse. Si parfois certains participants se fatiguent, si les budgets n'augmentent pas en per-

manence, aucun pays n'envisage d'abandonner la course. Cinquante ans après, l'ère spatiale n'en est encore qu'à ses débuts.

C'est en 1977 que l'Europe lance son premier satellite météorologique - *Meteosat-1* - en orbite géostationnaire, positionné au-dessus de l'intersection du méridien de Greenwich et l'Equateur. Les premières études de l'instrumentation pour ce satellite ont été faites en France, notamment au Laboratoire de météorologie dynamique du

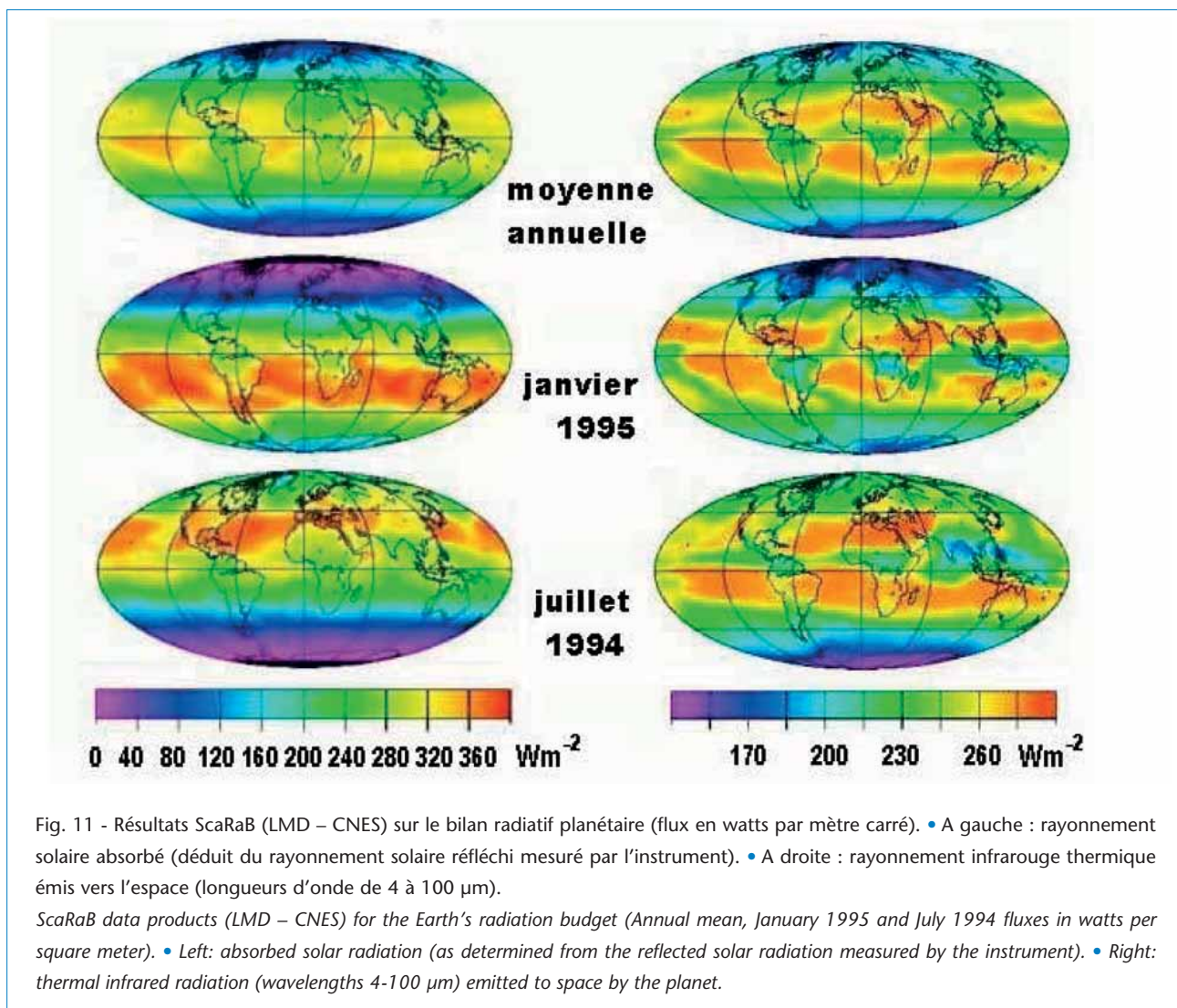


Fig. 11 - Résultats ScaRaB (LMD – CNES) sur le bilan radiatif planétaire (flux en watts par mètre carré). • A gauche : rayonnement solaire absorbé (déduit du rayonnement solaire réfléchi mesuré par l'instrument). • A droite : rayonnement infrarouge thermique émis vers l'espace (longueurs d'onde de 4 à 100  $\mu m$ ).

*ScaRaB data products (LMD – CNES) for the Earth's radiation budget (Annual mean, January 1995 and July 1994 fluxes in watts per square meter). • Left: absorbed solar radiation (as determined from the reflected solar radiation measured by the instrument). • Right: thermal infrared radiation (wavelengths 4-100  $\mu m$ ) emitted to space by the planet.*

CNRS (laboratoire sélectionné du Centre national d'études spatiales). *Meteosat* a été le premier satellite météorologique géostationnaire à comporter le canal «vapeur d'eau» à 6,3 micromètres de longueur d'onde : il révèle l'humidité et la circulation de la haute troposphère, permettant aussi une belle illustration de l'effet de serre de la vapeur d'eau (Fig. 10). Il est le premier d'une longue série très réussie surveillant le secteur euro-africain. Des *Meteosat* de réserve ont aussi pu être prêtés pour pallier des pannes des géostationnaires américains sur le secteur Atlantique (important pour surveiller le développement et les trajectoires de cyclones tropicaux), et pour l'observation du secteur de l'Océan Indien, mal assurée par l'URSS et l'Inde.

### Implication personnelle

Pour ma part, et malgré mes études, recherches et enseignement en astronomie et astrophysique à partir de 1958, j'étais resté surtout spectateur des affaires spatiales jusqu'en 1977. C'est en 1977 donc que je deviens moi-même observateur spatial de la planète Terre, d'abord par *Meteosat* interposé, participant ensuite à l'observation du bilan radiatif de la Terre grâce au soutien du CNES et en coopération avec la NASA (*ERBE* - *Earth Radiation Budget Experiment*, *CERES* - *Clouds and the Earth's Radiant Energy System*). A partir de 1986, nous développons l'instrument ScaRaB (Scanner for Radiation Budget) dans le cadre de la coopération spatiale franco-soviétique (devenue par la suite franco-russe, avec aussi une participation allemande), avec des vols sur des satellites russes *Météor-3M* en 1994-

1995 et 1998-1999. Une version modifiée de cet instrument doit voler sur *Megha-Tropiques* (coopération CNES-ISRO - Agence spatiale de l'Inde) en 2009.

C'est seulement avec l'observation spatiale que l'on peut observer la répartition géographique, le cycle annuel, les variations interannuelles, et les tendances à plus long terme des échanges d'énergie entre la Terre et l'espace, en particulier la réflexion du rayonnement solaire (l'effet «parasol») et l'émission du rayonnement infrarouge thermique (déterminée par l'effet de serre). C'est par la pollution et par les émissions de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre, que les activités humaines modifient ces échanges et perturbent de plus en plus fortement le climat. La plus grande incertitude dans l'estimation de la sensibilité du climat à nos perturbations vient des interactions entre le rayonnement, les nuages et les particules. Pour mieux observer ce qui se passe au sein des nuages, on a lancé les satellites *Cloudsat* et *Calipso* (coopération CNES-NASA) comportant un radar et un lidar (radar laser), et les agences spatiales européenne (ESA) et japonaise (JAXA) préparent la mission *EarthCARE* (*Cloud-Aerosol-Radiation Explorer*).

Pour surveiller les activités humaines et comprendre comment elles affectent l'état de notre planète-maison, il faut poursuivre et améliorer l'observation spatiale de la Terre.

**Robert Kandel**

### Quelques sites Internet :

[www.cnes.fr](http://www.cnes.fr) - Centre national d'études spatiales  
[www.roskosmos.ru](http://www.roskosmos.ru) - (en russe et en anglais) Agence spatiale de la Fédération de Russie  
[www.nasa.gov](http://www.nasa.gov) - (en anglais) - National Aeronautics and Space Administration (USA)  
<http://history.nasa.gov> - (en anglais) - site de la NASA sur l'histoire  
[www.esa.int](http://www.esa.int) - (en anglais) European Space Agency - Agence spatiale européenne  
[www.eumetsat.int](http://www.eumetsat.int) - (en anglais et en partie en français) -Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques  
[www.russianspaceweb.com](http://www.russianspaceweb.com) (en anglais) site sur les activités spatiales soviétiques/russes  
[www.energia.ru](http://www.energia.ru) - (en russe et en anglais) S.P. Korolev RSC Energia (Russie)  
[www.jaxa.jp](http://www.jaxa.jp) - (en japonais et en anglais) Japanese Aerospace Exploration Agency  
[www.isro.org](http://www.isro.org) - (en anglais et en hindi) Indian Space Research Organization  
[www.inpe.br](http://www.inpe.br) - (en portugais brésilien et en anglais) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
[www.cssar.ac.cn](http://www.cssar.ac.cn) - (en chinois et en anglais) Centre for Space Science and Applied Research - Chinese Academy of Sciences  
[www.space.gc.ca](http://www.space.gc.ca) - (en français et en anglais) Agence spatiale canadienne  
<http://smc.cnes.fr/MEGHA> - Projet de satellite franco-indien *Megha-Tropiques* qui doit être lancé en 2009, et auquel participe le Laboratoire de météorologie dynamique du CNRS ainsi que le CETP et le LERMA.