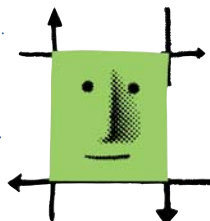


Les déchets dans l'espace



ROBIN DES BOIS

J

u

i

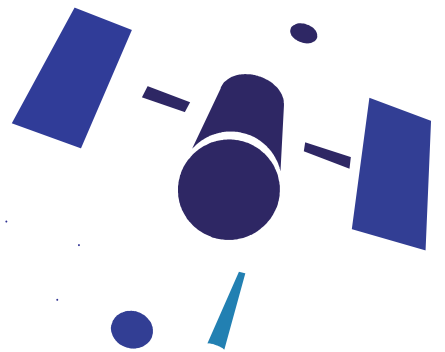
n

2

0

1

1



SOMMAIRE

Introduction	3
I- Le milieu spatial	5
II- Les déchets spatiaux	6
n°1 : Les lanceurs	6
n°2 : Les résidus de combustion	6
n°3 : Les déchets d'exploitation	7
n°4 : Les Satellites Hors d'Usage	7
n°5 : Les déchets de fragmentation	8
5a- Explosions accidentelles	8
5b- Collisions accidentelles	8
5c- Destructures volontaires	9
n°6 : L'érosion spatiale	10
III- Inventaires des déchets spatiaux	11
1- Déchets en catalogue	11
2- Déchets hors catalogue	13
IV- Les orbites basses (Low Earth Orbit, LEO)	14
1- Trafic	14
2- Satellites en activité, fonctions, nationalités	14
3- La Station Spatiale Internationale (ISS)	17
4- Les déchets en orbites basses	20
5- Les déchets de l'ISS (International Space Station)	22
V- Les orbites moyennes (Medium Earth Orbit, MEO)	26
1- Trafic	26
2- Satellites en activité, fonctions, nationalités	26
3- Les déchets en orbites moyennes	26
4- Les pelotes d'aiguilles de West-Ford	27
VI- L'orbite géostationnaire (Geostationary Earth Orbit, GEO)	28
1- Trafic	28
2- Satellites en activité, fonctions, nationalités	29
3- Les déchets en orbite géostationnaire	31
VII- Les déchets et les bactéries terrestres sur la Lune	33
1- Les missions Apollo	34
2- Crash tests sur la Lune	37
VIII- Industrie spatiale et nucléaire	40
IX- Les rentrées sur Terre	44
1- Le boomerang radioactif	44
2- Le boomerang métallique	52
X- La réglementation internationale	58
XI- Les mesures d'atténuation (« mitigation guidelines »)	61
XII- L'entretien Robin des Bois - ESA	62
Conclusion	64
Carte 1 - Schéma des orbites terrestres	5
Carte 2 - Les déchets nucléaires dans le système lunaire et au-delà	40
Carte 3 - Missions spatiales : retombées sur Terre des sources radioactives	44
Carte 4 - Le retour de l'ATV <i>Johannes Kepler</i>	57

Introduction

La conquête spatiale a réussi un exploit considérable. En 50 ans, l'humanité a disséminé dans l'espace des milliards de déchets d'origine terrestre. « L'océan d'en haut » comme l'appelait Victor Hugo est victime d'une pollution industrielle d'un genre nouveau, foudroyant, proliférant et durable du même type en plus irrécupérable que la pollution de l'océan d'en bas par les déchets de plastique, de polystyrène et d'hydrocarbures.

La durée de vie d'un satellite n'est guère plus longue que celle d'une voiture, une bonne dizaine d'années. Sur Terre, la gestion des Véhicules Hors d'Usage -VHU- et de leurs accessoires est un casse-tête. Dans l'espace, la gestion des Satellites Hors d'Usage -SHU- est dominée par le « chaque Etat pour soi » et le sans gêne à l'état pur. La gestion des déchets de toutes les catégories est une science en même temps que le miroir des comportements collectifs. Les déchets spatiaux n'échappent pas à la règle sauf que personne et surtout pas les exploitants ne les ont vus venir. Dans les années 1970, les premières détections analytiques de traces de titane et d'aluminium sur des satellites cobayes ont été attribuées à des éjections solaires ou à la chimie des astéroïdes alors qu'elles provenaient des peintures et des résidus de combustion des engins spatiaux. Les industriels de l'espace n'ont pas non plus anticipé l'expansion géométrique et la démultiplication en cascade des déchets issus de collision et d'explosion orbitales. En 50 ans, les activités humaines dans l'espace ont créé sur les orbites basses et hautes de la Terre plus de déchets que le système solaire n'y a injecté de météorites en plusieurs milliards d'années.

Aujourd'hui, aucun vol spatial habité ou satellite ou encore mission interplanétaire n'est à l'abri d'une collision destructrice avec un déchet. Sur Terre, nul non plus n'est à l'abri d'un déchet tombé de plus haut que le ciel, d'une rentrée incontrôlée sur la planète mer, pas même une baleine. Les déchets spatiaux contribuent à la pollution lumineuse de l'espace et perturbent les observations des astronomes. Les réacteurs nucléaires embarqués sur les satellites masquent le bruit de fond radioactif du cosmos en émettant des flux de rayons gamma artificiels même quand les satellites ne sont plus en fonction.

Tout ça pour internet, GPS, téléphone et radio satellitaires, autant d'activités commerciales, de moyens de communication et de divertissement qui rapportent infiniment d'argent et produisent des déchets à l'infini sans la moindre contrainte à verser une TGAP -Taxe Générale sur les Activités Polluantes- spatiale. Le droit spatial lui aussi est en panne ; les étages susceptibles de mettre en orbite une convention internationale sur la prévention et la gestion des déchets dans l'espace sont très loin d'être sur le pas de tir. Seule lueur d'espoir, les logisticiens de l'espace comprennent désormais l'urgence à agir pour nettoyer les écuries spatiales et prévenir à la source la production de déchets.

Débris et déchets

L'ONU et la communauté spatiale emploient en anglais et en français le mot débris pour désigner les objets abandonnés dans l'espace. Les débris sont consécutifs à des démolitions, à des catastrophes ou cataclysmes ou s'appliquent à des vestiges ou traces géologiques ou fossiles.

L'ONU définit ainsi les débris : « On entend par débris spatiaux tous les objets créés par l'Homme, y compris des fragments ou éléments de ces objets, que leurs propriétaires puissent être identifiés ou non, qu'ils se trouvent en orbite terrestre, ou qu'ils reviennent dans les couches denses de l'atmosphère, de caractère non fonctionnel et dont on ne peut raisonnablement escompter qu'ils puissent trouver ou retrouver la fonction pour laquelle ils ont été conçu ou toute autre fonction pour laquelle ils ont été ou pourraient être autorisés ».

Dans la réglementation européenne, « toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire »¹ est considéré comme un déchet.

Sur le fond, les définitions onusienne et européenne se rejoignent. Dans la forme, le mot débris est beaucoup plus léger si l'on peut dire, et n'engage pas à en rechercher systématiquement l'origine. Dans le cadre de ce rapport qui vise à la responsabilisation des opérateurs publics ou privés, le terme juridique de déchets lui a été préféré.

« Les déchets dans l'espace » de Robin des Bois est le premier rapport à porter sur l'ensemble de cette thématique nouvelle le regard d'une Organisation Non Gouvernementale environnementale. Les déchets dans l'espace, l'utilisation des sources radioactives et les risques mécaniques et environnementaux des rentrées sur Terre sont une préoccupation majeure pour Robin des Bois depuis 1987.

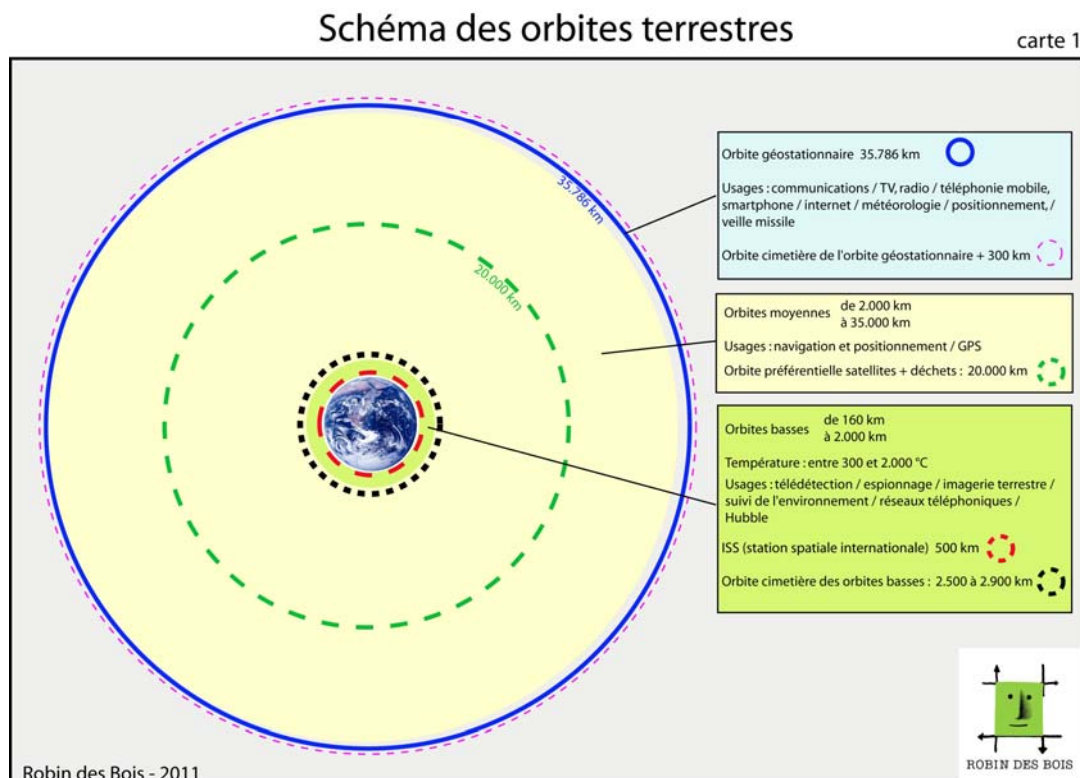
¹ Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets.

I- Le milieu spatial

Il n'existe pas de limite précise entre l'atmosphère terrestre et l'espace. La forme et les dimensions des couches supérieures de l'atmosphère sont en constante évolution en fonction de l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil, de la densité des gaz dans l'atmosphère, du champ magnétique terrestre et des tempêtes solaires. L'interface atmosphère / ionosphère est encore mesurable à 500 km d'altitude. Le réchauffement climatique et l'augmentation du taux de CO₂ dans l'atmosphère terrestre provoquent un refroidissement dans l'orbite basse où évolue la majorité des engins spatiaux.

La classification d'usage de l'exploration et de l'industrie spatiale distingue 3 trajectoires suivies par des satellites ou des déchets dans l'espace. Ces trajectoires sont qualifiées d'orbites :

- Les orbites basses se situent entre 160 et 2.000 km d'altitude. Elles permettent d'obtenir la meilleure résolution possible pour les instruments optiques et les détecteurs d'infrarouges.
- Les orbites moyennes se situent entre 2.000 et 35.000 km d'altitude. Elles sont essentiellement occupées autour de 20.000 km d'altitude par les constellations de satellites de navigation et de positionnement (systèmes GPS américain ou Glonass russe).
- L'orbite géostationnaire est scientifiquement définie : elle est à l'altitude de 35.786 km. Un engin placé sur cette orbite circulaire se déplace à la vitesse exacte de rotation de la Terre, ce qui le fait paraître immobile depuis tout observatoire terrestre. Cette caractéristique est essentielle pour les satellites de télécommunications et de diffusion de télévision. Les places y sont très chères !



II- Les déchets spatiaux

On distingue plusieurs types de déchets spatiaux :

- Les lanceurs.
- Les résidus de combustion.
- Les déchets d'exploitation.
- Les Satellites Hors d'Usage.
- Les déchets de fragmentation.
- L'érosion spatiale.

Déchets spatiaux n°1 : les lanceurs

1.899

L'injection du ou des satellites sur leur orbite est effectuée par le troisième étage du lanceur (Ariane, Titan, Delta...) – ou le quatrième étage pour les plus lourds, comme les fusées russes Proton-K. Ces structures de grandes dimensions comprenant un moteur et des réservoirs d'ergols sont abandonnées en orbite après séparation, souvent à une altitude importante, proche de l'orbite utile du satellite, ce qui leur assure une vie orbitale de plusieurs dizaines ou centaines d'années. La fusée Ariane 5 qui a lancé les satellites W3B et Bsat-3B le 28 octobre 2010 a ajouté ainsi un nouveau déchet, l'Etage Supérieur Cryotechnique de type A (ESCA), à 645,9 km d'altitude. Chaque lancement ajoute un étage supérieur de lanceur aux déchets spatiaux. 1.899 étages supérieurs de lanceurs étaient surveillés par l'US Space Surveillance Network le 24 novembre 2010.

Déchets spatiaux n°2 : les résidus de combustion

Plusieurs milliards

La plus importante source de déchets dans l'espace résulte de la combustion des moteurs à poudre employés dans les étages supérieurs des lanceurs, particulièrement pour injecter les satellites sur une orbite de transfert. L'instabilité de la combustion, surtout en fin de poussée, provoque l'éjection de nuages de particules résiduelles d'alumine (Al_2O_3) principalement sous forme de poussières - d'un diamètre de $0,1 \mu$ à 100μ -, et de scories pouvant atteindre plusieurs centimètres. Ces nuages polluent toutes les orbites, jusqu'à l'orbite géostationnaire, mais ils sont particulièrement nombreux sur les orbites basses. La taille des particules étant trop réduite pour qu'elles soient détectées et suivies, seuls des échantillonnages ponctuels et des estimations quantitatives ont été établis.



Scorie d'alumine produite par une navette spatiale. Photo NASA

En décembre 1996, au retour d'une mission de 19 jours, deux hublots de la navette *Columbia* présentent des impacts de particules et doivent être remplacés. L'analyse des résidus révèle que trois impacts ont été provoqués par des particules d'alumine. En 1997, une étude américaine évalue leur proportion à 86% sur un total de 1.000 points d'impacts relevés sur le Long Duration Exposure Facility (LDEF), un satellite scientifique de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) resté en orbite d'avril 1984 à janvier 1990 pour y réaliser des expériences, puis récupéré par la navette spatiale *Columbia*. Selon la NASA, les particules d'alumine issues de la combustion volontaire ou accidentelle des moteurs à poudre peuvent être estimées à plusieurs milliards.² Elles sont capables de mettre en danger les astronautes en mission extravéhiculaire et de perforer les panneaux solaires.

Déchets spatiaux n°3 : les déchets d'exploitation

Dans cette catégorie sont regroupés les différents éléments de fixation et de protection d'un satellite pendant sa phase de lancement (câbles, sangles, coiffe, capuchons d'objectifs...) et les dispositifs de séparation (ressorts, boulons explosifs...) qui sont éjectés dans l'espace au moment de son déploiement. Certains satellites sont ainsi accompagnés sur leur orbite par une noria d'accessoires. On trouve également des outils, des équipements et des fournitures diverses volontairement jetés par les astronautes ou accidentellement échappés lors de sorties extravéhiculaires ; dès la première sortie dans l'espace en 1965 hors de la capsule Gemini 4, l'astronaute Ed White perdait un gant, qui resta en orbite environ un mois avant de rentrer dans l'atmosphère³.

Durant ses quinze années de service en orbite de juillet 1986 à mars 2001, la station soviétique Mir rejeta des centaines de sacs de déchets par son sas arrière. La navette spatiale, qui à partir de 1995 amenait les astronautes américains à la station, dut à plusieurs reprises effectuer des manœuvres d'évitement dans le sillage de Mir. Ces sacs de déchets contenaient des vêtements (ils ne sont pas lavés à bord des stations spatiales), des tissus sanitaires, des emballages alimentaires, des reliefs de repas, des déchets d'expériences scientifiques...

Les déchets spatiaux n°4 : les Satellites Hors d'Usage

Environ 2.500

La durée de vie des satellites, c'est-à-dire leur période d'activité utile, varie de 1 à 10 ans en orbites basse et moyenne, et de 4 à 15 ans en orbite géostationnaire. C'est la quantité d'ergols embarqués pour réaliser les manœuvres d'ajustement de l'orbite et d'orientation des instruments qui détermine cette durée de vie, ainsi que l'épuisement des batteries et l'usure des équipements électroniques. Les satellites de télécommunications sont conçus pour fonctionner le plus longtemps, jusqu'à 15 ans. Les satellites d'observation, qui nécessitent de nombreuses séquences d'orientation consommant de l'énergie, ont une durée de vie plus brève. Certains satellites de reconnaissance -ou « satellites espions »- n'ont une durée de vie que de

² "Orbital Debris : A Chronology", David S. F. Portree, Joseph P. Loftus, Jr - NASA/TP-1999-208856, Janvier 1999.

³ "Orbital debris: a growing threat to space operations", Richard Crowther – Philosophical Transactions of the Royal Society – n°361, pp. 157-168, 2003.

quelques jours ou semaines : pour obtenir des détails optiques d'environ 10 cm ou moins, l'orbite doit être très basse, et le frottement atmosphérique est tel que les ergols embarqués s'épuisent vite à corriger trajectoire et altitude.

A la fin de leur période d'activité les satellites sont en majorité abandonnés sur leur orbite, devenant des déchets destinés à rentrer dans l'atmosphère terrestre ou à percuter un autre déchet spatial à plus ou moins long terme. Certaines agences spatiales commencent depuis les années 2000 à appliquer des mesures « d'atténuation » des déchets, qui font appel à des rentrées contrôlées par du carburant résiduel pour accélérer le retour sur Terre des satellites en orbites basses, ou au transfert vers une « orbite-cimetière ».

Déchets spatiaux n°5 : les déchets de fragmentation

5a - Explosions accidentelles

Si des fractions d'ergols résiduelles restent piégées dans les réservoirs, il existe un fort risque d'explosion à cause des fuites provoquées par les contraintes thermiques ou des rayonnements ultraviolets et ionisants sur les structures en aluminium. Chaque explosion ajoute des centaines ou des milliers de déchets à l'environnement spatial, appelés déchets de fragmentation. Le 13 novembre 1986 le troisième étage d'une fusée Ariane 1 explosait en 489 morceaux à environ 800 km d'altitude⁴. L'étage supérieur d'une fusée américaine Pegasus qui a explosé le 3 juin 1996 à 625 km d'altitude a généré plus de 750 déchets supérieurs à 10 cm distribués entre 250 et 2.500 km d'altitude, en dépit de ses dimensions modestes (93 cm de long et 97 cm de diamètre)⁵. Le réservoir contenait entre 5 et 8 kg d'hydrazine. Il était constitué de carbone composite qui lors de l'explosion s'est fragmenté en plusieurs millions d'aiguilles de 0,4 à 1 mm de long⁶. L'une des plus importantes explosions s'est produite le 19 février 2007 au-dessus de l'Australie, lorsqu'un propulseur Briz-M s'est désintégré avec ses réservoirs de 5 t d'ergols presque pleins. Cet élément supérieur d'une fusée russe Proton lancée le 28 février 2006 avait été abandonné avec sa charge, le satellite Arabsat-4A, après qu'un dysfonctionnement ait conduit à l'arrêt du moteur au bout de quatre minutes de poussée. Au moins 1.100 déchets de plus de 10 cm en ont résulté. 92 sont déjà rentrés dans l'atmosphère, dont 88 en 2010. Une panne similaire est arrivée le 14 mars 2008 au propulseur Briz-M qui transportait le satellite Americom AMC-14. Chargé lui aussi d'une grande quantité d'ergols, le propulseur pourrait exploser dans un futur proche.

Plus de 200 explosions ont déjà été détectées.

5b- Collisions accidentelles

42.120 km/h

Les déchets de fragmentation sont aussi produits par des collisions accidentelles entre satellites actifs ou déchets ou entre déchets et déchets ou encore entre Satellites Hors d'Usage et déchets. Toutes les combinaisons de collision sont

⁴ « History of On-orbit Satellite Fragmentations » 14th Edition, Orbital Debris Program Office - NASA/TM-2008-214779, juin 2008.

⁵ « History of On-orbit Satellite Fragmentations » 14th Edition, *op. cité*.

⁶ « Characterization of the breakup of the Pegasus rocket body 1994-029B », M. Matney et T. Settecerry – Proceedings of the Second European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 17-19 March 1997, (ESA SP-393, mai 1997).

possibles. Les collisions peuvent concerner deux objets circulant sur la même orbite, mais en sens inverse.

Les collisions provoquent des nuages ou des brouillards de déchets, qui se dispersent au fil du temps tout autour de la Terre. Huit collisions ont été enregistrées depuis 1991. La première à avoir été détectée est française : le 24 juillet 1996, le petit satellite militaire Cerise (50 kg), contrôlé par la Délégation Générale à l'Armement, était percuté à 14,8 km/s par un déchet attribué par les Etats-Unis au troisième étage d'une fusée Ariane qui avait explosé dix ans auparavant. L'accident a sectionné une antenne de 6 m de long, créant un déchet supplémentaire et limitant fortement les performances de Cerise. Le 17 janvier 2005, une collision a été détectée à 885 km d'altitude au-dessus de l'Antarctique entre l'un des 300 déchets issus de l'explosion en mars 2000 du troisième étage d'une fusée CZ-4 chinoise, et le troisième étage abandonné d'un lanceur américain Thor.⁷ Ce dernier était en orbite depuis 31 ans. La plus grave des collisions est récente : le 10 février 2009 les satellites américain Iridium 33 (560 kg, en activité) et russe Kosmos 2251 (900 kg, hors d'usage) se percutaient à une vitesse de 42.120 km/h à 790 km d'altitude au-dessus de la Sibérie. Le choc dispersa 521 morceaux d'Iridium 33 et 1.267 morceaux de Kosmos 2251 de plus de 10 cm⁸. A la date du 31 décembre 2010, 74 déchets de Kosmos 2251 et 37 déchets d'Iridium 33 étaient retombés dans l'atmosphère, et des milliers d'éclats détectables de l'explosion sont encore en orbite sans pouvoir dénombrer les éclats inférieurs à 10 cm. Outre les 72 satellites de communications de la constellation Iridium, cette région de l'espace est parcourue par 3.300 autres objets inutiles qui s'assimilent à des déchets.

5c- Destrutions volontaires

Au moins 56 satellites ont été délibérément détruits depuis 1964. Il s'agit de satellites militaires, dont l'autodestruction est déclenchée par une charge pyrotechnique afin qu'aucun élément identifiable ne puisse être récupéré après leur rentrée atmosphérique. Dernier en date, le satellite russe Kosmos 2421 s'autodétruisait le 14 mars 2008, puis se fragmentait de nouveau les 28 avril et 9 juin à environ 400 km d'altitude, générant plus de 500 déchets détectables. La plupart sont déjà retombés sur Terre. Certains d'entre eux ont été projetés sur des orbites plus hautes, jusqu'à 900 km d'altitude et pourraient y rester des centaines d'années.

La Chine est un cas particulier : le très grand nombre de déchets dont elle est détentrice -3.492 le 31 décembre 2010-, pour seulement 103 satellites en activité ou arrivés en fin de vie, résulte de la destruction volontaire du satellite météorologique Feng-Yun 1C à 845 km d'altitude par un missile lancé depuis le sud de la Chine, le 11 janvier 2007. Le but était de valider un système d'armes antisatellites dérivé d'un missile balistique. L'explosion du satellite de 960 kg généra 3.037 déchets d'une taille supérieure à 10 cm pouvant être identifiés et suivis, et plus de 150.000 déchets supérieurs à 1 cm pouvant être quantifiés. Le nuage de déchets s'étend de 200 km à plus de 4.000 km d'altitude, croisant fréquemment l'orbite de centaines de satellites en activité, et de la Station Spatiale Internationale. De plus la majorité de ces déchets ont été projetés sur des orbites où leur durée de vie sera longue, se mesurant en dizaines voire en centaines d'années. Plus de la moitié des déchets ont été envoyés au-dessus de 850 km d'altitude. Qualifié de « pire contamination de

⁷ « Accidental Collision of DMSP R/B and Chinese Debris on 17 January 2005 », Orbital Debris Program Office – NASA Johnson Space Center, 7 février 2005.

⁸ "Orbital Debris Quarterly News" - Volume 14, Issue 3, juillet 2010.

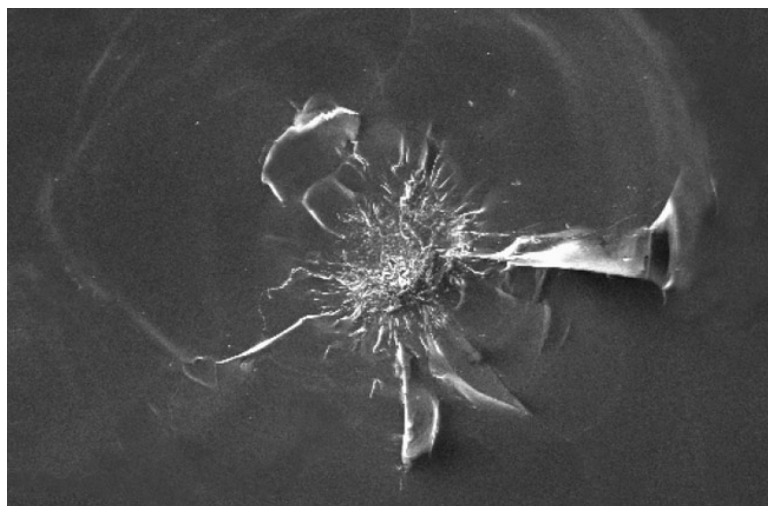
l'orbite basse de ces cinquante dernières années »⁹, ce test est un coup très dur pour le processus de réduction de la production des déchets spatiaux engagé au sein du Comité de Coordination Inter-Agences sur les Débris Spatiaux, dont l'agence spatiale chinoise (CNSA) est membre. Au 15 septembre 2010, soit plus de trois ans et demi après l'explosion, 97% des déchets étaient toujours en orbite, représentant à eux seuls 22% du total des déchets en orbite basse¹⁰. Des morceaux de Fengyun-1C retombent régulièrement sur Terre. Du 1^{er} janvier au 31 décembre 2010 Spacetrack en a dénombré 38.¹¹

La Missile Defense Agency des Etats-Unis a répliqué à ce fait d'armes un an plus tard en abattant un de ses vieux satellites militaires. Il se trouvait en orbite très basse et n'aurait laissé aucun déchet détectable en orbite. Tous les déchets de déconstruction seraient retombés dans l'atmosphère terrestre et la plupart auraient été incinérés.

Les déchets spatiaux n°6 : l'érosion spatiale

L'environnement orbital érode les peintures de revêtement et les surfaces externes des engins spatiaux : températures extrêmes (permanentes ou par cycles), rayonnements ultraviolets (UVA, UVB, UVC) générés par le soleil, rayonnements ionisants associés au vent solaire et aux ceintures de radiations autour de la Terre, oxygène atomique¹² en orbite basse, micrométéorites naturelles et déchets spatiaux arrachent des particules qui deviennent elles-mêmes des déchets possédant une forte énergie cinétique.

Une étude de caractérisation des impacts sur les hublots des navettes spatiales depuis la mission STS-50 (*Columbia*, du 25 juin au 9 juillet 1992) jusqu'à la mission STS-114 (*Discovery*, du 26 juillet au 9 août 2005) a été réalisée par le Johnson Space Center de la NASA. Au cours des 54 missions, 1.634 impacts ont été recensés sur les parties vitrées et ont nécessité le remplacement de 92 hublots.



Impact d'une écaille de peinture sur un pare-brise de la navette *Endeavour*. Photo NASA

⁹ "Orbital Debris Quarterly News" - Volume 11, Issue 2, avril 2007.

¹⁰ "Orbital Debris Quarterly News" - Volume 14, Issue 4, octobre 2010.

¹¹ http://www.space-track.org/perl/decay_query.pl

¹² L'oxygène atomique (O) est produit par la dissociation des molécules d'oxygène (O₂) présentes dans l'atmosphère par le rayonnement ultraviolet solaire.

L'analyse chimique détaillée des chocs a permis d'identifier 120 impacts de particules d'aluminium, 111 impacts d'écailles de peinture, 32 impacts d'acier, 6 impacts d'alumine, 2 de cuivre et 2 de plastique, soit 273 impacts. Tous ces métaux et ces matériaux sont des déchets spatiaux.

258 impacts de micrométéorites naturelles ont été attestés.

1.097 cratères n'ont pu être caractérisés à cause de l'absence de traces permettant d'identifier l'origine de l'agression.

Quant au radiateur de la navette *Endeavour*, il a été atteint par 317 particules, dont 53 ont perforé sa façade. Sur le radiateur, les cratères attribués aux déchets ont été provoqués par la collision avec 35 particules de peinture, 26 d'acier, 6 d'aluminium, 2 d'un alliage sodium/potassium, 1 de titane, 1 de liant pour peinture. Une particule d'urine, provenant vraisemblablement du système de purge sanitaire de la navette spatiale, a également pu être détectée.

III- Inventaires des déchets spatiaux

1- Déchets en catalogue

Les Etats-Unis, la Russie et la France en coopération avec l'Allemagne sont les seuls Etats disposant actuellement de capacités de détection et de suivi des déchets spatiaux.

En orbite basse, jusqu'à environ 1.000 km d'altitude, le suivi des trajectoires est possible à partir de 10 cm de diamètre.

En orbite moyenne et géostationnaire, le suivi est possible à partir d'une longueur d'1 m.

Les objets suivis sont qualifiés de « catalogués ».

Seuls les Etats-Unis rendent partiellement publiques les données qu'ils recueillent par le canal de Spacetrack qui répertorie les seuls objets dont l'origine est connue. Spacetrack dépend de l'United States Strategic Command -USSTRATCOM-. De plus, pour des raisons diverses de confidentialité au premier rang desquels le secret défense, environ 25 % des objets suivis ne seraient pas rendus publics¹³. C'est néanmoins le seul catalogue disponible - et actualisé quotidiennement - de satellites, d'étages supérieurs de fusées et de déchets spatiaux en orbite, ainsi que d'objets retombés sur Terre. Au 31 décembre 2010¹⁴, Spacetrack dénombrait 16.109 objets en orbite dont 3.506 « charges utiles », 10.702 déchets et 1.901 étages supérieurs de lanceurs, toutes orbites confondues.

La catégorie « charge utile » (payload) ne faisant pas de distinction entre les Satellites Hors d'Usage et les satellites en activité, il est nécessaire de soustraire les derniers pour obtenir le nombre de déchets suivis en orbite. Pour les satellites en activité, le seul décompte disponible est fourni par l'association américaine Union of Concerned Scientists (UCS), qui en dénombrait 958 au 1^{er} novembre 2010¹⁵. La liste

¹³ « Space Debris », Postnote n° 355 – UK Parliamentary Office of Science and Technology, mars 2010.

¹⁴ <http://www.space-track.org/perl/boxscore.pl>

¹⁵ http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/space_weapons/technical_issues/ucs-satellite-database.html

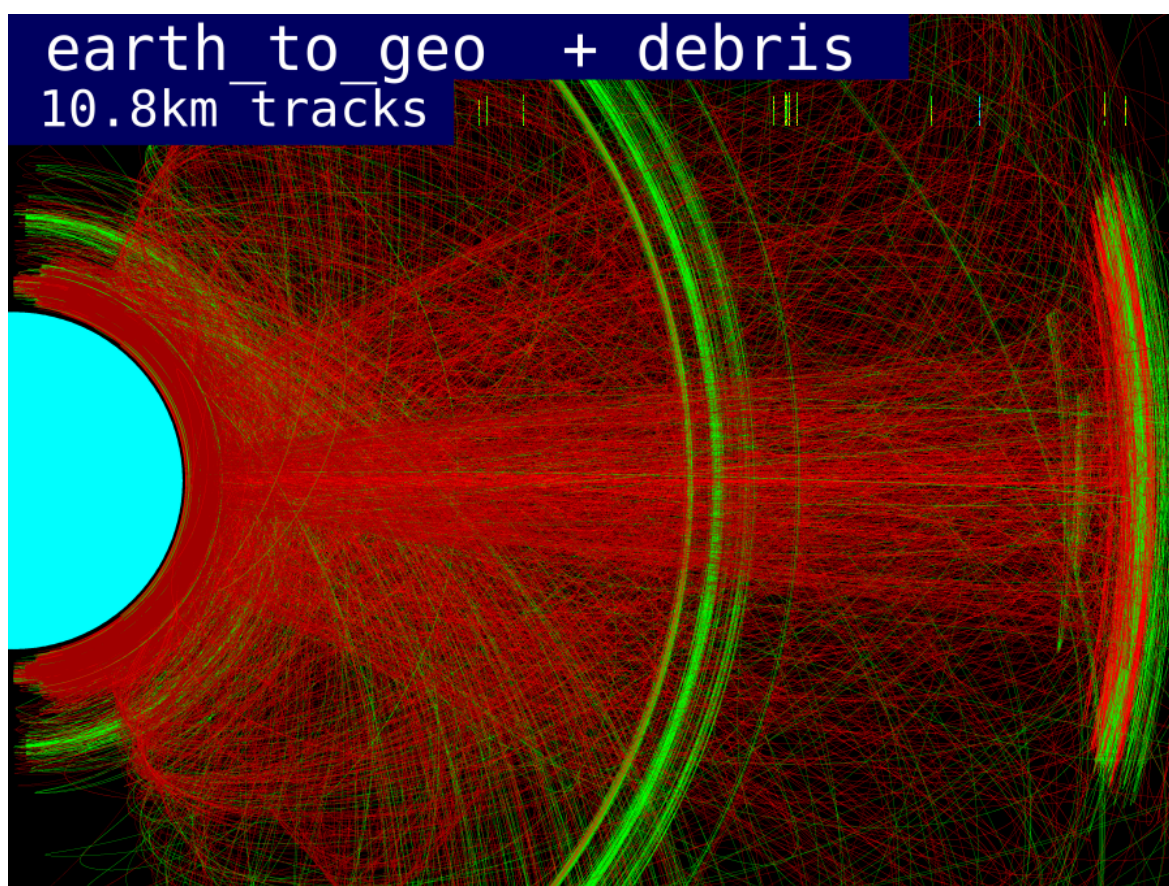
des lancements effectués en novembre et décembre 2010 permet d'ajouter 25 satellites.

En recoupant ces données on obtient donc le chiffre de 15.126 objets, dont 2.523 Satellites Hors d'Usage, 1.901 étages supérieurs de lanceurs et 10.702 déchets.

Au 31 décembre 2010, la Fédération de Russie en est le plus important détenteur, suivi des Etats-Unis, de la Chine, de la France, du Japon, et de l'Inde...

La NASA cite le chiffre de 19.000 déchets de plus de 10 cm en orbite¹⁶. Quant au Commandement Stratégique des Etats-Unis, il affirme qu'il existe « environ 21.000 morceaux de débris spatiaux sur des orbites terrestres variées, en d'autres mots environ 6.000 tonnes métriques de débris orbitent autour de la Terre. »¹⁷

L'Agence Spatiale Européenne (ESA) estime de 4.000 à 6.000 le nombre de déchets non catalogués par Spacetrack car d'origine inconnue et à une centaine les satellites militaires américains dont les coordonnées orbitales sont secrètes.



Représentation de tous les satellites actifs (en vert) et les déchets spatiaux de plus de 10 cm (en rouge) recensés au 26 août 2009 par Spacetrack, depuis les orbites basses jusqu'à l'orbite géostationnaire. Illustration Keith Lofstrom.

¹⁶ <http://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/>

¹⁷ “ 2010 Space Symposium – Keynote “, Frank A. Rose, Bureau of Arms Control, Verification and Compliance – United States Strategic Command, 3 novembre 2010.

2- Déchets hors catalogue

600.000

Les déchets entre 1 et 10 cm sont estimés à 600.000, toutes orbites confondues. De dimensions trop faibles pour être suivis par les radars, ils sont pourtant qualifiés de « population létale », car leur énergie cinétique est suffisante pour détruire ou gravement endommager un vaisseau spatial ou un satellite, mais leurs faibles dimensions rendent impossible le suivi de leur trajectoire par les radars de surveillance. Cependant, l'USSTRATCOM a les moyens de détecter les objets entre 5 et 10 cm mais ce catalogue reste confidentiel.

135 millions

Les fragments d'une taille de 0,1 à 1 cm sont estimés à 135 millions¹⁸. D'autres sources hésitent entre 35 millions et 150 millions. Ils sont encore capables de perforer la coque d'un engin, et d'y causer des dégâts pouvant réduire sa durée de vie ou ses performances, mais la pose de panneaux boucliers sur les éléments les plus fragiles peut empêcher ou atténuer les dégâts. Ces déchets sont qualifiés de « population à risque ». Pour un astronaute en sortie extravéhiculaire, même ces poussières et ces éclats sont un risque mortel : aucune combinaison spatiale n'est en mesure d'y résister. Lors de la dernière mission de réparation du télescope spatial Hubble, en mai 2009, la NASA estimait que les astronautes couraient 1 risque sur 89 d'être tués par un déchet au cours des opérations à l'extérieur de la navette spatiale.¹⁹ C'est peut-être cette appréhension qui a amené un astronaute réparateur à lâcher dans le vide spatial un panneau solaire qui à son tour, à ce jour, s'est sans doute fragmenté en une myriade de déchets.

Les publications scientifiques sur les déchets spatiaux ne manquent pas d'analogies frappantes pour illustrer l'énergie cinétique considérable qu'ils emportent. Par exemple « une sphère d'aluminium d'un diamètre de 1,3 mm, lancée à 10 km/s, possède l'énergie d'une balle de carabine 22 long rifle ou encore celle d'une boule de pétanque lancée à 100 km/h. »²⁰ En version anglo-saxonne cela donne : « Un fragment de débris spatial de 2 mm entrant en collision à 10 km/s équivaut à être percuté par une balle de cricket à 100 km/h. Un fragment de 10 mm à la même vitesse équivaut à être percuté par une grosse moto roulant à 100 km/h. »

Le Centre d'Etudes sur les Débris Orbitaux et les Rentrées, financé par l'U.S. Air Force, augmente la taille du déchet : « Une sphère d'aluminium de 1 cm de diamètre est comparable à un coffre-fort de 400 livres [181 kg] voyageant à 60 mph [96 km/h]. Dans son rapport 2009 sur la sécurité spatiale, l'association de scientifiques canadiens Spacesecurity.org affirme que « L'énergie cinétique d'un objet de 1 g percutant un satellite à la vitesse de 12 km/s (vitesse relative caractéristique entre deux objets dans l'espace proche de la Terre) équivaldrait à jeter une machine à laver du toit d'un immeuble de 100 m de haut. »

Et elle ajoute : « Un débris pas plus gros que 10 cm de diamètre emporte l'énergie cinétique d'un camion de 35 t roulant à 190 km/h. »²¹

¹⁸ Rapport « La sécurité européenne face au problème des débris spatiaux », Document A/2073, 17 juin 2010. Assemblée européenne de sécurité et de défense.

¹⁹ « Trackers of Orbiting Junk », William Matthews – Defense News, 10 juin 2009.

²⁰ « La Pollution Spatiale sous Surveillance », p 67. Fernand ALBY ; Jacques ARNOULD ; André DEBUS – Editions Ellipses, 2007.

²¹ «Space Security 2009 », SPACESECURITY.ORG, août 2009.



Déchet spatial non identifié. Photo NASA / Associated Press

IV- Les orbites basses (Low Earth Orbit, LEO)

1- Trafic

Ce sont les plus utilisées : 470 satellites y seraient en activité selon le recensement de l'UCS (Union of Concerned Scientists) en date du 1^{er} novembre 2010²². Les altitudes les plus encombrées se trouvent entre 600 et 900 km, où circulent 291 satellites. Les orbites entre 1.400 et 1.500 km d'altitude sont également recherchées, avec 61 satellites en opération. La Station Spatiale Internationale évolue entre 300 et 500 km d'altitude.

2- Satellites en activité, fonctions, nationalités

Les flottes de satellites commerciaux de communications (téléphone, télévision, données numériques) ceignent la Terre en orbites basses :

- Iridium en déploie 72 entre 770 et 780 km d'altitude, Globalstar en possède 20 entre 800 et 900 km, et 35 autour de 1.400 km. Orbcomm dispose de 26 satellites autour de 800 km. Ces trois sociétés américaines dominent le marché.
- La société russe Smolensk Satellite (SmolSat) contrôle 8 satellites « Gonets » retransmettant Internet et le téléphone.

²²http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/space_weapons/technical_issues/ucs-satellite-database.html

- Le Riyadh Space Research Institute d'Arabie Saoudite a déployé 7 microsatellites de télécommunications de 12 kg destinés à des applications commerciales (stockage et relais de données), construits par les étudiants de la King Abdulaziz City for Science and Technology (KACST).
- La société américaine Aprize Satellite contrôle 2 satellites, auxquels s'ajoutent 4 autres appartenant à sa filiale Aprize Satellites Argentina. Cette flotte de microsatellites (12 kg chacun) est spécialisée dans la télésurveillance des puits de pétrole, de gaz, des pipelines et des cuves de stockage, ainsi que dans le suivi des conteneurs, des navires et des camions.

132 satellites civils exploités par des institutions gouvernementales ou des organismes internationaux évoluent sur les orbites basses. Il est parfois difficile de discerner si les missions officiellement annoncées pour certains d'entre eux sont bien « civiles » : la télédétection, la reconnaissance peuvent aussi être des activités d'espionnage.

- Le Japon, par exemple, possède une flotte de 5 satellites de reconnaissance IGS évoluant entre 484 et 492 km d'altitude en orbite héliosynchrone, et opérant directement pour le « Cabinet Satellite Intelligence Center » (CSIC), un organisme gouvernemental dépendant des services secrets (Cabinet Intelligence and Research Office).
- Le Royaume-Uni dispose d'un satellite « d'observation de la Terre » exploité en commun par le British National Space Centre, une institution civile, et le Ministère de la Défense.
- L'unique satellite iranien - Sina-1 -, appartenant à l'Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST), assure officiellement des tâches de « Télécommunications et Recherches » depuis son lancement le 27 octobre 2005 par une fusée russe depuis le cosmodrome de Plesetsk, en Sibérie²³. L'Iran déclare l'utiliser pour « Réaliser des images de l'Iran et pour surveiller les désastres naturels dans une nation sujette aux tremblements de terre. » Toutefois, en novembre 2005 Ahmad Talebzadeh - directeur de l'Agence Spatiale Iranienne -, déclarait à l'agence Associated Press : « Techniquement parlant, oui. Il peut surveiller Israël. Mais nous n'en avons pas besoin. Vous pouvez acheter sur le marché des photos satellites des rues israéliennes. »²⁴ Sina-1 effectue 14 orbites par jour autour de la Terre, à une altitude d'environ 700 km. La résolution optique de ses caméras est estimée à 50 m, ce qui fournirait à l'Iran une capacité limitée d'espionnage. Mais sa zone d'observation s'étend sur tout le Moyen-Orient.
- Le satellite égyptien Egyptsat-1 (ou Misrsat-1) lancé en 2007 transporte un dispositif de détection par infrarouge ainsi qu'un système d'imagerie multi spectrale à haute résolution. Il a une définition de 4 m. Pour certains experts israéliens le satellite collecte des informations sur Israël.²⁵ Le 19 juillet

²³ "The Iranian Space Program and Russian Assistance", Alexandr V. Nemetz, Robert W. Kurz - Journal of Slavic Military Studies, 22:87-96, Taylor & Francis Group, 2009.

²⁴ <http://www.haaretz.com/print-edition/news/iran-satellite-capable-of-spying-on-israel-1.174408>

²⁵ "Egypt to launch first spy satellite", Yaakov Katz - 15 janvier 2007, The Jerusalem Post.

2010, l'Autorité Nationale Egyptienne pour la Télédétection et les Sciences Spatiales perdait toute communication avec Egyptsat-1. Il a depuis été repéré par des stations de surveillance américaine et suédoise, mais les autorités égyptiennes n'ont aucun espoir d'en reprendre le contrôle.²⁶

- L'Inde possède 6 satellites de télédétection et d'observation de la Terre actuellement en orbites basses, contrôlés par l'Indian Space Research Organization (ISRO). Parmi les multiples tâches qui leurs sont assignées (contrôle de l'urbanisation, du couvert forestier, évaluation des rendements agricoles...) on remarque que CartoSat 2, qui orbite à 630 km d'altitude, réalise des images à haute résolution (80 cm) pour la « planification civile et autres besoins cartographiques ».
- La Chine déploie 33 satellites appartenant à de nombreuses institutions scientifiques et gouvernementales, dont 11 sont consacrés à la télédétection ou à la reconnaissance.
- Taïwan et les Etats-Unis se partagent le contrôle et l'exploitation des 6 satellites de télédétection de la série Cosmic/Formosat.
- Les Etats-Unis possèdent eux-mêmes 25 satellites civils en orbites basses affectés en majorité à la météorologie, aux sciences de la Terre et à l'astrophysique.
- L'Agence Spatiale Européenne dispose de 7 satellites, auxquels s'ajoute le télescope spatial Hubble exploité en collaboration avec la NASA, qui orbite depuis 1990 à 600 km d'altitude.

Autres Etats ou agences gouvernementales possédant un ou plusieurs satellites en activité en orbites basses au 31 décembre 2010 : Afrique du Sud (1), Algérie (2), Allemagne (4), Arabie Saoudite (3), Brésil (1), Canada (2), Corée du sud (1), Danemark (1), Emirats Arabes Unis (1), Espagne (3), France (3+ 1 en collaboration avec la NASA), Indonésie (1), Italie (1), Malaisie (1), Maroc (1, en collaboration avec l'Allemagne), Nigéria (1), Norvège (1), Russie (5), Suède (2), Thaïlande (1).

Trois satellites dédiés à la transmission des ondes radioamateurs sont opérationnels en 2010 : AMSAT-Echo, AMSAT-Oscar 7 (USA), et Hope Oscar 68 (Chine). Lancé par une fusée Delta le 15 novembre 1974, AMSAT-Oscar 7 est le doyen des satellites encore en activité, toutes orbites confondues. Ses performances déclinantes trahissent son âge : il n'est plus opérationnel qu'à la lumière du soleil, et cesse d'émettre à chacun de ses passages dans l'ombre de la Terre.

Dans le domaine de l'imagerie géo-spatiale et de la cartographie, la société allemande RapidEye AG dispose de 5 satellites, l'américaine DigitalGlobe de 3, la française (incluant des capitaux belges et suédois) Spot Images de 2, la canadienne Radarsat International de 2.

²⁶“Egypt says 'visually' observing missing satellite” Safaa Abdoun /Daily News Egypt, 26/10/2010.

Les satellites civils en activité appartenant à des universités ou à des instituts technologiques sont au nombre de 30. Leurs missions relèvent de l'observation et des sciences de la Terre pour 7 d'entre eux. Les 23 autres emportent des expériences scientifiques diverses. Beaucoup sont des microsatellites, d'un poids total de 1 à 12 kg.

Treize Etats contrôlent les 98 satellites militaires de « reconnaissance », de « télédétection », « d'observation de la Terre », de communications, de navigation, ou de surveillance des océans recensés par l'Union of Concerned Scientists. Les USA en déploient 33, la Russie 30, la Chine 12, Israël 6, l'Allemagne 5, l'Inde 3, l'Italie 3, le Pakistan et Taïwan 1 chacun.

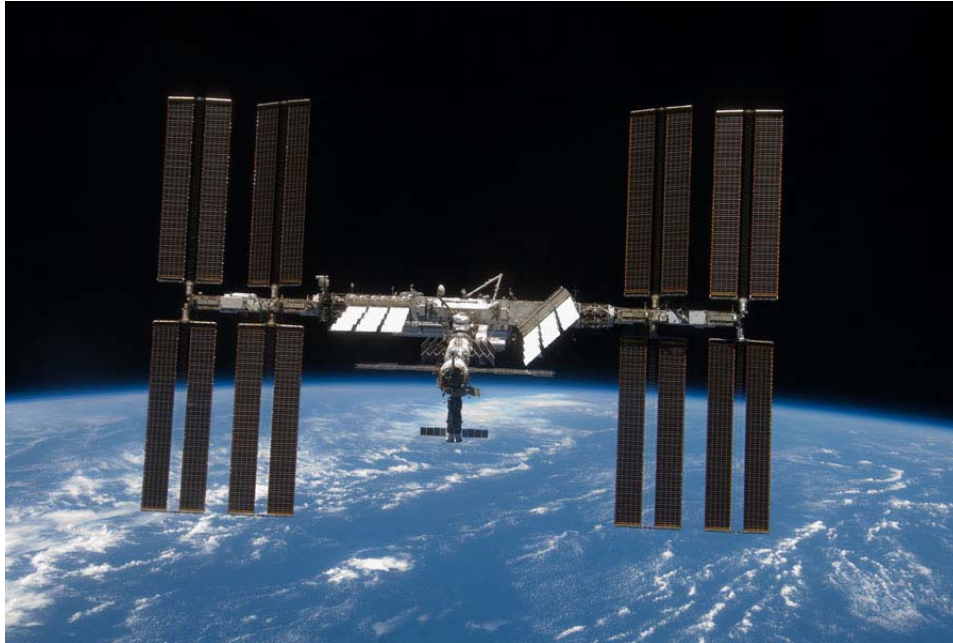
La France quant à elle en possède 4, et en partage 3 autres avec la Belgique, l'Italie, l'Espagne et la Grèce. Ils sont contrôlés par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), le traitement des informations étant réalisé par la Délégation Générale de l'Armement (DGA).

Dans ce domaine, la sous-évaluation du nombre réel de satellites en activité est quasi-certaine.

3- La Station Spatiale Internationale (International Space Station, ISS)

Faits marquants : le 27 août 2008, les résidents ont dû se réfugier dans le module d'évacuation d'urgence pendant que la Station Spatiale Internationale réalisait une manœuvre d'évitement d'un des déchets catalogués issus de l'autodestruction du satellite militaire russe Kosmos 2421. Une autre esquivé a été imposée à l'ISS en mars 2009 face à un déchet - projectile de 13cm. Les manœuvres d'évitement consomment plusieurs kilos d'ergols et ne peuvent être répétées à l'infini. De quoi tempérer l'optimisme du CNES qui écrivait en 2007 que la probabilité de collision entre l'ISS et un déchet spatial était d'un impact tous les trois siècles.

L'ISS est un complexe orbital résidentiel et universitaire. C'est une structure modulaire placée en orbite basse à une altitude variant entre 370 et 460 km d'altitude. Elle permet d'accueillir un équipage de façon permanente afin d'y réaliser des expériences scientifiques en environnement spatial. Les différents modules sont fournis et entretenus par les six agences coopérant au projet : NASA, Roscosmos, Canadian Space Agency (CSA), European Space Agency (ESA), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Agência Espacial Brasileira (AEB).



L'ISS vue de la navette spatiale en approche. Photo STS-119 Shuttle Crew, NASA

Le lancement du premier élément de l'ISS, le module russe Zarya, a été effectué en 1998. L'achèvement de la construction est prévu en 2011. Sa masse de 370 t et ses dimensions - 108 m de long, 74 m de large, 45 m de haut - font de l'ISS la plus grande et la plus lourde des structures envoyées à ce jour dans l'espace. Son volume habitable est de 360 m³.

A partir du 2 novembre 2000, la station a été occupée en permanence par un équipage mixte américano-russe de 2 ou 3 cosmonautes, rejoints ponctuellement par des astronautes des autres pays participant à l'ISS. L'agence spatiale russe Roscosmos a par ailleurs ouvert la station dès 2001 au tourisme, en partenariat avec la société américaine Space Adventures Ltd, créée en 1998 et spécialisée dans le tourisme spatial. 7 millionnaires ont passé de 9 à 15 jours à bord²⁷.

Depuis mai 2009, 6 cosmonautes occupent l'ISS. Ils y séjournent en moyenne 6 mois, l'équipage étant renouvelé par moitié tous les 3 mois. La station est alternativement commandée par un Américain et un Russe. L'envoi des équipages et leur retour sur Terre est assuré par les vaisseaux Soyouz, qui n'emportent avec eux que quelques kilos de fret.

Le ravitaillement est effectué par 4 vaisseaux spatiaux différents également utilisés pour l'évacuation des déchets (cf. §5 : Les déchets de l'ISS) :

- La navette spatiale, qui peut transporter les charges les plus lourdes et les plus volumineuses - jusqu'à 16,4 t et 300 m³ - et les ramener sur Terre. 34 vols ont rejoints l'ISS. L'ultime lancement de *Discovery* avant le retrait définitif de la navette spatiale était prévu en novembre 2010. Mais suite à la découverte de fuites d'hydrogène dues à des fissures dans un réservoir externe, le lancement a été repoussé à décembre, puis « pas avant

²⁷ <http://www.spaceadventures.com/index.cfm?fuseaction=orbital.Clients>

le 3 février 2011 », selon la NASA²⁸. Il a finalement eu lieu le 25 février. Le retour a eu lieu le 9 mars 2011.

- Les cargos russes Progress assurent en moyenne 3 à 4 vols de ravitaillement par an, et 5 en 2010. 35 cargos à ce jour ont ravitaillé l'ISS. Chaque Progress transporte jusqu'à 3,2 t de charge utile, dont 1,7 t de fret pour l'équipage (incluant 300 l d'eau) et 1,5 t de carburant pour l'ISS.
- L'Automated Transfer Vehicle (ATV) est un cargo spatial européen conçu par EADS Astrium pour l'ESA. Il est contrôlé au sol par le Centre National d'Etudes Spatiales depuis son site de Toulouse. D'une longueur de 10 m pour un diamètre de 4,5 m, et d'une masse au décollage de 20,7 t, l'ATV peut transporter jusqu'à 7,5 t de charge utile, dont 5,5 t de fret sec (nourriture, pièces détachées, vêtements...) et 840 l d'eau. Le lancement du premier ATV, le *Jules Verne*, a été effectué le 9 mars 2008 de la base de Kourou par une fusée Ariane 5. Le lancement du deuxième ATV, *Johannes Kepler*, a eu lieu le 15 février 2011. Trois autres missions devraient lui succéder. Le retour est prévu pour le 21 juin 2011.



Automated Transfer Vehicle - Illustration ESA - D.Ducros

- Le H-II Transfer Vehicle (HTV) est un cargo spatial automatique développé et contrôlé par la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). Comme les vaisseaux Progress et ATV, il a été conçu pour le ravitaillement en fret sec et liquide de l'ISS. Le vol de qualification du HTV s'est déroulé du 11 septembre au 1^{er} novembre 2009. Le lancement du deuxième HTV, baptisé « Kounotori » (« Cigogne blanche ») a eu lieu le 22 janvier 2011. Après lui, 5 autres HTV sont programmés pour ravitailler l'ISS jusqu'en 2016.

²⁸ http://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/launch/index.html



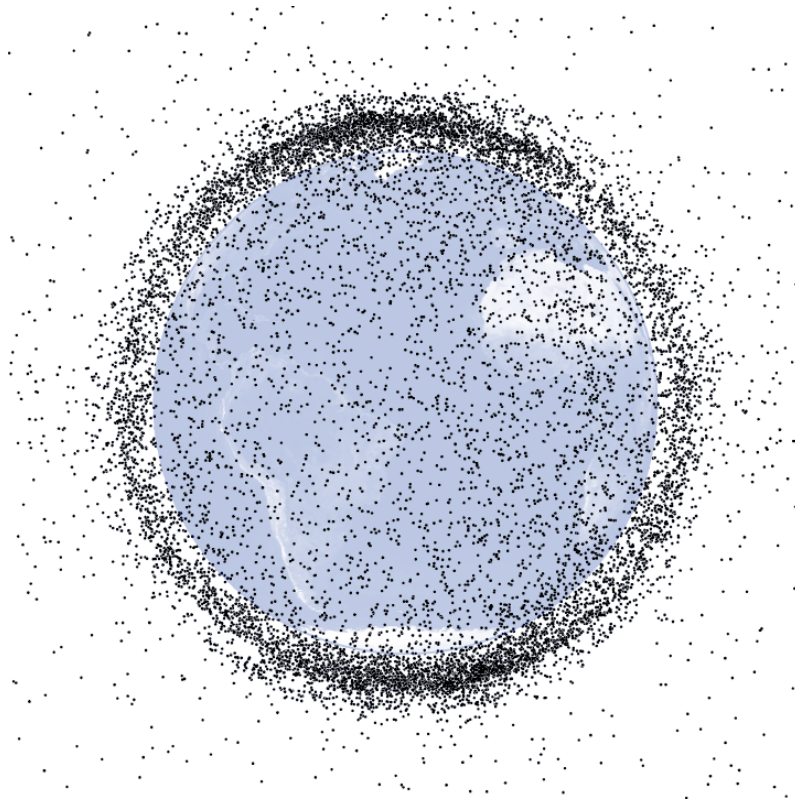
Le HTV-1 en cours d'arrimage à l'ISS – Photo JAXA

4- Les déchets en orbites basses

Des études effectuées sur l'évolution des températures dans l'atmosphère ont révélé l'influence du réchauffement climatique : une tendance au refroidissement est corrélée avec l'augmentation des niveaux de CO₂ depuis 35 ans. Le résultat de ce refroidissement est une diminution de la densité atmosphérique d'environ 10% dans les orbites basses, provoquant moins de frottements sur les objets en orbite et augmentant leur vitesse. La durée de vie orbitale des satellites en fin de vie et des déchets spatiaux s'en trouve allongée, jusqu'à 24% selon certains modèles, ce qui augmente les risques de collisions. Le segment de l'espace le plus affecté par ce phénomène est la bande d'altitude entre 200 et 1.200 km, autrement dit l'orbite basse à très forte densité en satellites et en déchets²⁹.

Les déchets spatiaux identifiés et suivis en orbites basses par le Space Surveillance Network représentent plus de 60 % du nombre total de déchets, soit environ 11.500 objets d'une taille supérieure à 10 cm. Les objets entre 1 et 10 cm sont estimés à 360.000.

²⁹ "Response of the Space Debris Environment to Greenhouse Cooling", H.G. Lewis *et al*, Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18-20 April 2005 – European Space Agency, août 2005.



Déchets spatiaux de plus de 10 cm en orbite basse, le 25 août 2009. Illustration NASA.

Les orbites basses sont traversées par des convois destinés aux orbites moyennes et géostationnaire ou à des voyages interplanétaires. Certains d'entre eux tombent en panne avant d'atteindre ces horizons lointains. Le 29 octobre 2010, suite à la détection d'une fuite dans son réservoir de comburant, la perte du satellite W3B est officiellement annoncée par son propriétaire - Eutelsat Communications -, et par son constructeur - Thales Alenia Space. Le montant des indemnités que les 28 sociétés d'assurances concernées devront verser -245 millions d'euros- en ferait le sinistre le plus coûteux à ce jour dans le domaine de l'assurance spatiale. Lancé le 28 octobre du Centre Spatial de Guyane par une fusée Ariane 5 ECA, W3B a été placé à 240 km d'altitude sur une orbite de transfert devant lui permettre de rejoindre par ses propres moyens sa position finale en orbite géostationnaire. Mais la fuite de comburant est apparue trop importante pour que le satellite puisse atteindre son but, ou être placé sur une orbite cimetière. Suite à ces constatations, les équipes du centre de contrôle d'Eutelsat à Rambouillet avaient décidé de le désorbiter et de lui faire effectuer une rentrée atmosphérique. Cette option a également été abandonnée, le satellite ne disposant plus de la quantité d'ergols nécessaire aux manœuvres. W3B a été officiellement déclaré « objet inerte » par Eutelsat. L'orbite elliptique sur laquelle il est maintenant abandonné devrait l'amener à retomber sur Terre dans 20 à 30 ans³⁰. Les précédentes fuites de liquides dans l'espace l'ont montré : chaque goutte se solidifie, devenant un déchet spatial. Le nombre de gouttes de comburant relarguées par W3B, leurs diamètres et leurs positions ne sont pas évalués par Eutelsat. L'origine de cette fuite n'est pas connue. Il n'est pas exclu qu'un déchet spatial en soit responsable.

³⁰ http://www.spacenews.com/satellite_telecom/101105-failed-w3b-satellite-orbit-decades.html

L'orbite cimetière

En application d'une sorte de charte commune de bonne conduite et de nettoyage de leur périmètre de travail, les principaux industriels et logisticiens de l'espace préconisent le transfert sur une orbite cimetière des Satellites Hors d'Usage. Pour ce qui concerne l'anneau le plus fréquenté des orbites basses, il s'agit de rehausser les épaves à quelques centaines de kilomètres au niveau inférieur des orbites moyennes. Ces orbites dites orbites cimetières sont recommandées pour des Satellites Hors d'Usage dont le retour rapide et incontrôlé sur Terre serait susceptible de créer des problèmes sanitaires ou environnementaux. L'exemple le plus connu est celui des satellites disposant de réacteurs nucléaires. Sur le terrain l'application de cette recommandation est très loin d'être systématique à la fois pour des raisons techniques et économiques.

5- Les déchets de l'ISS

Le plan de gestion des déchets à bord de l'ISS distingue deux catégories ³¹:

- « trash », qui est principalement constituée de matériels usés ou défectueux, de consommables périmés et d'objets inutiles.
- « waste », qui comprend les matières chimiques et radioactives, les batteries, les aiguilles, les produits et les consommables biologiques et biomédicaux actifs inutilisés.

Pour un équipage de 3 personnes, le volume quotidien de déchets produits à bord de l'ISS est estimé à 0,07 m³. Il s'agit surtout d'emballages en plastique, de reliefs de repas, de textiles (les vêtements ne sont pas lavés et ne sont portés que trois fois) de produits d'hygiène, et d'excréments³². Le volume de déchets générés par les expériences scientifiques à bord n'est pas évalué.

La méthode prioritaire d'élimination des déchets inscrite dans le plan de gestion de l'ISS est leur chargement sur un cargo russe Progress destiné à rentrer dans l'atmosphère et à l'immersion. Exceptionnellement, en cas d'indisponibilité des Progress, la navette spatiale américaine pouvait se charger du retour sur Terre de certains déchets qui étaient alors traités au sol. Avec l'arrêt définitif des vols de navette en 2011, seuls des cargos « consommables » selon le terme utilisé par la NASA des « véhicules de rentrée » selon l'appellation donnée par l'ESA ou des « véhicules de transfert » selon l'agence JAXA pourront évacuer les déchets de l'ISS.

La nature et les quantités exactes de déchets transportés par les vaisseaux Progress, ATV et HTV lors de leur retombée dans l'atmosphère et dans l'océan ne sont pas divulguées par les différentes agences spatiales qui en sont détentrices. Tenue par des clauses de confidentialité, l'ESA n'a pas été en mesure de nous communiquer les manifestes de bord des ATV *Jules Verne* et *Johannes Kepler* lors

³¹ "Non-Recoverable Cargo (Trash/Waste) Management Plan", International Space Station Program – NASA/Russian Space Agency, décembre 2000.

³² "Weightless washcloths and floating showers", ISS Business Newsletter – ESA, avril 2006.

de leur rentrée. Cependant, elle nous a déclaré que l'ATV ne transportait pas de déchets radioactifs.

- Les cargos Progress peuvent emporter 1 t à 1,7 t de déchets (jusqu'à 5,8 m³). Une fois l'eau potable et le fret déchargé, les cuves du cargo sont remplies avec les eaux usées produites par l'équipage de l'ISS, et les déchets solides sont stockés dans le compartiment pressurisé. Selon le plan de gestion des déchets de l'ISS, « ...il n'y a aucune limite au nombre et aux types de déchets pouvant être débarrassés dans le Progress tant que les contraintes de poids et de centre de gravité sont respectées. » Le cargo Progress est ensuite désorbité pour effectuer une rentrée contrôlée dans l'atmosphère au-dessus du Pacifique sud, où il se disloque et brûle en partie avant de percuter l'océan.
- L'Automated Transfer Vehicle a une charge utile maximum de 6,4 t de déchets³³. Lors de l'unique mission achevée de l'ATV à ce jour, le *Jules Verne* était chargé de 2,5 t de déchets solides et liquides au moment de sa rentrée dans l'atmosphère le 29 septembre 2008³⁴. Le *Jules Verne* s'est désintégré en quelques centaines de fragments qui ont coulé dans l'océan Pacifique. Le vaste secteur où les épaves de l'ATV ont plongé est inhabité et peu fréquenté par les trafics aériens et maritimes. Il est connu des spécialistes comme le « cimetière à satellites du Pacifique Sud ». Les 900 kg de déchets solides et les 264 l d'eaux usées en provenance de l'ISS ont été en grande partie « incinérés » pendant la phase de rentrée dans l'atmosphère. La séquence de rentrée du *Jules Verne* est décrite dans le chapitre IX : les rentrées sur Terre.
- Le HTV japonais peut transporter jusqu'à 6 t de déchets³⁵. Il a également été conçu pour être désorbité en fin de mission et retomber dans l'atmosphère terrestre chargé de déchets de la station spatiale. Après le vol de qualification de l'HTV en 2009, les déchets de l'engin spatial se sont abîmés dans le Pacifique « entre la Nouvelle-Zélande et l'Amérique du sud », selon JAXA³⁶.



En ce qui concerne les déchets radioactifs, le plan de gestion des déchets de l'ISS rédigé par la NASA et Roscosmos donne toute latitude pour jouer des différences de réglementation : « La réglementation du NRC [Nuclear Regulatory Commission] ne permet pas le traitement des déchets radioactifs par incinération, à l'exception de cas spéciaux. » La NASA admet que les russes peuvent avoir une autre réglementation et d'autres seuils pour autoriser l'incinération des déchets radioactifs. Par incinération est entendu le processus d'autocombustion pendant les quelques minutes de rentrées dans l'atmosphère terrestre où les déchets en provenance de l'espace sont soumis à des températures supérieures à 2.000 °C.

³³ http://www.esa.int/SPECIALS/ATV/SEMOP432VBF_0.html

³⁴ « Jules Verne Automated Transfer Vehicle (ATV) Re-entry » Information Kit – ESA, septembre 2008.

³⁵ « HTV-1 Mission Press Kit », Japan Aerospace Exploration Agency, 9 septembre 2009.

³⁶ « History-making Japanese Space Mission Ends in Flames », Stephen Clark, SPACE.COM, 2 novembre 2009.

La liste des objets égarés en orbite basse comprend également un ensemble d'outils et de matériels provenant des opérations de maintenance de la Station Spatiale Internationale (ISS) :

- une spatule échappée des mains de l'astronaute britannique Piers Sellers, en 2006.
- le 22 novembre 2006, le cosmonaute Mykhail Tyurin s'est prêté à une opération publicitaire consistant à projeter une balle de golf dans l'espace avec un club fabriqué en scandium par une marque canadienne. Les estimations de la durée de vie orbitale de la balle variaient de 3 jours pour la NASA³⁷, à 3 ans selon Roscosmos.
- un appareil photo parti à la dérive spatiale en juin 2007 alors que l'astronaute Suni Williams s'affairait à décoinçer un panneau solaire.
- une cuve de liquide de refroidissement de plus de 635 kg, pleine d'ammoniac, volontairement abandonnée dans l'espace après son remplacement en juillet 2007. Elle servait de stockage de secours en cas de fuite sur le système de refroidissement. Selon la NASA, la cuve pleine ne pouvait être ramenée sur Terre à bord de la navette spatiale pour y être traitée, les risques liés au transport d'une cuve remplie d'ammoniac lors du retour dans l'atmosphère étant trop grands. Lors de la rentrée dans l'atmosphère, le 9 mars 2008, la NASA annonça qu'à cause de ses grandes dimensions « quelques petites pièces pourraient survivre à la descente et à la chute sur la surface terrestre ». Elle estimait qu'une quinzaine de morceaux variant en poids de 40 g à 17,5 kg pourraient atteindre le sol. « Si quelqu'un trouve un morceau de quoi que ce soit sur le sol lundi matin, j'espère qu'il ne s'en approchera pas trop » déclara à cette occasion le directeur du programme ISS pour la NASA, Mike Suffredini³⁸. Après qu'elle se soit fragmentée à environ 80 km d'altitude au-dessus de la Tasmanie, les morceaux de la cuve s'abîmèrent dans l'océan, « entre l'Australie et la Nouvelle-Zélande » selon la NASA.



Cuve pleine de 635 kg d'ammoniaque rejetée par l'ISS en 2007 et retombée partiellement sur Terre en 2009. Photo NASA

³⁷ "Spacewalkers Tee Off on Science, Mechanics", NASA, 23 novembre 2006. http://www.nasa.gov/mission_pages/station/expeditions/expedition14/exp14_eva_112206.html

³⁸ "Space Station Trash Plunging to Earth", Tariq Malik – SPACE.COM, 31 octobre 2008.

- en juin 2007 la Cour des comptes des Etats-Unis (Government Accountability Office, GAO) rendait public un audit sévère de la gestion par la NASA de ses stocks d'équipements et de matériels. Parmi les 94 millions de dollars de matériels perdus ou volés en 10 ans, le GAO citait plusieurs exemples, dont celui d'un ordinateur d'une valeur de 4.265 \$. Pour expliquer sa disparition, l'ingénieur qui aurait dû en être le destinataire déclara : « Cet ordinateur, bien qu'il m'ait été affecté, a été utilisé à bord de la Station Spatiale Internationale. J'ai été informé qu'il avait été jeté par-dessus bord afin de brûler dans l'atmosphère lorsqu'il est tombé en panne. »³⁹
- une pince à bec effilé perdue par l'américain Scott Parazynski en novembre 2007 alors qu'il réparait un panneau solaire.
- un sac d'outils de 15 kg, ainsi qu'un couteau à mastic et des pistolets à graisse perdus en novembre 2008 par l'américaine Heidemarie Stefanyshyn-Piper. Le sac d'outils est rentré dans l'atmosphère le 3 août 2009.



Chargement des déchets de l'ISS à bord du module de ravitaillement HTV-1.
Photo JAXA.

L'abandon de l'ISS, à l'origine prévu en 2016, a été repoussé à 2020 par le Président Obama et inscrit au budget de la NASA⁴⁰. Arrivée en fin de vie elle devrait être désorbitée pour déclencher une rentrée atmosphérique contrôlée. Ses moteurs n'étant pas assez puissants pour effectuer la manœuvre, un module de type ATV pourrait être envoyé pour lui appliquer une poussée en direction de la Terre. Toutefois la Russie n'a pas clairement affirmé ses intentions : elle a évoqué la possibilité de maintenir en orbite les modules russes de l'ISS.

³⁹ « Lack of Accountability and Weak Internal Controls Leave NASA Equipment Vulnerable to Loss, Theft, and Misuse », United States Government Accountability Office, [GAO-07-432](#), juin 2007.

⁴⁰ "Fiscal Year 2011 Budget Estimates", NASA, 1er février 2011.

V- Les orbites moyennes (Medium Earth Orbit, MEO)

1- Trafic

Délimitées par convention entre 2.000 et 36.000 km d'altitude, ces orbites sont pour l'instant peu exploitées, à l'exception d'un segment autour de 20.000 km. A cette altitude, les ondes radios envoyées par un satellite peuvent être captées sur de très grandes zones de la surface terrestre. C'est le domaine privilégié par les constellations de satellites dédiés à la navigation et au positionnement, comme le système américain GPS. La vitesse moyenne des objets y est de 5 km/s.

2- Satellites en activité, fonctions, nationalités

Cette portion de l'espace n'est exploitée que depuis 1977. Au 1^{er} novembre 2010, 62 satellites en activité étaient recensés par l'UCS en MEO.

Les 32 satellites américains Navstar GPS contrôlés par le Ministère de la Défense américain et l'US Air Force croisent les 23 Glonass pilotés par le Ministère de la Défense russe. La constellation Glonass devait être au complet fin 2010, mais la perte de trois d'entre eux, retombés dans le Pacifique le 5 décembre 2010 suite à une panne de leur lanceur Proton-M, contrarie l'objectif d'une couverture mondiale du système de positionnement russe. Pour compenser les satellites arrivant en fin de vie, le lancement de 8 Glonass supplémentaires est programmé en 2011, 2012 et 2013.

Seuls 2 satellites Galileo de navigation appartenant à l'ESA (en tests de qualification pour une future constellation de 30) et 1 satellite militaire chinois de navigation s'intercalent dans le dispositif déployé par les deux grandes puissances.

Un satellite de communications britannique ICO-F2 opère à 10.000 km d'altitude.

3- Les déchets en orbites moyennes

Utilisées depuis moins longtemps que les orbites basses ou géostationnaire, les orbites moyennes sont moins polluées par les déchets. Toutefois les mêmes phénomènes de fragmentations par explosion ou par collision sont à l'œuvre. Les projets chinois et européens de constellations de satellites pour la navigation et le positionnement, destinés à s'affranchir des monopoles russe et américain, viendront à moyen terme augmenter les risques de collisions et la population de futurs déchets. De plus les orbites moyennes sont aussi traversées par les convois spatiaux à destination de l'orbite géostationnaire et des autres planètes. Environ 5.200 objets de plus de 10 cm sont enregistrés dans la base de données Spacetrack, et les objets entre 1 et 10 cm sont estimés à 60.000. Les « aiguilles West-Ford » (voir ci-dessous) ne sont pas incluses dans ce total.

Autour de 20.000 km, la durée de vie des objets dans l'espace avant de retomber sur Terre est de plusieurs milliers d'années. L'envoi des satellites en fin d'activité sur des orbites-cimetières est la méthode de gestion retenue par les exploitants pour minimiser les risques de collisions avec des satellites opérationnels. Mais l'instabilité de ces orbites provoquée par des phénomènes de résonance entre les forces de

gravité du Soleil, de la Lune et de la Terre a été découverte en 2000⁴¹. Des calculs ultérieurs ont montré que les orbites cimetières choisies pour les satellites GPS, GLONASS et Galileo étaient affectées par ces perturbations, conduisant les déchets à repénétrer dans la zone en exploitation⁴². La solution préconisée dans cette étude est de modifier l'orbite des satellites en fin d'activité pour les amener sur une trajectoire fortement excentrique, censée les faire retomber sur Terre dans un délai inférieur à 200 ans. Le caractère néfaste des orbites cimetières à ces altitudes est souligné : les collisions entre objets y génèrent un nombre exponentiel de déchets susceptibles de croiser les orbites en exploitation.

De février 1991 à septembre 2006, 23 explosions d'étages supérieurs de lanceurs russes PROTON-K ont été détectées entre 17.000 et 22.000 km d'altitude, et 5 entre 11.000 et 14.000 km⁴³.

4- Les pelotes d'aiguilles de West-Ford

L'une des plus importantes concentrations de déchets spatiaux est le résultat d'une expérience menée entre octobre 1961 et mai 1963 par l'US Air Force : l'injection dans l'espace de 750 millions d'aiguilles de cuivre d'1,8 cm de long, les « aiguilles West-Ford », conçues comme des dipôles devant entrer en résonance avec le radar Goldstone.

Deux satellites Midas les ont dispersées le long de leur orbite à 3.200 km d'altitude, dans le but de former un anneau de 8 km de large et de 40 km d'épaisseur autour de la Terre, qui aurait servi de réflecteur radio passif pour des communications militaires.

Avant même le premier lancement, des protestations furent émises par des astronomes utilisant aussi bien des télescopes optiques que des radiotélescopes. Leur crainte était que la ceinture d'aiguilles autour de la Terre n'interfère avec leurs propres observations. L'Académie Nationale des Sciences dut assurer en juin 1960 que les dipôles « n'affecteraient aucune branche des sciences. » Les militaires américains pensaient que l'épaisseur des aiguilles et l'inclinaison de l'orbite choisie les amèneraient à retomber dans l'atmosphère dans un délai maximum de 5 ans.

Le projet West-Ford fut un échec : Midas 4 largua bien 350 millions d'aiguilles et Midas 6, 400 millions, mais leur dispersion ne forma pas un anneau. Elle produisit des agrégats, dont au moins 150 d'une taille détectable par les radars, qui ne retombèrent pas dans un délai de 5 ans. Toutefois l'US Air Force prétendit en 1966 que l'expérience avait été un succès, et que toutes les aiguilles étaient rentrées dans l'atmosphère.⁴⁴

En fait, la constitution d'agrégats modifia la réponse des aiguilles à la pression radiative solaire, les faisant dériver vers une orbite circulaire. En 1994, le radar Goldstone effectua pendant 38 heures une expérience de détection des flux de déchets entre 2.400 et 3.100 km d'altitude. Environ 40.000 objets furent détectés, et ultérieurement identifiés comme des agrégats de toutes tailles d'aiguilles West-Ford.

⁴¹ "MEO Disposal Orbit Stability and Direct Reentry Strategy", C.C. Chao – Advances in the Astronautical Sciences, Vol. 105, pp. 817-838, janvier 2000.

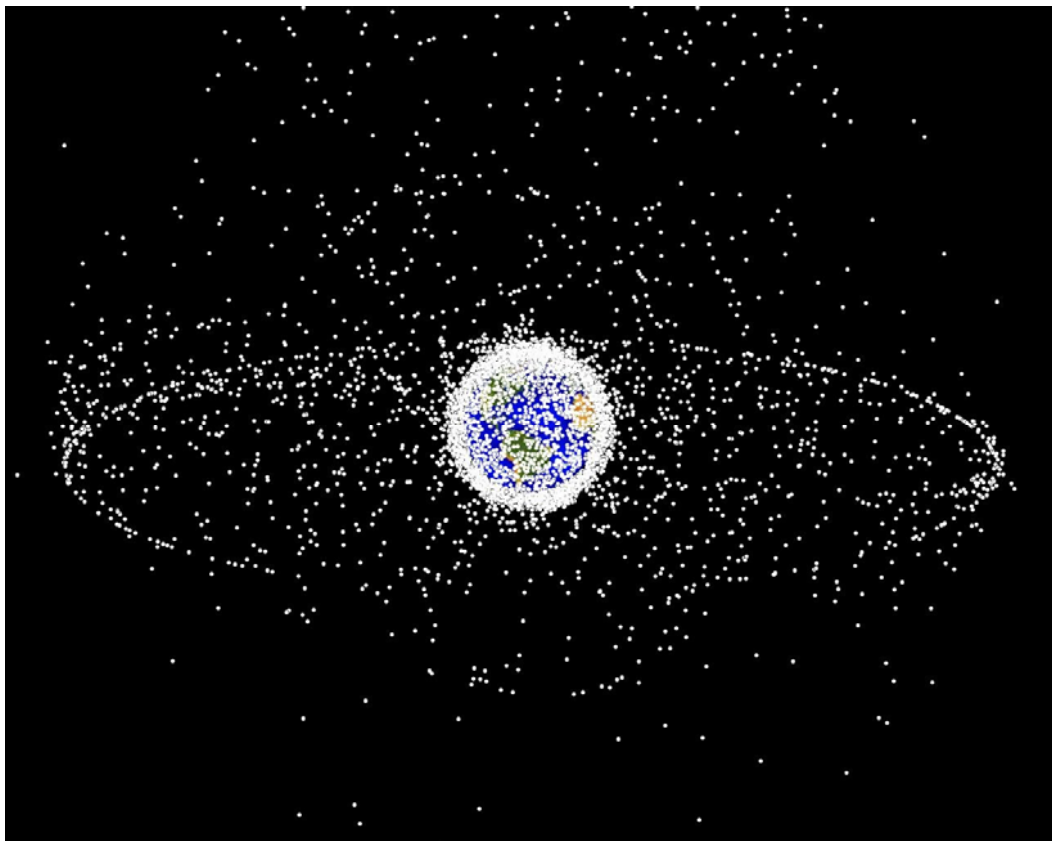
⁴² "Long-Term Evolution of Navigation Satellite Orbits: GPS/GLONASS/GALILEO", C.C. Chao, R.A. Gick – Advances in Space Research, Vol. 34, Issue 5, pp. 1221-1226, 2004.

⁴³ "History of On-Orbit Satellite Fragmentations" 14th Edition, Orbital Debris Program Office - NASA/TM-2008-214779, juin 2008.

⁴⁴ "Orbital Debris: a Chronology", David S. F. Portree; Joseph P. Loftus, Jr. – NASA, janvier 1999.

L'explication avancée par les scientifiques est que d'importants agrégats de dipôles continuent de relarguer de plus petits agrégats, et des aiguilles individuelles.⁴⁵ Sur les 102 essaims les plus importants suivis par le Space Surveillance Network, 60 étaient encore en orbite en 1987, et 42 étaient retombés dans l'atmosphère.

VI- L'orbite géostationnaire (Geostationary Earth Orbit, GEO)



Les objets utiles et déchets en orbite terrestre géostationnaire suivis par le Space Surveillance Network. Illustration NASA.

1- Trafic

C'est l'orbite privilégiée pour les satellites d'observations météorologiques, de télécommunications ou de diffusion de télévision, car elle est géosynchrone – un objet y possède une période de révolution égale à la période de rotation de la Terre sur elle-même. S'il est en plus positionné sur le même plan que l'équateur terrestre, il apparaît immobile par rapport à tout point sur Terre. Cette caractéristique permet l'émission et la réception des données en continu par l'intermédiaire d'une antenne fixe au sol.

⁴⁵ «The Importance of Non-Fragmentation Sources of Debris to the Environment », op. cité.

2- Satellites en activité, fonctions, nationalités

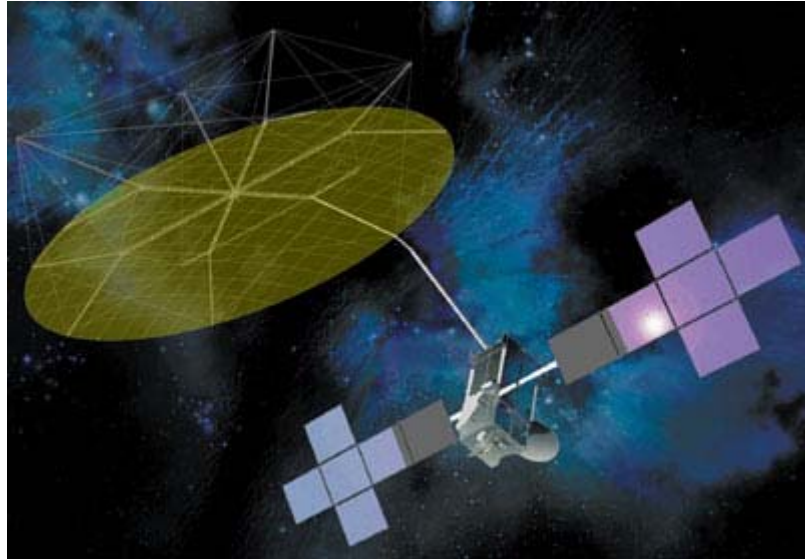
A cette altitude, un satellite subit l'influence des champs gravitationnels du Soleil, de la Terre et de la Lune, mais aussi de la pression des radiations solaires. De fréquentes manœuvres de correction de l'orbite sont nécessaires, nécessitant d'importantes réserves d'ergols. Les satellites en orbite géostationnaire sont les plus lourds envoyés dans l'espace : la majorité a une masse au décollage entre 2 et 8 t. Leur durée de vie annoncée est en majorité de 12 à 15 ans, mais seulement 4 ans pour les satellites de communications UFO de l'US Navy.

Au 1^{er} novembre 2010, l'Union of Concerned Scientists dénombrait 389 satellites en activité sur l'orbite géostationnaire, dont 348 satellites de communications (TV, radio, téléphonie mobile, Internet), 15 satellites de météorologie, 8 satellites de navigation et de positionnement, 7 satellites de surveillance électronique, 4 satellites d'alerte avancée (détectant les éventuels départs de missiles), 4 satellites prototypes ou servant de test de validation technologique, et 3 consacrés à l'observation de l'espace. 15 d'entre eux ont été lancés entre le 1^{er} janvier et le 30 novembre 2010. 36 Etats contrôlent un ou plusieurs satellites en orbite géostationnaire.

- Les USA en possèdent 154, dont les constellations Intelsat (33 satellites), Americom (15), Galaxy (11), Echostar (10), Direct TV (9) qui se consacrent à la diffusion de télévision et de données. On remarque quatre satellites XM Radio baptisés Rock, Roll, Rythm, et Blues diffusant des centaines de canaux musicaux destinés au marché américain. Galaxy-26 et Galaxy-27 lancés en 1999 ont subi plusieurs avaries qui réduisent leurs fonctions et leur durée de vie espérée à l'origine de 13 ans.

Quant à TerreStar 1, lancé en juillet 2009 par une fusée Ariane 5 depuis Kourou, ses 6,9 t et son antenne de 18 m de diamètre en font le plus gros satellite commercial lancé dans l'espace. Il est dédié aux transmissions vocales vers les mobiles et les Smartphones. Un second satellite de même taille est en construction mais leur propriétaire, la société TerreStar Networks, est en redressement judiciaire depuis le 19 octobre 2010. TerreStar 1 est à vendre, et ahumanright.org - une ONG créée avec le soutien de Deutsche Telekom et du groupe indien Tata - collecte des fonds afin de le racheter et de le transférer sur une orbite qui lui permettrait de diffuser des canaux d'accès à Internet gratuits à destination de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, tout en continuant à proposer des canaux commerciaux⁴⁶.

⁴⁶ <http://buythissatellite.org/about.php>



TerreStar 1, le plus gros satellite commercial en orbite.
Illustration TerreStar Networks, Inc.

Huit satellites TDRS servent au suivi et au relais des communications avec la navette spatiale et les autres missions de la NASA. La constellation GOES (6 satellites) assure les prévisions météorologiques de la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration).

L'armée américaine déploie 41 satellites de communications, de reconnaissance, de surveillance électronique, d'alerte avancée, contrôlés par l'US Air Force, l'US Navy, et le National Reconnaissance Office (NRO).

- Le Japon dispose de 21 satellites en activité dont les constellations JCSat (8 satellites de communications) et les 2 satellites Superbird de 4 et 5 t.
- 24 satellites chinois sont actifs en GEO en 2010 : 11 satellites de télécommunications, 10 militaires - dont 6 font partie de la constellation de navigation/positionnement « Beidou » présentée comme devant comprendre 35 satellites à l'horizon 2020 - et 3 satellites météorologiques Fengyun.
- La Russie possède 19 satellites en GEO, dont la constellation Express (8 satellites de télécommunications), les 3 satellites Yamal de communications appartenant au conglomérat Gazprom, et 6 satellites militaires.
- Le Grand-Duché de Luxembourg est un des principaux opérateurs en orbite géostationnaire, avec ses 15 satellites de télécommunications Astra en activité lancés entre 1993 et 2010.
- Le Royaume-Uni a 2 constellations en orbite GEO : INMARSAT avec 11 satellites de télécommunications, dont les deux énormes INMARSAT 4 F1 et 4 F2 d'une masse de 4,5 t et 4,9 t et de la taille d'un autobus anglais à deux étages, et Skynet (6 satellites) qui est une constellation destinée aux communications militaires.

- Les Pays-Bas ont développé entre 1994 et 2009 une flotte de 10 satellites de télécommunications en GEO.
- Le Brésil a 1 satellite militaire et 6 de télécommunications, dont Amazonas (4,5 t) lancé en 2004, sur lequel une fuite d'ergol a été détectée et dont la durée de vie annoncée de 15 ans devrait être écourtée.
- Le Canada possède 10 satellites de télécommunications, dont Anik F1 (4,5 t) lancé en 2000 qui appartient à Telesat : ses panneaux solaires défectueux réduisent sa durée de vie en activité, estimée au départ à 15 ans.
- Autres Etats détenteurs de satellites actifs en orbite géostationnaire : Allemagne (2 satellites), Argentine (1), Australie (4), Corée du Sud (4), Egypte (2), Emirats Arabes Unis (2), Espagne (5), France (2), Grèce (1), Inde (10), Indonésie (5), Israël (3), Italie (2), Malaisie (4), Mexique (4), Norvège (3), Pakistan (1), Philippines (1), Singapour - en commun avec Taïwan - (1), Suède (2), Thaïlande (3), Turquie (3), Venezuela (1), Vietnam (1).

38 satellites sont déployés par des organisations internationales, dont 23 par EUTELSAT (European Telecommunications Satellite Consortium), 6 par ASCO (Arab Satellite Communications Organization), et 4 par EUMETSAT (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites).

3- Les déchets en orbite géostationnaire

A la différence des orbites basses, les objets en orbite géostationnaire ne subissent pas les effets de la traînée atmosphérique, la densité des gaz étant insignifiante. Les déchets spatiaux, seulement soumis aux forces de gravité du Soleil, de la Terre et de la Lune, et aux flux de radiations solaires, ont une durée de vie orbitale de plusieurs centaines de milliers d'années. Ils posent donc un risque permanent et sur le très long terme pour les satellites en activité, pour les sondes interplanétaires amenées à croiser l'orbite GEO et pour les activités futures.

Au 31 décembre 2009, 847 déchets de plus de 1 m étaient enregistrés dans la base de données DISCOS de l'European Space Agency⁴⁷, comprenant 529 satellites arrivés en fin de vie - dont 21 pendant l'année -, 215 étages supérieurs de lanceurs, 99 déchets d'exploitation et 4 de fragmentation. Les déchets d'exploitation sont en majorité des câbles d'arrimage éjectés au moment de la séparation des satellites et de leurs lanceurs, et des caches de protection de télescopes.

Au 31 décembre 2009, le catalogue public Spacetrack du Space Surveillance Network américain recensait 1.016 objets.

Au 31 décembre 2009, 1.467 objets en orbite géostationnaire étaient suivis par le réseau de télescopes ISON (International Scientific Optical Network) regroupant 23 observatoires dans 11 Etats, coordonnés par l'institut Keldysh de l'Académie des

⁴⁷ "Classification Of Geosynchronous Objects » Issue 12, R. Choc, R. Jehn – European Space Operations Center, février 2010.

Sciences Russe. Ce total comprenait 892 satellites - dont 391 opérationnels et 501 hors service -, 250 étages supérieurs de lanceurs, et 325 fragments et objets non identifiés. Plusieurs centaines de déchets supplémentaires, d'une taille supérieure à 30-40 cm et inférieure à 1 m, étaient estimés mais non observés. Les découvertes de nouveaux déchets se poursuivent, au rythme d'une dizaine par mois⁴⁸.

Ces divergences d'inventaire dans 3 banques de données spécialisées démontrent l'imprécision spatiale quand il s'agit de compter les objets, non seulement les déchets mais aussi les satellites.



Deux satellites de communications de l'U.S. Air Force utilisant l'énergie nucléaire sont en orbite géostationnaire depuis leur lancement le 14 mars 1976. Baptisés LES 8 et LES 9, ils transportent chacun deux générateurs thermoélectriques à radio-isotopes alimentés par deux charges de 36,69 kg de plutonium 238 (²³⁸Pu). LES 8 a été mis hors service le 2 juin 2004.

Pour l'industrie spatiale et les exploitants de l'orbite géostationnaire, le problème majeur est l'encombrement de cette piste à satellites et les risques de collision. Comme si on laissait sur l'autoroute les épaves accidentées sur les lieux mêmes de l'accident et les Véhicules Hors d'Usage continuer à circuler et à disperser au fil du temps les accessoires et la mécanique.

L'orbite cimetière.

« On sait aujourd'hui que les mesures de transfert des satellites de transfert en fin de vie vers une orbite cimetière ne sont que partiellement appliquées. Au cours de ces dernières années seulement un tiers des opérateurs a correctement effectué ces manœuvres en suivant les recommandations de l'IADC (Inter Agency Debris Committee). Un autre tiers des opérateurs effectuent des opérations partielles avec une altitude de réorbitation insuffisante. Le dernier tiers des opérateurs ne fait rien. Ils abandonnent purement et simplement leurs satellites en fin de vie sur l'orbite géostationnaire »⁴⁹.

⁴⁸ "GEO protected region: ISON capabilities to provide informational flight safety support for tasks of spacecraft and space debris removal", Presentation for the 47th session of the COPUOS STSC, 8-19 February 2010, Vienna - Russian Academy of Sciences, Keldysh Institute of Applied Mathematics.

⁴⁹ « La Pollution Spatiale sous Surveillance » *op.cité*.

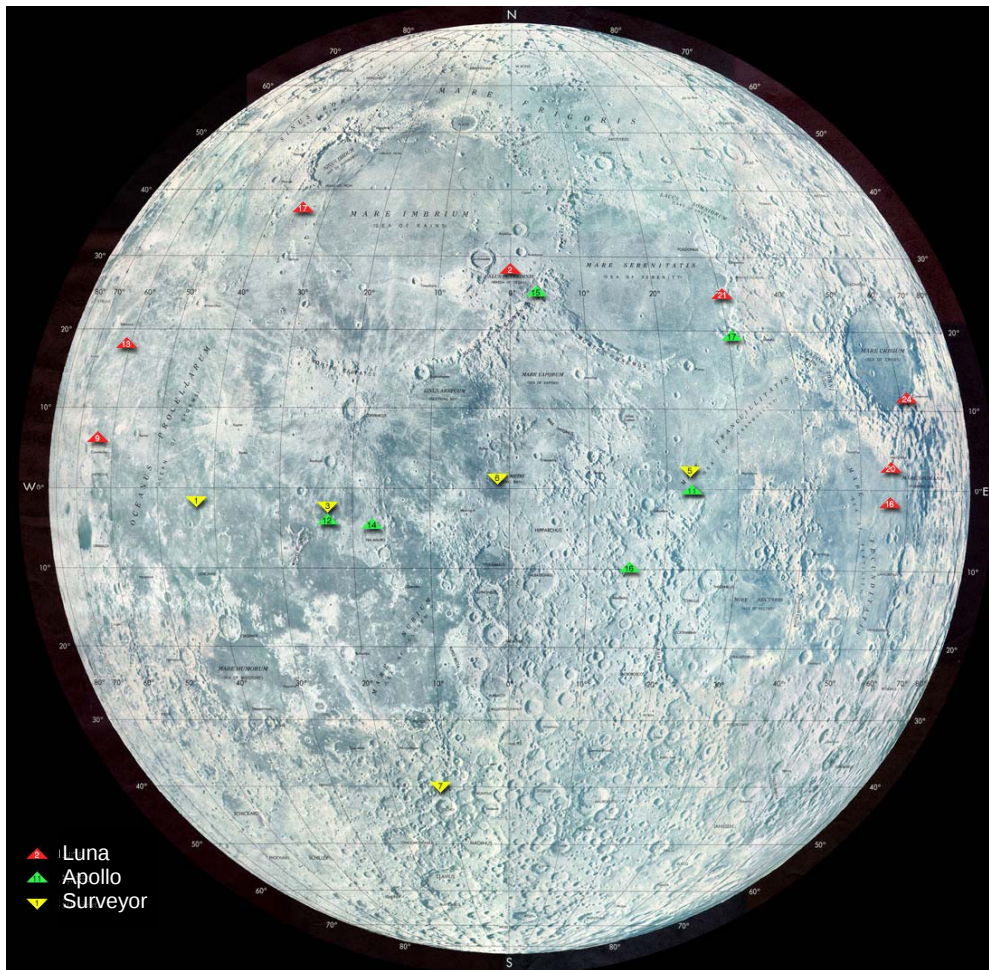
VII- Les déchets et les bactéries terrestres sur la Lune

L'humanité n'a pas laissé que des traces de pas sur le sol lunaire : les six équipages des missions Apollo qui se sont succédés de juillet 1969 à décembre 1972 ont abandonné sur place des tonnes de déchets électriques, électroniques, nucléaires et biologiques. Entre 1959 et 2009, 49 sondes automatiques s'y sont écrasées, volontairement ou non, ou ont été abandonnées à la surface en fin de mission. Des bactéries terrestres ont été involontairement introduites, et ont survécu plusieurs années. Au total près de 180 t de déchets sont dispersés sur la Lune.

Enjeu symbolique de la rivalité entre Etats-Unis et URSS, la Lune a été visée dès 1958 par les sondes des deux grandes puissances. Les soviétiques sont les premiers à faire mouche avec Luna 2, qui s'écrase volontairement le 12 septembre 1959 à 10.000 km/h dans la région lunaire de Palus Putredinis, après 33 heures et 30 minutes de vol. Elle est suivie 30 minutes plus tard par le troisième étage de sa fusée SS-6. La mission est un succès politique, et permet de prouver l'existence du vent solaire et l'absence de ceinture de radiations autour de la Lune. Avec Luna 9, l'URSS réalise en février 1966 le premier alunissage en douceur à 54 km/h, dans la région de l'Oceanus Procellarum. Après 8 heures d'émission des premières images prises depuis le sol lunaire, la sonde a épuisé ses batteries. La série des Luna devient massive, les sondes pèsent entre 1,5 t et 2,7 t (Luna 15 en 1969), puis passent à 5,6 t avec Luna 16 en 1970, qui collecte des échantillons de sol et les renvoie sur Terre en abandonnant son module de descente. En 1976, Luna 24 sera la dernière sonde soviétique à se poser sur la Lune.

Après une série d'échecs des sondes Pioneer 1 à 4 et des sondes Ranger 1 et 2 qui retombent toutes sur Terre, puis de Ranger 3 qui se perd dans l'espace, les Etats-Unis parviennent à percuter la face cachée de la Lune avec Ranger 4 le 23 avril 1962. Mais la sonde est tombée en panne pendant sa chute et n'a envoyé aucune donnée. Ranger 5 manque sa cible. La série des 9 sondes Ranger se poursuit jusqu'en mars 1965 avec le même but, transmettre des images photos et vidéos pendant la descente avant le crash. Les sondes américaines sont moins massives que les soviétiques ; pesant entre 300 et 400 kg, elles visent à cartographier la Lune et à recueillir des données utiles au programme Apollo. De juin 1966 à janvier 1968, 7 sondes Surveyor sont lancées avec pour mission de se poser et de recueillir des données sur l'environnement lunaire. Deux d'entre elles s'écraseront.

Entre 1966 et 1967, 5 modules Lunar Orbiter sont chargés de réaliser en orbite la cartographie de la Lune et des photos détaillées des zones d'alunissage prévues pour les missions Apollo. En fin de mission, ils s'y écrasent volontairement.



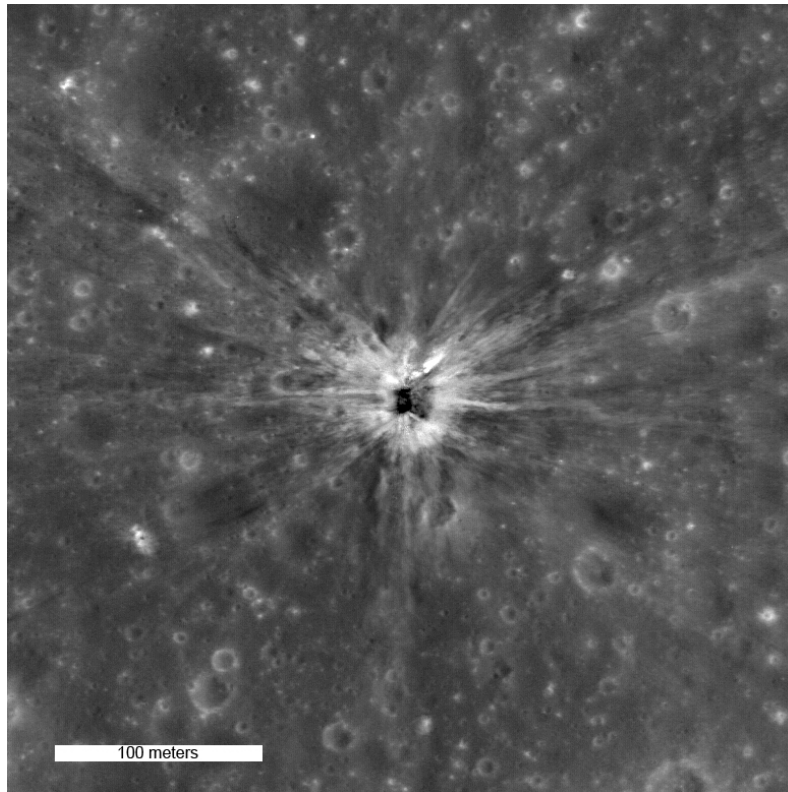
Sites d'impact des sondes Luna (en rouge), Surveyor (en jaune), et sites d'alunissage des missions Apollo (en vert). Document NASA.

1- Les missions Apollo

6 missions Apollo se sont posées sur la Lune, et 12 hommes ont foulé sa surface. Le but principal du programme était de planter la bannière étoilée sur l'astre sélène, ce qui fut fait sur les six sites d'alunissage. Des buts secondaires étaient également assignés : le retour sur Terre de roches et d'échantillons de sols, et l'installation d'instruments scientifiques permettant d'analyser l'environnement lunaire pendant plusieurs années. L'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de ces appareils était fournie par un générateur thermoélectrique à radio-isotopes fonctionnant au ^{238}Pu . Les trois dernières missions utilisèrent un véhicule tout-terrain électrique à deux places, le Lunar Roving Vehicle ou rover, alimenté par deux batteries zinc/argent de 27 kg chacune.



En préalable à la descente du module lunaire (Lunar Excursion Module – LEM), le troisième étage de la fusée Saturn V était propulsé vers la Lune afin qu'il s'y écrase pour éviter tout risque de collision avec le module de commandement resté en orbite.



Mission Apollo 13 : cratère d'impact du troisième étage.
Credit: NASA/Goddard Space Flight Center/Arizona State University

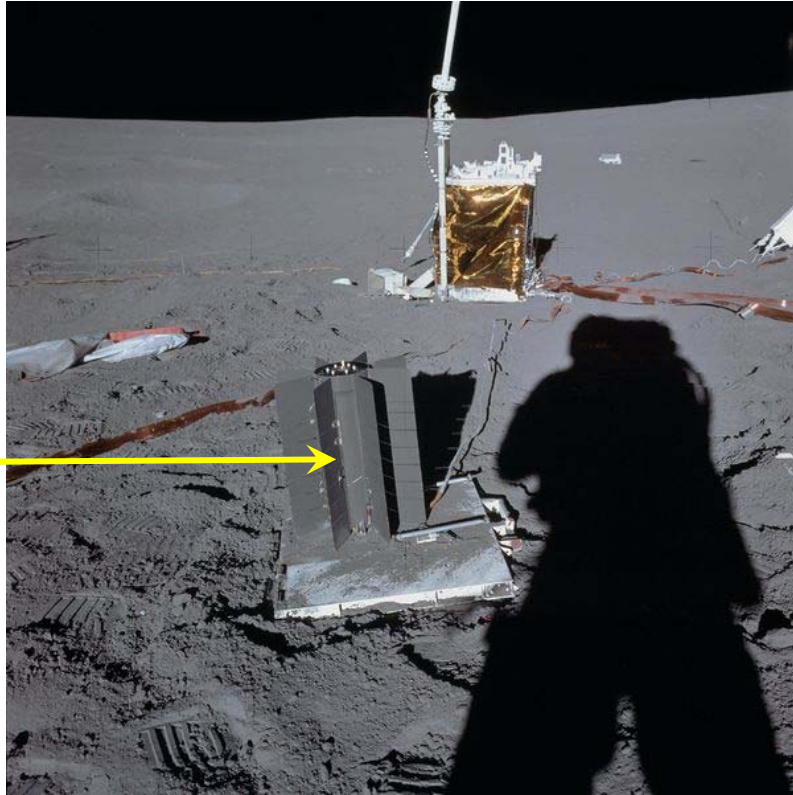
Lors du redécollage la majorité des équipements débarqués étaient laissés sur place, ainsi que les rovers. Même les caméras étaient abandonnées, seuls les films étaient ramenés. Le LEM laissait sur place son étage de descente d'une masse de 2.033 kg pour Apollo 11, 12 et 14, puis de 2.792 kg pour les missions 15, 16 et 17. Après avoir rejoint le module de commandement resté en orbite, les astronautes larguaient l'étage de remontée (4.889 kg jusqu'à Apollo 15, puis 4.967 kg) qui s'écrasait sur la Lune.

L'inventaire des matériels laissés par Apollo 11 sur la mer de la Tranquillité a été réalisé par une association californienne, The Lunar Legacy Project, en se plongeant dans les archives de la NASA. Les membres de l'association les considèrent comme des objets archéologiques, leur but est de faire classer le site du premier alunissage sur la liste du Patrimoine mondial des Nations Unies. 106 éléments sont listés, soit plus de 2,2 t de déchets. De nombreux outils, des bottes, un appareil photo et ses objectifs, des câbles, de la documentation technique, des appareils électriques, des sacs d'urine et d'excréments, des emballages en plastique, une couverture isolante, des tubes d'échantillonnage, des filtres à oxygène... parsèment le site.

L'équipement scientifique déployé par l'équipage d'Apollo 11 était moins sophistiqué que pour les missions suivantes. Par la suite, un ensemble d'instruments scientifiques appelé ALSEP⁵⁰ (sismomètres, magnétomètre, spectromètre, gravimètre, détecteur de poussière, réflecteur laser...) était installé sur chaque site d'alunissage, contrôlé et alimenté en électricité par un poste central. Le générateur thermoélectrique à radio-isotopes fonctionnait avec une charge de 3,8 kg d'oxyde de ²³⁸Pu, soit 44.500 Ci (curies).⁵¹



⁵⁰ Apollo Lunar Surface Experiments Package.



Au premier plan le générateur thermoélectrique à radio-isotopes, au second plan le poste central.
Mission Apollo 14. Photo NASA.

Les sismomètres utilisaient des charges pyrotechniques de 50 g à 4 kg, dont certaines n'ont pas été déclenchées.

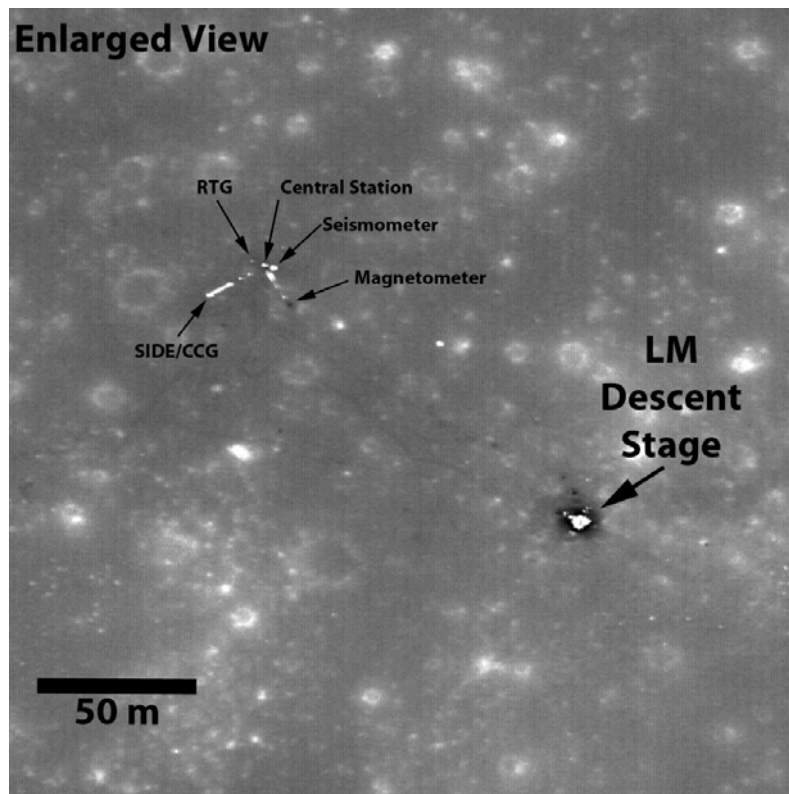
Le LEM était propulsé par la réaction d'un carburant, l'Aérozine 50 (mélange à 50/50 d'hydrazine et de diméthylhydrazine asymétrique, ou UDMH) et d'un comburant, le peroxyde d'azote. Les réservoirs n'ayant pas été purgés, des quantités résiduelles de ces ergols sont toujours présentes dans l'étage de descente abandonné sur chaque site ou ont fui sur le sol lunaire.

En novembre 1969 l'équipage d'Apollo 12 reçut pour mission de ramener sur Terre la caméra vidéo de Surveyor 3 dans des conditions stériles. A l'intérieur, les biologistes découvrirent avec stupéfaction une centaine de bactéries d'une espèce commune sur Terre, *Streptococcus mitis*, qui avaient survécu au lancement, au vide spatial, puis pendant trois ans passés sur la Lune aux radiations, à des températures frisant le zéro absolu, sans nutriments, sans eau, et sans source d'énergie.

« J'ai toujours pensé que la chose la plus significative que nous ayons jamais trouvée sur la Lune était cette petite bactérie qui a survécu, en est revenu, et dont personne n'a jamais parlé. » Commandant Pete Conrad, Apollo 12.

D'autres constats et expériences ont fourni la preuve que des microorganismes terrestres peuvent survivre à des voyages interplanétaires.

⁵¹ "Space Nuclear Power: Opening the Final Frontier", G. L. Bennett, American Institute of Aeronautics and Astronautics, juin 2006.



Site de l'alunissage d'Apollo 12. Le SIDE/CCG mesurait la pression atmosphérique, le RTG est le générateur thermoélectrique à radio-isotopes. A droite, le module de descente (LM).

Credit: NASA/Goddard Space Flight Center/Arizona State University

2- Crash tests sur la Lune

Avec les succès du programme Apollo les Etats-Unis interrompent l'envoi de sondes vers la Lune. Ils y reviennent en 1998, lorsqu'ils lancent Lunar Prospector (126 kg) pour une mission de 19 mois en orbite lunaire. Elle se termine par le plongeon de la sonde dans un cratère proche du pôle sud, dans le but de détecter la présence d'eau dans le substrat éjecté au moment de l'impact. La tentative ne donna rien.

En octobre 2009 la mission LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) découvrit de l'eau sous forme de glace mélangée à la régolite du sol dans le cratère Cabeus, toujours à l'ombre et proche du pôle sud. Pour cela, les USA employèrent les grands moyens : le dernier étage de la fusée Centaur qui avait propulsé la mission percuta volontairement le sol à 10.000 km/h. Avec ses 2,3 t, l'impact créa un cratère de 20 m de diamètre sur 4 m de profondeur, éjectant plus de 350 t de matériau lunaire jusqu'à une altitude de 10 km⁵². Resté en orbite, un module appelé LCROSS Shepharding Spacecraft analysa le panache et transmet ses données à la Terre avant de s'écraser lui aussi dans le cratère. Le 13 novembre 2009 la NASA annonçait que la présence d'eau était confirmée, et que « ...la Lune est chimiquement active et pourvue d'un cycle de l'eau ». En octobre 2010, la publication de nouvelles analyses du panache montre que de nombreux éléments chimiques sont présents, et particulièrement du mercure en quantité aussi importante

⁵² "Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO): Leading NASA's Way Back to the Moon / Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS): NASA's Mission to Search for Water on the Moon", NASA, juin 2009.

que l'eau gelée⁵³. L'un des membres de l'équipe de recherche souligne que « La toxicité du mercure en aussi grande quantité pourrait poser un problème pour l'exploration humaine sur la Lune ». ⁵⁴

A partir des années 1990, la course au prestige politique et technologique que représente l'envoi d'engins spatiaux vers la Lune est relancée par plusieurs Etats ayant développé leur propre industrie spatiale. Le Japon lance le 24 janvier 1990 le satellite Hiten, qui largue en orbite lunaire la petite sonde Hagoromo (12 kg). Celle-ci cessant rapidement d'émettre, nul ne sait si elle a percuté la Lune ou si elle s'est perdue dans l'espace. Après trois années en orbite autour de la Terre et de la Lune, Hiten est volontairement détruit le 10 avril 1993 et s'écrase entre les cratères Stevinus et Furnerius.⁵⁵

En septembre 2003, l'Agence Spatiale Européenne (ESA) lance SMART-1 sur une fusée Ariane 5 depuis le Centre Spatial Guyanais. De conception et de fabrication suédoises, le satellite est destiné à valider plusieurs technologies à usage spatial. C'est le premier engin spatial européen à utiliser un propulseur à effet Hall, dans lequel le carburant -du xénon- est accéléré par un champ électrique produit par des panneaux solaires. Après la réalisation des tests, SMART-1 est dirigé vers l'orbite lunaire où il se positionne à partir de novembre 2004. Plusieurs de ses instruments embarqués recueillent des données minéralogiques, chimiques et topographiques. Le 3 septembre 2006, SMART-1 (287 kg) est volontairement désorbité et s'écrase à 7.200 km/h au milieu de la formation géologique appelée Lac de l'Excellence⁵⁶. Pour justifier cet impact, l'Agence Spatiale Européenne met en avant des arguments inattendus : « la vitesse sera plus lente que celle d'une météorite naturelle... Et le vaisseau spatial entrera sous un angle rasant - comme un sauteur à ski ». Concernant une éventuelle pollution chimique, l'ESA relativise le problème : « Tous les éléments chimiques présents sur SMART-1 et dans ses instruments existent naturellement sur la Lune. » La chimie naturelle vient au secours de la chimie artificielle de même que la radioactivité naturelle légitime dans les propos officiels la radioactivité artificielle. Comparant l'engin à « une comète artificielle », l'agence ajoute « De plus, le peu d'hydrazine restant dans les propulseurs de SMART-1 brûlera immédiatement au moment de l'impact. » D'ailleurs « Nous ne devrions pas y penser comme à un déchet. » Et l'ESA de conclure : « ...la partie principale de SMART-1 pourrait rester sur la surface lunaire comme un monument à l'exploration spatiale européenne. »⁵⁷

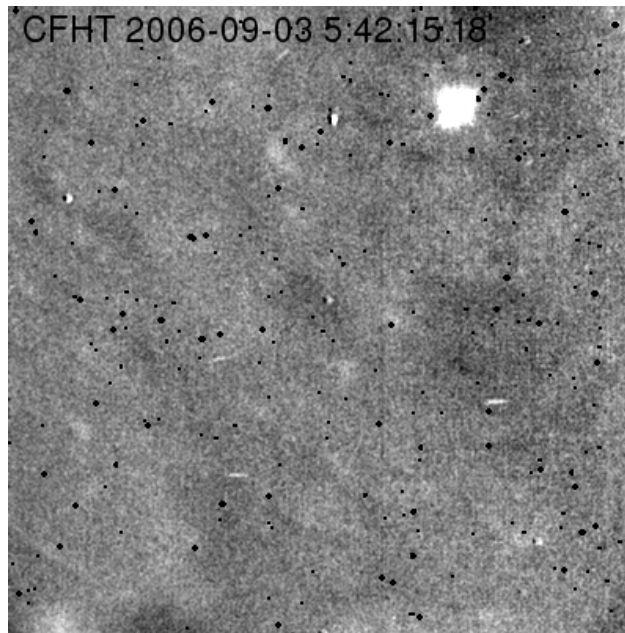
⁵³ "Detection of Water in the LCROSS Ejecta Plume", A. Colaprete *et al.*, Science, n°330, pp. 463-468, 22 octobre 2010.

⁵⁴ "Le sol lunaire plus riche et complexe qu'on ne le soupçonnait", Jean-Louis Santini, AFP, 21 octobre 2010.

⁵⁵ <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1990-007A>

⁵⁶ "SMART-1, By Sun power to the Moon", N. Calder, ESA Publications Division, 2002.

⁵⁷ "SMART-1 Impact Frequently Asked Questions (FAQs)", ESA, 29 août 2006
http://www.esa.int/SPECIALS/SMART-1/SEMWSW5LARE_0.html



Impact de SMART-1 sur la Lune, le 3 septembre 2006.
Photo ESA.

En 2007 le lancement du satellite Kaguya (également appelé SELENE) d'une masse de 2,9 t transportant deux satellites relais de 53 kg -Okina et Ouna- est présenté par le Japon comme « la mission lunaire la plus importante depuis le programme Apollo. » Comme prévu, les engins se sont écrasés sur la Lune en fin de mission les 12 février (Okina) et 11 juin 2009 (Kaguya). La date de la chute d'Ouna n'est pas précisée.⁵⁸

La Chine a inauguré en octobre 2007 son programme d'exploration lunaire par le lancement du satellite Chang'e 1 destiné à cartographier l'astre en trois dimensions et à relever l'abondance et la distribution de 14 éléments chimiques. Le 1er mars 2009 le satellite de 2,3 t s'est écrasé sur la Lune.⁵⁹

En octobre 2008, l'Inde envoie le satellite Chandrayaan-1 pour une mission de deux ans en orbite lunaire, au cours de laquelle il libère la Sonde d'Impact Lunaire (Moon Impact Probe - MIP) qui s'abat le 14 novembre 2008 à proximité du cratère Shackelton, au pôle sud. Le but, encore une fois, était de confirmer la présence d'eau dans le panache dégagé par le choc. En août 2009, le contact avec Chandrayaan-1 est soudainement rompu. Selon les scientifiques indiens, il devait orbiter encore environ 1.000 jours avant de s'écraser sur un site lunaire non identifié. Il pèse 675 kg.⁶⁰

Tous ces écrasements, percussions, destructions et abandons de déchets sont en contradiction avec « l'Accord régissant les activités des Etats sur la Lune et les autres corps célestes » (cf. chapitre X : la réglementation internationale).

⁵⁸ http://www.jaxa.jp/projects/sat/selene/index_e.html

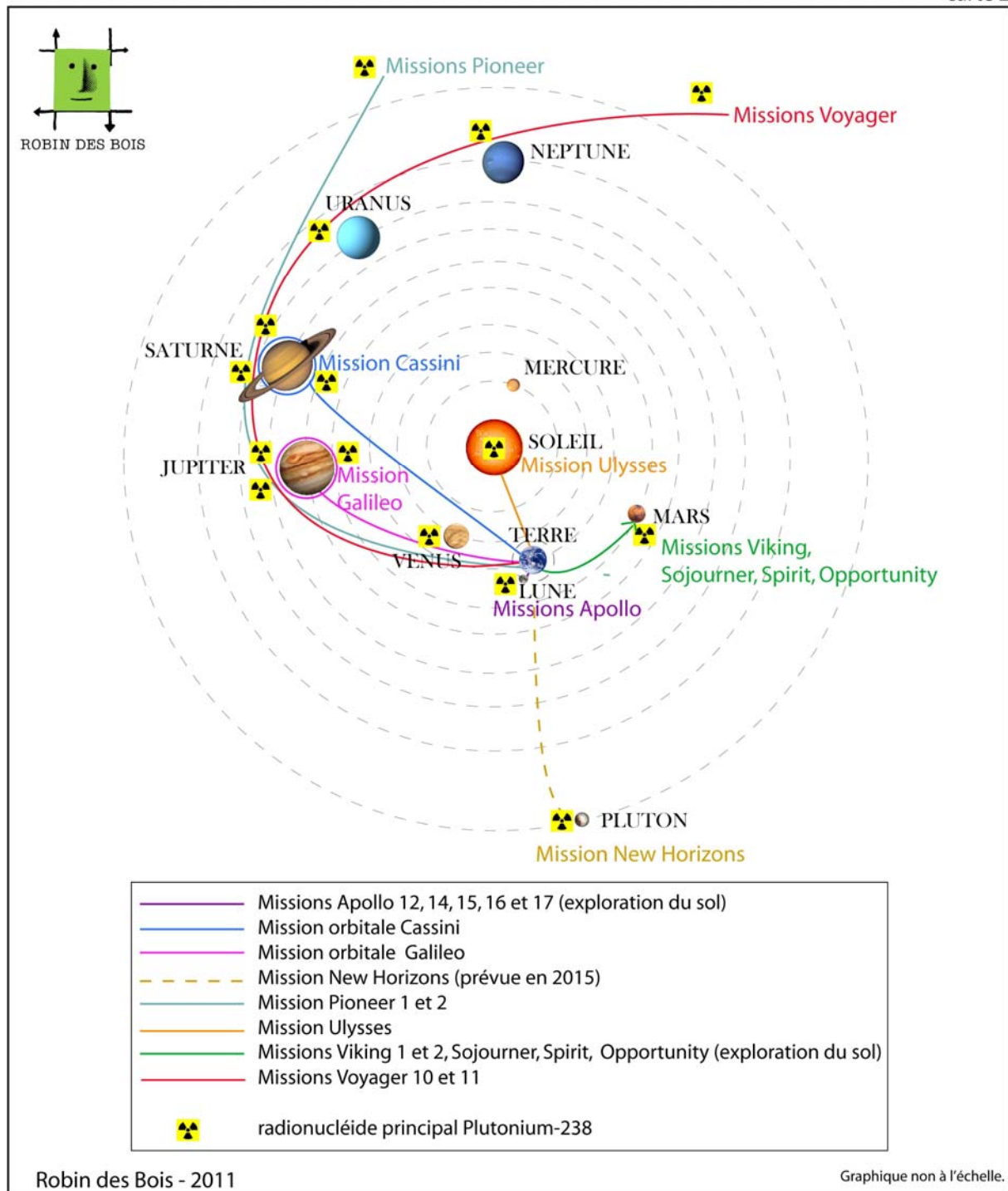
⁵⁹ "China's lunar probe Chang'e-1 impacts moon", Du Guodong, XINHUA, 1er mars 2009.

⁶⁰ http://www.isro.gov.in/chandrayaan/htmls/spacecraft_description.htm

VIII- Industrie spatiale et nucléaire

Les déchets nucléaires dans le système solaire et au-delà missions interplanétaires et lunaires

carte 2



Sources : G.L.Bennett, Space Nuclear Power : Opening the Final Frontier

Dans l'espace, les radionucléides principalement utilisés ont été le polonium 210 puis le plutonium 238 et l'uranium 235. A très faibles doses, ils exposent les populations humaines, la biodiversité et l'environnement à des risques multiples. Leurs demi-vies respectives sont de 138 jours, 87,7 ans et 704 millions d'années. Après 264 ans, le plutonium 238 dégage encore 12,5 % de sa radioactivité initiale.

²¹⁰ Po : polonium 210	Ci : curie
²³⁸ Pu : plutonium 238	Bq : becquerel
²³⁵ U : uranium 235	1 Ci = 37 milliards de Bq

En 1959, le président américain Eisenhower déclare fièrement et pacifiquement que la première batterie atomique était inventée et allait bientôt participer à la conquête de l'espace. Deux ans après, un satellite américain était effectivement équipé d'un SNAP (Systems for Nuclear Auxiliary Power). Pendant les 15 ans de sa durée de vie, le Transit 4A a bénéficié de l'électricité atomique produite à partir du ²³⁸Pu. Le Transit 5 sombrera au dessus de l'océan Indien (cf. chapitre IX §1 : le boomerang radioactif).

En 2011, 52 ans plus tard, la NASA déplore ne plus disposer d'un stock suffisant de ²³⁸Pu pour assurer l'autonomie de ses missions interplanétaires planifiées entre 2014 et 2028. Seuls les réacteurs expérimentaux de l'Idaho et d'Oak Ridge seraient capables de le produire à partir de Neptunium 237 à la condition de commencer à débloquer dans les meilleurs délais un budget de 150 millions de dollars.

En France, autre pays atomique, le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) s'est en 1982 rapproché du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) en vue de concevoir et d'expérimenter des réacteurs nucléaires fonctionnant à l'²³⁵U et au lithium. Le groupe multidisciplinaire ERATO (Electro Remorqueur Atomique de Transfert Orbital) avait aussi mis au point des variantes modèles réduits des surgénérateurs Rapsodie, Phénix et Superphénix. Il s'agissait de tracter les satellites depuis l'orbite basse jusqu'à l'orbite géostationnaire. Le Service Central de Sécurité des Installations Nucléaires (SCSIN) s'est penché sur les règles de sécurité minimales garantissant le blindage et l'allumage différé des réacteurs sur une orbite suffisamment élevée. A cette époque, l'URSS voulait envoyer des hommes sur Mars et était en train d'ébaucher un vaisseau spatial de 400 tonnes à propulsion nucléaire. Une coopération spatiale franco-russe a été alors envisagée.

Si l'énergie nucléaire apparaît aujourd'hui encore nécessaire aux acteurs de l'exploration spatiale, l'espace sans nul doute apparaît encore à certains spécialistes comme l'exutoire d'avenir pour les déchets nucléaires produits sur Terre. Ainsi en avril 2000, le groupe de travail de l'UNESCO sur l'éthique de l'espace extra-atmosphérique dépendant de la Commission Mondiale d'Ethique des connaissances Scientifiques et des Technologies (COMEST) présidée par Madame Vigdis Finnbogadóttir, présidente de l'Islande de 1980 à 1996, déclarait sans ambiguïté : **« A moyen terme, il existe d'autres modes d'intervention de la technique spatiale qui supposent qu'interviennent des progrès majeurs, singulièrement en ce qui concerne le transport spatial depuis la Terre vers l'orbite. Le plus immédiatement accessible est l'utilisation du système de transport spatial pour débarrasser la surface de la planète des déchets les plus dangereux de l'activité humaine et notamment des déchets provenant de l'industrie**

nucléaire. L'espace circumsolaire, à grande distance de la Terre offre à cet égard des capacités de stockage illimitées pour des durées indéfinies. »

Le groupe de travail de l'UNESCO était composé de 6 experts internationaux dont Monsieur André Lebeau, ancien directeur général adjoint de l'Agence Spatiale Européenne, ancien président du Centre National d'Etudes Spatiales et ex-directeur de Météo France.

Une explosion au moment du lancement, ou peu après, d'un convoi spatial embarquant des matériaux radioactifs est le risque principal pour les populations humaines. L'impact de la contamination de l'environnement spatial, des planètes et de leurs satellites par des isotopes radioactifs artificiels n'est pas pris en considération malgré le Traité de 1967 régissant les activités des Etats en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes, qui dans son article IX précise que « les Etats parties procéderont à leur exploration de manière à éviter les effets préjudiciables de leur contamination ».

Déchets nucléaires et orbite cimetière

51 satellites ou éléments de Satellites Hors d'Usage contenant une ou plusieurs charges d'isotopes radioactifs évoluent actuellement sur des orbites basses autour de la Terre. 45 appartiennent à la Russie, mais ont été lancés par l'URSS⁶¹, et 6 sont détenus par les Etats-Unis⁶².

Deux types de matériels utilisant l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité ont été utilisés dans l'espace : les réacteurs nucléaires et les générateurs thermoélectriques à radio-isotopes.

Dans un réacteur, la source d'énergie est la chaleur générée par la fission de l'²³⁵U.

Dans un générateur thermoélectrique, c'est la désintégration naturelle des radio-isotopes qui produit la chaleur. Le ²³⁸Pu est l'isotope employé dans tous les générateurs américains, tandis que les soviétiques utilisaient le ²¹⁰Po.

Dans les réacteurs comme dans les générateurs thermoélectriques, la chaleur est transférée à un système de conversion qui la transforme en électricité.

Le premier satellite alimenté en électricité par un générateur à énergie nucléaire a donc été lancé dès le 29 juin 1961 par les Etats-Unis. Dénommé Transit 4A, il était le premier d'une série de 5 Transit utilisant un générateur thermoélectrique à radio-isotopes SNAP-9A (0,91 kg de ²³⁸Pu), dérivé de modèles installés sur des phares et des stations de surveillance océanique flottantes déployées par l'U.S. Navy. Ils furent suivis en 1968 et 1969 par deux satellites météorologiques Nimbus transportant chacun 2 générateurs thermoélectriques à radio-isotopes. Nimbus I est tombé à l'eau en 1968 (cf. chapitre IX §1 : le boomerang radioactif). Après cet accident, les Etats-Unis n'utilisèrent plus l'énergie nucléaire à bord de satellites sur des orbites basses.

L'URSS a lancé 44 satellites utilisant une source d'énergie nucléaire de 1965 à 1988, dont 40 utilisaient un réacteur à fission, et 4 un générateur thermoélectrique à radio-

⁶¹ "Spacecraft with a Nuclear Power System and Problems of Space Debris", A.I. Nazarenko *et al*, Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18-20 April 2005 – European Space Agency, août 2005.

⁶² "Radioisotope Power Systems: An Imperative for Maintaining U.S. Leadership in Space Exploration", National Research Council - National Academies Press, 2009.

isotopes. 31 satellites de reconnaissance radar des océans lancés par l'Union Soviétique entre 1967 et 1988, les RORSAT (Radar Ocean Reconnaissance SATellite), évoluaient entre 255 et 270 km d'altitude. Ils surveillaient les activités de la flotte militaire des États-Unis. Leur durée de vie en activité était courte, d'une journée à quelques mois. Deux sont retombés sur Terre, les autres sont toujours en orbite. En fin de vie, le satellite était en théorie éjecté sur une orbite cimetière autour de 950 km afin d'éviter la rentrée potentiellement catastrophique des matières radioactives (31,1 kg d'un alliage uranium-molybdène à 90% d'uranium enrichi – ^{235}U)⁶³. Cette orbite cimetière est censée assurer aux réacteurs une durée de vie en orbite de 600 ans, jugée suffisante par les ingénieurs soviétiques pour permettre une décroissance de la radioactivité avant le retour inévitable sur Terre.

A partir de Kosmos-1176 (29 avril 1980), les 16 derniers satellites de la série étaient équipés d'un dispositif d'éjection des sources radioactives vers l'orbite cimetière. Cette opération était présentée comme une mesure de sûreté nucléaire. Elle tirait les enseignements de la chute du Kosmos 954 survenue en 1978 (cf. chapitre IX §1 : le boomerang radioactif). Les assemblages de barres d' ^{235}U libérés dans l'espace sont supposés se consumer lorsqu'ils retomberont dans l'atmosphère terrestre. L'éjection des sources a échoué trois fois. Trois autres dont l'éjection semble avoir réussi n'ont pas été détectées et leur position reste donc inconnue. Elles ont pu se fragmenter en déchets de tailles inférieures aux limites de détection.

Des essaims de gouttes et gouttelettes d'un alliage de sodium et de potassium (NaK) ont été repérés entre 850 et 1.000 km d'altitude. Ils proviennent de fuites générées lors de l'éjection des barres d'uranium. Chaque satellite contenait 9 kg de cet alliage liquide assurant le refroidissement du réacteur nucléaire embarqué.

Il apparaît que cette éjection du cœur est à l'origine des fuites de circuits de refroidissement. La quantité de gouttes et de gouttelettes a été estimée entre 110.000 et 115.000, pour un poids total de 60 kg. Le diamètre de ces sphérules de métal varie de 5-7 cm à environ 1 cm, pour celles qui ont été détectées par le radar Goldstone du Massachusetts Institute of Technology. Les gouttelettes de diamètres inférieurs, entre 0,1 et 1 mm, sont estimées représenter un flux de particules 12 fois supérieur au flux naturel de micrométéorites présentes à cette altitude.⁶⁴

Selon Don Kessler, le spécialiste américain des déchets spatiaux qui est avec son équipe à l'origine de la découverte de ces essaims, il s'agit du « risque d'impact le plus significatif pour un engin spatial opérant à ces altitudes ».⁶⁵

Ces gouttes sont radioactives : l'irradiation du NaK par l' ^{235}U pendant le fonctionnement du réacteur a provoqué la création de deux isotopes, le sodium 24 et l'argon 39. Si la période du premier est courte - 15 heures -, celle de l'argon 39 est de 269 ans. La quantité d'isotopes radioactifs présente dans les gouttes n'a pas été évaluée.

Il resterait plus de 200 kg de NaK dans les réacteurs abandonnés sur l'orbite cimetière. D'autres fuites sont prévisibles, qu'elles soient provoquées par la collision des réacteurs avec d'autres déchets spatiaux ou des météorites, ou par la corrosion des circuits de refroidissement.

⁶³ « Background on Space Nuclear Power », Steven AFTERGOOD – Science and Global Security, Vol.1, pp. 93-107, 1989.

⁶⁴ « The Importance of Non-Fragmentation Sources of Debris to the Environment », D. KESSLER *et al* – Advances in Space Research, Vol. 23, No.1, pp. 149-159, 1999.

⁶⁵ « Havoc in the Heavens : Soviet-Era Satellite's Leaky Reactor's Lethal Legacy », Leonard DAVID – SPACE.COM, 29/03/2004. http://www.space.com/news/mystery_monday_040329.html

Un satellite de la série RORSAT, Kosmos-1900, n'a pas atteint l'orbite cimetière autour de 950 km. Il est en orbite entre 700 et 740 km d'altitude, et pourrait donc être le premier à retomber sur Terre, dans moins de 500 ans.

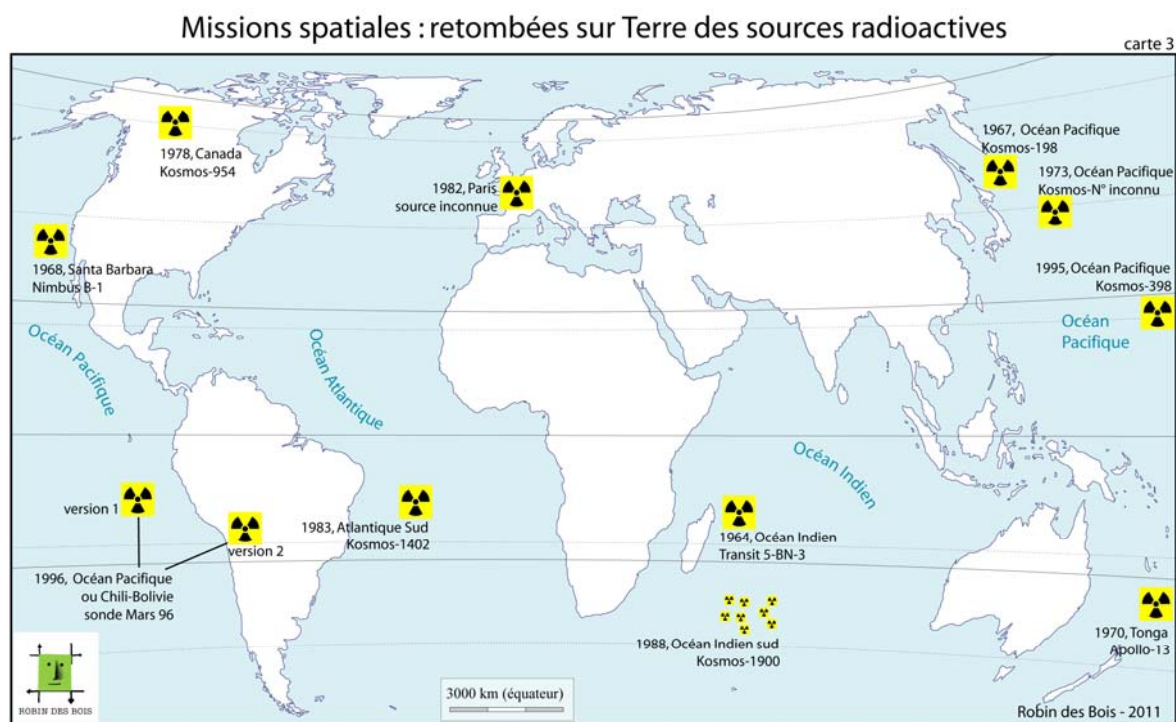
Si les satellites russes ou américains abandonnés chargés de combustibles radioactifs viennent à percuter un déchet spatial, la durée de vie en orbite des fragments produits sera considérablement réduite. La dislocation projetée des déchets dans toutes les directions, y compris les basses altitudes précipitant la retombée dans l'atmosphère terrestre. La probabilité qu'un des assemblages de barres d'uranium éjectés par des satellites RORSAT entre en collision à une vitesse moyenne de 12 km/s avec un déchet spatial létal de 3,5 cm est estimée dans une étude russe à 10^{-6} (un risque pour un million) risques par an pour chacune des 13 sources identifiées⁶⁶.

IX- Les rentrées sur Terre

1- Le boomerang radioactif

« Une fraction significativement importante - environ 15 % - de toutes les missions spatiales américaines et soviétiques utilisant l'énergie nucléaire se sont terminées par des accidents, des échecs au lancement, ou d'autres pannes. »⁶⁷

11 satellites équipés de réacteurs nucléaires ou de générateurs thermoélectriques à radio-isotopes sont retombés dans l'atmosphère depuis les années 60 et ont atteint la terre ferme ou la mer. L'énergie à bord était produite par du ^{238}Pu et de l' ^{235}U .



⁶⁶ "Spacecraft with a Nuclear Power System and Problems of Space Debris", A.I. Nazarenko *et al*, op. cité.

⁶⁷ « Background on Space Nuclear Power », op. cité.

1964 : Transit 5-BN-3. Océan Indien

Survenu le 21 avril 1964 en pleine guerre froide, et concernant un engin contrôlé par l'U.S. Navy, peu d'informations ont filtré. Ayant échoué à rejoindre son orbite, le satellite militaire de navigation retomba dans l'atmosphère le jour de son lancement et se désintégra à 50 km d'altitude au-dessus de l'océan Indien, selon une procédure prévue en cas de rentrée. L'immersion partielle de déchets contaminés n'est pas contestable.

Son générateur thermoélectrique à radio-isotopes, le SNAP-9A, contenait 1 kg de ^{238}Pu . En août 1964, le ^{238}Pu est détecté dans la stratosphère à 32 km d'altitude au-dessus de l'hémisphère sud. En mai 1965 des poussières radioactives sont détectées par les avions. Il y a 4 fois plus de ^{238}Pu mesuré dans l'hémisphère sud que dans l'hémisphère nord. En novembre 1970, 95% du plutonium dispersé dans l'atmosphère par la dislocation de Transit 5-BN-3 est retombé sur Terre. Il est détecté sur tous les continents et à toutes les latitudes, mais 25% sont retombés dans l'hémisphère nord et 75% dans l'hémisphère sud⁶⁸.

La dispersion de la source d'énergie de Transit 5-BN-3 dans l'atmosphère sous forme de poussières de ^{238}Pu a généré une radioactivité totale de $6,3 \times 10^{14}$ Bq, soit 17.000 Ci. En comparaison, l'ensemble des tests nucléaires atmosphériques de 1945 à 1974 a libéré une radioactivité totale de $3,3 \times 10^{14}$ Bq (9.000 Ci) en ^{238}Pu .

1967 : Kosmos 198. Océan Pacifique Nord

Le 27 décembre le Kosmos 198 rate sa mise en orbite. Il plonge dans l'océan Pacifique au nord du Japon. La radioactivité consécutive (^{235}U) a été mesurée.

1968 : Nimbus B-1-. Santa Barbara, Californie

Alimenté par un générateur au ^{238}Pu de 34.000 Ci, le premier satellite météorologique américain a été victime d'un accident de lanceur. Il est retombé au large de Santa Barbara. Plusieurs mois après le combustible nucléaire a été récupéré par 100 m de fond en bon état selon les déclarations officielles.

1970 : Apollo. Pacifique Sud

La mission lunaire Apollo explose après lancement. 44.500 Ci seraient toujours confinées dans la fosse sous-marine de Tonga dans le Pacifique Sud.

1973 : Kosmos. Océan Pacifique

Un satellite Kosmos dont le numéro est inconnu, du type Rorsat, est tombé dans l'océan Pacifique après une défaillance du lanceur.

1978 : Kosmos-954. Canada

La chute de ce satellite de 4 t sur le Canada le 24 janvier 1978 aurait pris la dimension d'un désastre en zone urbanisée : son réacteur nucléaire était alimenté par une charge de 31,1 kg d' ^{235}U . Les déchets ont contaminé une surface de plus de 124.000 km² dans les Territoires du Nord-Ouest, les provinces d'Alberta et du Saskatchewan⁶⁹. Selon la Commission canadienne de sûreté nucléaire, seulement

⁶⁸ "Final Environmental Impact Statement for the Cassini Mission", Solar System Exploration Division – NASA, juin 1995.

⁶⁹ «Why Canada Needs a Robust Arctic Air Rescue Capability », Ron Wallace – Canadian Defence & Foreign Affairs Institute, mars 2009.

0,1 % de la masse totale d'uranium contenue dans le cœur du réacteur a été retrouvée⁷⁰.

Il a été estimé qu'environ un quart, soit 7,7 kg de cette masse totale, s'est déposé dans les Territoires du Nord-Ouest sous la forme de particules de taille inférieure à 1 mm contenant de l'²³⁵U et des produits de fission (strontium 90, iode 131, zirconium 95, niobium 95, ruthénium 103, ruthénium 106, césium 137, cérium 141 et cérium 144)⁷¹. Ces microparticules n'ont pas été collectées. Le reste du réacteur est présumé s'être dispersé dans l'atmosphère avant de toucher le sol.

Kosmos-954 était l'un des satellites-espions soviétiques les plus perfectionnés, conçu pour détecter les sous-marins nucléaires américains en plongée, ce qui explique l'intensité des opérations de recherche des déchets et la forte participation d'experts et de moyens militaires des États-Unis. Lancé le 18 septembre 1977 à 150 km d'altitude en orbite polaire, il était pisté par les radars du North American Air Defense Command (NORAD). Ceux-ci détectèrent à partir de novembre un déclin de l'orbite de Kosmos-954, puis sa perte totale de stabilisation le 6 janvier 1978. La date de sa rentrée fut estimée par le NORAD au 24 janvier, avec une marge d'erreur de deux jours.⁷² Le lieu de l'impact, lui, était imprévisible.

Dès le 19 décembre, les États-Unis avaient créé un groupe de travail piloté par le Conseil National de Sécurité (National Security Council – NSC), le retour sur Terre à court terme de Kosmos-954 étant jugé inévitable. Composé de spécialistes du renseignement (Defense Intelligence Agency), d'experts en radioprotection des ministères de l'Énergie et de la Défense, et de diplomates du Département d'État, le groupe fut baptisé du nom de code « Operation Morning Light ». La décision fut prise de ne pas faire d'annonce publique, et de n'informer que les alliés des États-Unis de la rentrée du satellite et de la possibilité qu'il s'écrase sur leur territoire. Ni le Secrétaire général des Nations-Unies, ni le Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique (COPUOS) de l'ONU ne furent prévenus. Du côté russe, le mutisme fut total envers l'ONU et la communauté internationale. Interrogés discrètement par les États-Unis sur la présence d'un réacteur nucléaire à bord, les Soviétiques répondirent que celui-ci était conçu pour être détruit par combustion lors de sa rentrée dans les couches denses de l'atmosphère, mais que « Néanmoins, au regard d'un accident à bord du satellite (dépressurisation), il ne peut pas être exclu que certaines parties du réacteur atteignent la surface terrestre. Dans ce cas une contamination locale insignifiante pourrait se produire sur les lieux de l'impact avec la Terre, qui nécessiterait des mesures limitées de nettoyage courant. »⁷³

A partir du 22 janvier, les États-Unis mirent en alerte leurs unités de recherche et d'intervention en ambiance nucléaire, et chargèrent le matériel à bord d'avions de transport prêts à décoller sur les bases militaires d'Andrews (Washington, D.C.), de Travis (Californie), et sur l'aéroport international de Las Vegas (Nevada).

Le 24 janvier 1978, à 11h53 en Temps Universel, Kosmos-954 pénétrait l'espace aérien canadien par la côte ouest, au nord des îles de la Reine Charlotte, après une combustion d'environ 3 minutes. L'empreinte des retombées au sol - les morceaux

⁷⁰ "The COSMOS 954 Accident", Santé Canada.

http://www.hc-sc.gc.ca/hc-ps/ed-ud/fedplan/cosmos_954-eng.php

⁷¹ "Health Impact of Radioactive Debris from the Satellite Cosmos 954 », B. L. Tracy, F. A. Prantl, J. M. Quinn - Health Physics, vol. 47(2), pp. 225-233, août 1984.

⁷² "The Life and Death of Cosmos 954", Gus W. Weiss - Studies in Intelligence, 22, 1 (Printemps 1974), pp. 1-7.

⁷³ "The Life and Death of Cosmos 954", *op. cit.*

les plus lourds s'écrasant en premier - s'étendit sur plus de 800 km de long, de l'ouest du Grand Lac des Esclaves au nord du lac Baker. Les déchets les plus légers (matériaux d'isolation, poussières et fragments...) furent localement remobilisés par le vent et transportés au-delà de l'empreinte de la trajectoire d'impact.

L'un des témoins visuels de la chute de Kosmos-954, une habitante de Yellowknife sur le bord du Grand lac des Esclaves, déclara avoir observé « ...comme un avion à réaction en feu. Il y avait des douzaines de petits morceaux accompagnant le corps principal, tous en combustion et chacun avec une petite traînée de feu comme le gros morceau. »⁷⁴

Le Président Jimmy Carter avertit le Premier ministre canadien Pierre Trudeau par un appel téléphonique 22 minutes après l'impact du satellite, lui proposant l'aide des moyens américains mobilisés pour l'opération « Morning Light ». L'offre fut acceptée, et les premiers appareils de transport C-130 chargés de personnels et d'équipements de détection et de radioprotection se posèrent le soir même sur la base aérienne d'Edmonton, en Alberta. Des avions U2 sillonnaient déjà à haute altitude l'espace aérien canadien afin d'y mesurer les concentrations en ²³⁵U.

L'annonce de la chute de Kosmos-954 sur le Canada fut rendue publique. Les Soviétiques proposèrent l'envoi d'un groupe de spécialistes « ...afin d'atténuer les conséquences possibles et d'évacuer les restes du satellite. »⁷⁵ L'offre fut diplomatiquement refusée par le Canada, qui attendait plutôt les spécifications techniques du réacteur et de la charge embarquée. Mais aucune donnée précise ne fut fournie par l'URSS.

Le lendemain du crash les premiers vols de reconnaissance à basse altitude embarquant des détecteurs de radioactivité entamaient le quadrillage de l'immense zone d'impact. Le 26 janvier une équipe au sol débarquait à proximité du lac Baker. Les premiers points chauds radioactifs furent détectés par avion le 28 janvier dans la baie McLeod, sur le Grand Lac des Esclaves. Les lacs étant gelés à cette époque de l'année, les déchets reposaient sur la glace. Ils étaient ainsi plus facilement détectables qu'au sol, la colonne d'eau les isolant de la radioactivité naturelle du substrat, au fond du lac.

⁷⁴ « Cosmos 954: An Ugly Death », TIME, 6 février 1978.

⁷⁵ « Settlement of Claim between Canada and the Union of Soviet Socialist Republics for Damage Caused by Cosmos 954 », 2 avril 1981.



Equipe de détection des Forces Aériennes Royales du Canada, opération Morning Light.

En dépit des moyens déployés - 250 experts canadiens, 120 américains, plus de 600 missions de détection par avions et hélicoptères pendant les deux premiers mois -, le premier déchet retrouvé au sol fut découvert par deux randonneurs, sur la glace de la rivière Thelon. Ils n'avaient pas écouté les informations, aussi examinèrent-ils sans précautions l'étrange pièce de métal. De retour à leur camp de base, des amis les informèrent de la chute de Kosmos-954 et de son réacteur nucléaire, et alertèrent les autorités. Ils furent emmenés sur la base d'Edmonton pour y être examinés et déclarés exempts d'irradiation ou de contamination⁷⁶. Un véritable miracle, lorsqu'on rapproche ce résultat inespéré de la plainte formulée par le Canada devant l'ONU : « Les autorités canadiennes ont déterminé que tous les fragments découverts étaient radioactifs, sauf deux. Certains fragments localisés étaient d'une radioactivité létale. »⁷⁷

L'opération « Morning Light » se poursuivit pendant 9 mois dans des conditions extrêmes. Un camp de base principal accueillant jusqu'à 100 personnes fut installé près du lac Baker, dans des conditions arctiques. Pendant l'hiver, les températures sous abri descendaient à -40° C, le refroidissement éolien atteignit certains jours de tempête -100°C.

Les avions C130 équipés de détecteurs de radioactivité effectuaient des reconnaissances 24h/24. Les données recueillies étaient analysées au camp de base, et une équipe au sol était ensuite envoyée collecter les déchets dans des conteneurs en plomb. Les températures polaires n'autorisaient parfois que quelques minutes de travail en plein air. Les difficultés de déplacement dans la neige et sur la glace, le froid, l'isolement, les risques mortels encourus lors de la manipulation de certains déchets, pesèrent fortement sur le moral des équipes.

⁷⁶ "Operation Morning Light: Northwest Territories, Canada, 1979; a non-technical summary of United States participation", U.S. Dept. of Energy, 1978.

⁷⁷ « Settlement of Claim between Canada and the Union of Soviet Socialist Republics for Damage Caused by « Cosmos 954 », 2 avril 1981.

Encore une fois, les probabilités étaient très faibles, mais le hasard fit mal les choses. Le village inuit de Snowdrift fut atteint par les retombées de déchets radioactifs. Une équipe de détection y collecta de nombreux morceaux de petite taille. Le commandant du quartier général de la Région nord vint en personne affirmer aux habitants que « peu ou aucun effet écologique n'est attendu ». Les documents disponibles sur l'opération « Morning Light », de sources officielles américaines ou canadiennes, ne s'appesantissent pas sur le bilan radiologique des populations et des personnels militaires exposés aux déchets dispersés par Kosmos-954.



Collecte des déchets radioactifs sur le Grand Lac des Esclaves.
Photo U.S. Department of Energy.

L'arrêt des opérations, en octobre 1978, fut motivé par trois considérations principales :

- « Il est hautement probable que tous les morceaux radioactifs détectables de grande taille ont été localisés et collectés » ;
- « Avec les meilleures technologies disponibles actuellement, il serait impossible de localiser et de collecter plus qu'un faible pourcentage des déchets restants, qui consistent pour la plus grande part en de petites particules » ;
- « La collecte supplémentaire de tout morceau restant n'est pas praticable au sol et impossible dans le Grand Lac des Esclaves à cause de leur large dispersion, de la nature du terrain, et du dégel du lac ». ⁷⁸

⁷⁸ "Operation Morning Light: Northwest Territories, Canada, 1979; a non-technical summary of United States participation", *op. cité*.

En 1979 des isotopes de l'uranium correspondant à la signature du réacteur de Kosmos-954 ont été détectés dans la stratosphère. La quantité d' ^{235}U relarguée par le satellite est alors estimée « pouvoir accroître la concentration de ^{235}U dans la stratosphère jusqu'à 100% (de 0,7% à 1,4%) »⁷⁹. Comme dans le cas de Transit 5-BN-3, les particules les plus fines ont été mobilisées par les courants atmosphériques, dispersées sur de vastes surfaces, et détectées pendant plusieurs années dans l'air et dans les eaux de pluies. Une étude visant à mesurer les concentrations en uranium dans les eaux de pluies collectées à Fayetteville, dans l'Arkansas, suite à l'éruption du volcan Mont St Helens (18 mai 1980), a mis en évidence la persistance en 1980 et 1981 des retombées de radioéléments issus de Kosmos-954⁸⁰.

Au Japon, une équipe de météorologues a recherché l'uranium entre juin 1980 et juin 1981 dans l'air et les eaux de pluies de Tokyo et de Tsukuba, et a comparé les résultats avec des mesures obtenues en 1979. Après avoir enregistré de fortes augmentations des teneurs en uranium pendant les mois de mars 1979 et mars 1981, et les avoir rapprochées des concentrations mesurées d'avril à mai 1980 au-dessus de l'océan Pacifique, les scientifiques affirment qu'il y a « toute raison de croire que le taux d'activité anormalement élevé et l'augmentation abrupte du rapport $^{234}\text{U} / ^{238}\text{U}$ dans l'air de surface au printemps, au Japon et au-dessus de l'océan, ont été occasionnés par la désintégration du satellite russe Kosmos-954. Cet effet est présumé se poursuivre encore plusieurs années. »⁸¹

Le 2 avril 1981, le Canada et l'URSS signèrent à Moscou un protocole formel « réglant la plainte du Canada pour les dommages causés par la désintégration au-dessus du Canada du satellite soviétique Kosmos 954 ». Ce document s'appuyait sur la Convention des Nations Unies « sur la responsabilité internationale pour les dommages causés par des objets spatiaux ». Le Canada accepta 3 millions de dollars canadiens en dédommagement, alors qu'il en réclamait 6.

1982 : Source non identifiée. Paris

Le Journal of Environmental Radioactivity rapporte dans un article écrit en 1988 par 2 scientifiques⁸² qu'une bouffée importante de ^{238}Pu a été mesurée dans les eaux de pluies sur Paris en octobre 1982. Les auteurs n'identifient pas formellement l'origine. Le ^{238}Pu très rare et très coûteux est exclusivement utilisé par l'industrie spatiale civile ou militaire. L'origine satellitaire de cette pollution est privilégiée au même titre qu'une fuite dans un centre de recherches en Ile-de-France.

1983 : Kosmos 1402. Atlantique Sud

La chute de Kosmos 954 et la dispersion de ses déchets radioactifs au sol incitèrent les ingénieurs soviétiques à concevoir un réacteur nucléaire spatial dont le cœur radioactif serait éjecté en fin de vie du satellite à une altitude de 900 km, où sa durée

⁷⁹ "Atmospheric burn up of the Cosmos-954 reactor", P.W. Krey *et al.* – Science 205, pp.583-585, 1979.

⁸⁰ "Fallout of uranium isotopes from the 1980 eruption of Mount St. Helens", P. K. Kuroda, I. O. Essien, D-N Sandoval - Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, pp. 23-32, 1984.

⁸¹ "Concentration of Uranium and the Activity Ratio of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ in Surface Air: Effect of Atmospheric Burn-up of Cosmos-954", K. Hirose, Y. Sugimura – Papers in Meteorology and Geophysics, Vol. 32, No 4, pp. 317-322, décembre 1981.

⁸² Martin J.M. et Thomas A.J., Anomalous concentrations of atmospheric plutonium-238 over Paris. N°7

de vie orbitale devrait permettre à la radioactivité de décroître avant qu'il ne retombe⁸³. Mais sur Kosmos 1402 lancé le 30 août 1982, le système de propulsion du combustible échoua après qu'il se soit séparé du corps principal du satellite. Ce dernier retomba le 23 janvier 1983 au-dessus de l'océan Indien, tandis que le cœur du réacteur chutait le 7 février 1983 au-dessus de l'Atlantique sud, à environ 1.700 km à l'est du Brésil. Il était constitué de 31 kg d'²³⁵U qui se dispersèrent en partie dans l'atmosphère sous forme de poussières. La partie immergée a échappé à toutes recherches et quantification radiologique. Des échantillons de pluie et de neige collectés à Fayetteville par le département de chimie de l'université de l'Arkansas permirent de détecter à partir du 20 février 1983 et jusqu'au 3 juin des isotopes du strontium (⁸⁹Sr et ⁹⁰Sr) issus de la fission du cœur de Kosmos 1402.

Un an après la chute, des échantillons d'aérosols prélevés à l'aide de ballons-sondes révélèrent la présence à 36 km au-dessus de l'hémisphère nord d'une concentration d'²³⁵U provenant aussi du réacteur de Kosmos 1402⁸⁴.

Les conclusions scientifiques sont sans appel : « ... une quantité significative de radioactivité est entrée dans l'atmosphère comme conséquence de la combustion de Kosmos-1402. »⁸⁵

1988 : Kosmos 1900. Sud de l'océan Indien

Le Kosmos 1900, après quelques mois de vie orbitale, a passionné la presse mondiale à partir du printemps 1988 quand il a commencé son déclin non programmé. La presse française était au rendez-vous. « Les autorités françaises ont pris des mesures de sécurité en prévision du retour incontrôlé dans quatre mois d'un satellite espion soviétique Kosmos 1900 doté d'un moteur nucléaire » (source Le Figaro). « Kosmos c'est pour octobre, pas de panique. Le secrétaire d'Etat aux risques majeurs rassure. Le satellite soviétique se désintègrera bien dans 99 jours mais les retombées radioactives sont peu probables » (source Libération). Un vent d'inquiétude et de propagande s'empare du monde. Miracle technique ou manipulation globale : au début de la rentrée atmosphérique, grâce au signal du capteur de chaleur embarqué, le réacteur nucléaire à ²³⁵U se serait séparé du corps du satellite et aurait été éjecté vers une orbite basse cimetière où il devrait rester quelques siècles le temps d'une partielle décroissance radioactive avant de retomber sur la Terre. Le satellite s'est fragmenté et dispersé en une « traînée de poussière » de 1.000 km de long au dessus de l'Afrique avant, selon les informations officielles, de couler au sud de l'océan Indien. Si cette version est la bonne, il n'en est pas moins douteux que le satellite a été contaminé et irradié pendant les quelques mois de vie commune avec son réacteur nucléaire électrogène.

1995 : Kosmos 398. Océan Pacifique

Citée par Le Monde le 14 décembre 1995, l'Agence France Presse annonce que les déchets d'un satellite soviétique lancé en 1971 sont retombés le 9 décembre dans l'océan Pacifique à 2.000 km au sud est des Iles Hawaï. Selon la dépêche, le Kosmos 398 n'était pas porteur de source nucléaire, ce qui prises en compte la date de lancement et la lignée des Kosmos n'est pas crédible.

⁸³ Voir ci-dessus le chapitre « Déchets nucléaires et orbite cimetière »

⁸⁴ « Detection of Uranium from Cosmos-1402 in the Stratosphere », Robert Leifer *et al.*, Science, Vol. 238, n° 4826, pp. 512-514, 23 octobre 1987.

⁸⁵ « Radioactive strontium fallout from the nuclear-powered satellite Cosmos-1402 », R.K. Guimon *et al.*, Geochemical Journal, Vol. 19, pp. 229-235, mars 1985.

1996 : Sonde Mars 96. Océan Pacifique

« Les Terriens préparent l'invasion de Mars » titrait le journal français Libération sur une double page (samedi 16 et dimanche 17 novembre). Hélas, la science fiction fut de courte durée. Malgré la coopération française et allemande, la sonde soviétique Mars 1996 destinée aux plus hautes envolées a plongé, quelques heures après son lancement depuis la base de Baïkonour, dans l'océan Pacifique entre les côtes du Chili et l'île de Pâques selon le commandement militaire américain. Avec, selon les sources d'information, 200 à 299 grammes de ^{238}Pu dans les soutes. « Ce sont de toutes petites capsules de rien du tout, je les ai eues en main, il n'y a pas de danger » déclarait dans le même journal du 18 novembre un expert du CNRS. Une deuxième version est apparue dans la presse, notamment dans le journal américain Christian Science Monitor selon laquelle la chute de la sonde russe aurait touché le désert d'Atacama non loin de la frontière entre la Bolivie et le Chili. Des investigations infructueuses auraient été effectuées sur zone par l'armée américaine.

2- Le boomerang métallique

Selon le ministère de la Défense des Etats-Unis, du lancement de Spoutnik-1 le 4 octobre 1957 jusqu'à juillet 2010, 21.800 objets d'origine anthropique de plus de 10 cm sont retombés dans l'atmosphère terrestre⁸⁶. Si la NASA, par de savants calculs, a pu estimer la probabilité pour qu'un être humain soit atteint par un déchet à 10^{-4} -soit 1 risque sur 10.000- pour chaque rentrée dans l'atmosphère⁸⁷, les accidents déjà enregistrés en cinquante ans de conquête de l'espace montrent que l'industrie spatiale a eu de la chance : on est parfois passé très près de la catastrophe.



Rentrée de la station Mir près des Iles Fidji, le 28 mars 2001. Photo Reuter's.
30 tonnes de déchets dans l'océan Pacifique sud.

Chaque jour, un ou plusieurs déchets suivis par le Space Surveillance Network chutent dans l'atmosphère. Durant les derniers mois de 2010, par exemple, 46 objets sont retombés en septembre, 39 en octobre, 31 en novembre.

⁸⁶ http://www.stratcom.mil/factsheets/jspoc/USSTRATCOM_Space_Control_and_Space_Surveillance/

⁸⁷ "Guidelines and Assessment Procedures for Limiting Orbital Debris", NASA Safety Standard 1740.14, août 1995.

En 2000, une étude réalisée par le Centre d'Etudes de l'Aerospace Corporation sur les Débris Orbitaux et les Rentrées de Débris (CORDS - El Segundo, Californie) évaluait à plus de 193 tonnes la quantité de matériel retombé dans l'atmosphère en 1999⁸⁸. « Sur ce total, nous estimons que 84.000 livres [environ 38 t] ont survécu à la rentrée » déclarait William Ailor, directeur du CORDS⁸⁹. Les océans couvrant 75% de la surface de la Terre, le CORDS estime que 9,5 t de déchets ont atteint le sol.

Lorsqu'ils entament leur chute dans l'atmosphère, les déchets spatiaux ont une vitesse moyenne de 7 km/s (25.200 km/h). Ils sont alors ralentis par la friction des particules atmosphériques jusqu'à une vitesse de quelques centaines de mètres par seconde. La majorité de l'énergie cinétique est ainsi convertie en chaleur durant une phase qui dure moins de 6 minutes, où la température monte jusqu'à 2.700°C. Cet échauffement intense peut faire fondre les structures métalliques d'un satellite et le démanteler, vaporiser certains matériaux ou les disperser en centaines de fragments qui brûlent séparément. Mais de 10 à 40% de la masse de l'objet initial atteint la surface de la Terre⁹⁰. De nombreux éléments internes sont protégés par leur position située derrière des matériaux réfractaires, ou sont de dimensions et d'épaisseurs suffisamment importantes pour résister plusieurs minutes à l'échauffement, comme les réservoirs d'ergols en acier inoxydable et les cuves de gaz de pressurisation en titane.



Cuve en titane tombée en 2003 à proximité d'une ferme à Nacogdoches, Texas.
Photo Steve Liss-Corbis

⁸⁸ "1999 Re-entries of Rocket Bodies and Satellites", R.T. Holbrook - Aerospace Forum on Space Debris, Collision Avoidance, & Reentry Hazards, El Segundo, CA, 1-3 Nov. 2000.

⁸⁹ "After four decades of launching satellites into Earth orbit, space is a polluted junk yard", Leonard DAVID – SPACE.COM, 6 septembre 2000.

⁹⁰ « Analysis of Reentered Debris and Implications for Survivability Modeling », William Ailor *et al.* - Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 18/20 April 2005 – European Space Agency, août 2005.

D'une manière générale, « ...les éléments de satellites fabriqués avec des matériaux ayant un haut point de fusion, comme l'acier inoxydable, le titane ou le béryllium ont tendance à survivre à la rentrée et à impacter la surface de la Terre. »⁹¹ En 2001, 2004 et 2005 trois cuves en titane de modules de propulsion de fusées Delta ont atteint le sol, en Arabie Saoudite, en Argentine et en Thaïlande. Pesant environ 50 kg pour 1,2 m de diamètre, elles représentaient le quart de la masse totale du module de propulsion.



Cuve en titane d'environ 50 kg provenant du troisième étage d'un lanceur Delta 2, retombée le 21 janvier 2001 en Arabie Saoudite après huit années en orbite.

Photo NASA Orbital Debris Program Office.

⁹¹ « The Realities of Reentry Disposal », Dr. Russell P. Patera et Dr. William H. Ailor, Center for Orbital and Reentry Debris Studies, The Aerospace Corporation.



Cuve de lanceur Delta 2 retombée à proximité de Bangkok le 13 janvier 2005.
Photo Orbital Debris Quarterly News.

Les risques statistiques sont minimes, mais le hasard se moque des probabilités. Le 5 juin 1969 un cargo japonais de 3.000 t croisant entre l'île de Sakhaline et la côte de Sibérie, le *Dai Chi Chinei*, a été endommagé et cinq marins ont été blessés par la chute de déchets tombés du ciel – dont certains pesaient environ 10 kg. Après analyse des déchets par des experts japonais, les pièces de métal se sont avérées provenir d'un engin spatial soviétique. Les faits ont été rapportés par la délégation japonaise à la sous-commission juridique des Nations Unies pour l'espace⁹².

Le 19 décembre 1996, un Boeing 757 chinois en vol à 9.600 m d'altitude entre Pékin et Wuhan a été atteint par un déchet non identifié qui a fissuré le vitrage du cockpit. L'avion a effectué un atterrissage d'urgence à Pékin.

En juillet 2009 un habitant de Hull, en Grande-Bretagne, a vu le toit de son pavillon transpercé par un objet brûlant d'environ 2 kg qui a atterri dans son salon. « Ça a été un sacré choc. Si ça avait atterri dans la rue et atteint quelqu'un ça l'aurait tué » déclara l'homme de 75 ans, qui appela la police. Celle-ci transmit l'objet à la Royal Air Force pour qu'elle l'expertise. Après consultations de la NASA et de l'ESA, il s'avéra que le déchet de forme anguleuse provenait d'un satellite indéterminé, et qu'il avait passé une dizaine d'années dans l'espace.

⁹² Journal de la Marine Marchande et de la Navigation Aérienne, n°2586, p.1621, 10 juillet 1969, et Aerospace Corporation : <http://reentrynews.aero.org/recovered.html>

Certaines rentrées sont contrôlées depuis le sol afin de minimiser les risques de retombées sur des régions habitées en dirigeant l'engin vers une zone déterminée de l'océan. Lorsqu'il se sépare de l'ISS après l'avoir ravitaillée, l'ATV européen est ainsi piloté par le Centre de Contrôle du CNES, à Toulouse, afin de le diriger vers une zone de l'océan Pacifique sud d'environ 2.700 km de long sur 200 km de large estimée être inhabitée et éloignée des routes maritimes (cf. chapitre IV-5 : les déchets de l'ISS). Près de 40 % de la masse totale de l'ATV *Jules Verne* (13,5 t) est susceptible d'atteindre la surface de l'eau. Au préalable les Etats riverains de la zone d'impact sont prévenus, à charge pour eux d'émettre des avis de danger aux navigateurs maritimes et aériens. L'Agence Spatiale Européenne affirme que cette procédure permet de réduire à 10^{-7} le risque qu'un débris atteigne un être humain. La séquence de rentrée du premier ATV -le *Jules Verne*- qui s'est déroulée le 29 septembre 2008 est décrite sur le site de l'ESA⁹³ :

12h01 : 1ere manœuvre de désorbitation.

La manœuvre doit faire passer l'ATV de son orbite circulaire à 330 km d'altitude à une orbite elliptique avec un périégée d'altitude entre 220 et 225 km.

12h10 : manœuvre réussie!

L'ATV se situe désormais sur une orbite elliptique avec un périégée d'altitude entre 220 et 225 km. La poussée des moteurs a duré pendant 6 min. 20 sec. (la plus forte de la mission avec 30 m/sec.) Les équipes de l'ATV-CC sont en train de calculer l'altitude précise de cette orbite de façon à déterminer l'horaire exacte du second boost qui devrait avoir lieu aux alentours de 15h. L'ATV aura alors fait 2 fois le tour de la Terre.

12h22 : 2e manœuvre à 14h58.

Les équipes de l'ATV-CC viennent de déterminer l'horaire de la 2e manœuvre de désorbitation. Elle aura lieu à 14h58 précises. L'ATV atteindra alors son point de rentrée au dessus du Pacifique sud.

14h02 : le dernier tour!

L'ATV entame son dernier tour de la Terre avant d'arriver au-dessus du Pacifique sud à 120 km d'altitude. Tout se déroule normalement avec une 2e manœuvre de désorbitation prévue à 14h58 et une rentrée atmosphérique à 15h31.

14h58 : 2e manœuvre de désorbitation

Cette manœuvre doit durer 15 min. et faire chuter le *Jules Verne* de façon à l'amener jusqu'à son point de rentrée atmosphérique au-dessus du Pacifique sud.

La manœuvre s'est parfaitement déroulée. Le *Jules Verne* perd tout doucement de l'altitude, il est actuellement à 230 km.

15h31 : rentrée atmosphérique

L'ATV plonge dans l'atmosphère.

15h33 : perte et destruction des panneaux solaires.

⁹³ <http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/6905-rentree-atmospherique-de-l-atv-29-septembre.php>

15h37 : séparation du système d'amarrage, des boucliers de protection et destruction de la partie supérieure du module pressurisé.

15h37 40" : séparation de la paroi supérieure du module pressurisé.

15h38 20" : fragmentation des tuyères et des réservoirs d'ergols.

15h38 30" : fragmentation des réservoirs et des racks du cargo.

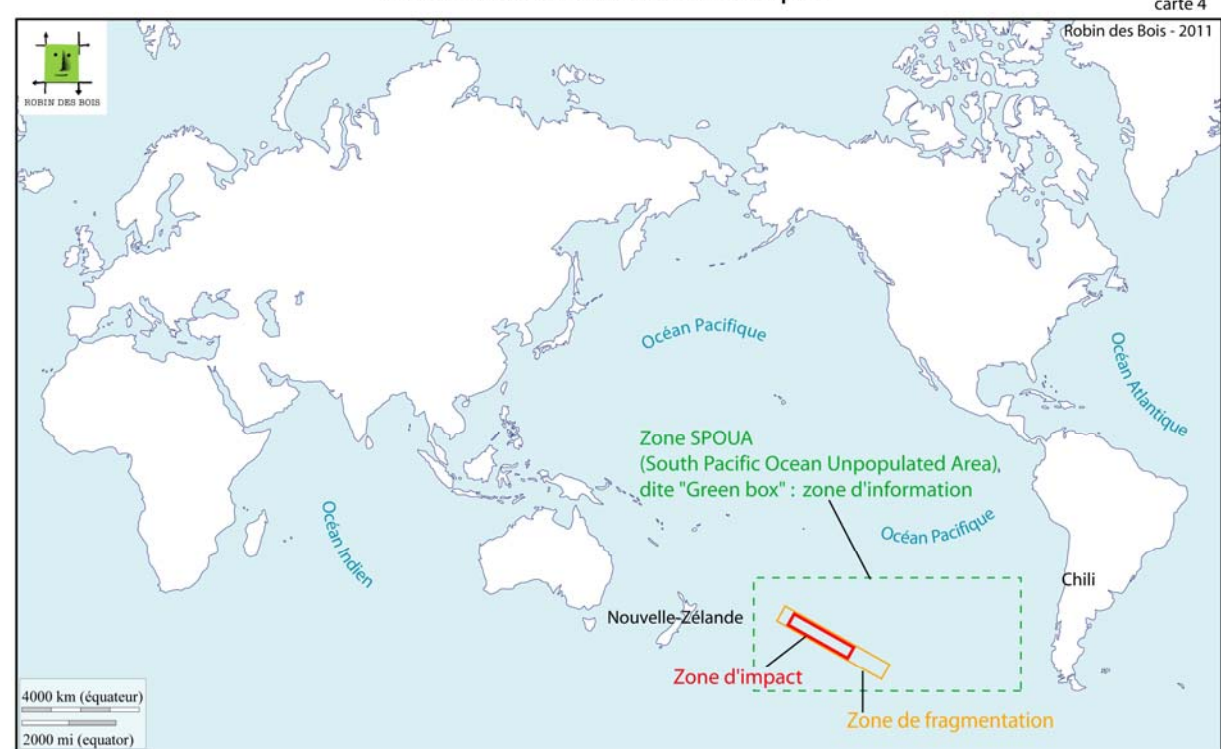
15h38 50" : destruction des réservoirs.

15h39 30" : désintégration des parois.

Les déchets sont retombés en mer dans une zone ciblée, située dans une région inhabitée du Pacifique sud, à 2.500 km à l'est de la Nouvelle-Zélande, 1.000 km à l'ouest du Chili et 1.500 km au sud de l'île de Pâques.

La rentrée de l'ATV *Johannes Kepler* dans la zone SPOUA -South Pacific Ocean Unpopulated Area- est programmée pour le 21 juin 2011.

Le retour de l'ATV Johannes Kepler



Sources : ESA European Space Agency

« Il existe une faible probabilité que des étages, des moteurs ou des éléments du fuselage largués par un lanceur puissent atteindre un animal marin lorsqu'ils entrent dans l'océan au cours d'opérations de vol nominales. La probabilité d'un choc a été estimée (...) Les résultats de cette analyse indiquent qu'il y a une chance extrêmement faible qu'un élément de lanceur frappe un animal marin. (...) Moins de 0,5 choc avec un animal sont attendus annuellement, même lorsque toutes les activités de lancement sont additionnées, et qu'une addition est effectuée sur toutes les espèces des océans Atlantique et Pacifique. »⁹⁴

⁹⁴ " Programmatic Environmental Impact Statement for Licensing Launches" - ICF Consulting, Inc./ U.S. Department of Transportation (DOT), 24 mai 2001.

X- La réglementation internationale

1957 : Le vide juridique

Le 4 octobre 1957, l'ingénierie soviétique accouchait dans l'espace d'un bébé de métal et d'électronique pesant 84 kg et prénommé Spoutnik. Le plus beau rejeton de la fierté communiste fut injecté dans l'espace extraterrestre par le 3ème étage d'une fusée Semioroka et sa coiffe d'un poids total de 6,5 tonnes, un étage et une coiffe destinés à être les premiers déchets de l'Homme au-delà de la Terre et de son atmosphère.

1963 : Lancement du Droit spatial

La colonisation de l'espace a largement pris de vitesse le droit international. 6 ans après le lancement de Spoutnik et 2 ans après que Youri Gagarine ait été le premier cosmonaute en orbite autour de la Terre, l'Organisation des Nations Unies a adopté à l'unanimité la « Déclaration des principes juridiques régissant les activités des Etats en matière d'exploration et de l'utilisation de l'espace extra-atmosphérique. » Ce texte recommandatif et non contraignant même s'il est solennel ouvre la voie à une doctrine de l'espace fondée sur la coopération pacifique, la mutualisation des moyens et des bénéfices, la prise en considération de l'humanité toute entière, une vision donc relativement apaisante dans un monde bipolaire où règne le spectre de la guerre nucléaire entre l'URSS et les Etats-Unis qui se trouvent être en même temps les deux seuls acteurs, pour ne pas dire rivaux, de la conquête spatiale. Parmi les principes qui « devraient » servir de guides à cette extension du domaine des activités humaines sont particulièrement remarquables du point de vue d'une Organisation Non Gouvernementale comme Robin des Bois :

- le principe de non appropriation nationale par quelque moyen que ce soit de l'espace atmosphérique et de ses corps célestes.
- le principe de responsabilité au regard de la communauté internationale de chaque Etat intervenant dans l'espace, seul ou en commun avec d'autres.
- le principe de traçabilité ou de pollueur-payeur ; les deux vocables ne sont pas nommément employés mais ils sont bien sous-jacents quand la Déclaration spatiale de l'ONU précise que « Tout Etat qui procède ou fait procéder au lancement d'un objet dans l'espace extra-atmosphérique est responsable du point de vue international des dommages causés à un Etat étranger ou à ses personnes physiques ou morales par le dit objet ou par ses éléments constitutifs, sur terre, dans l'atmosphère ou dans l'espace atmosphérique. »

1967 : Traité régissant les activités des Etats en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes.

Deux ans avant que 2 citoyens américains ne marchent sur la Lune et n'y plantent le drapeau étoilé - un symbole d'appropriation peu conforme à la Déclaration de 1963 - l'ONU ouvre à la signature des Etats Parties le « Traité régissant les activités des Etats en matière d'exploration et d'utilisation de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes ». Ce traité entre en vigueur le 16 octobre 1967. Il consolide et élargit le premier étage du Droit spatial. La paix entre

dans le cosmos : « les Etats Parties au traité s'engagent à ne mettre sur orbite autour de la Terre aucun objet porteur d'armes nucléaires ou de tout autre type d'armes de destructions massives... ». Est aussi introduite une sorte de principe de précaution biologique et sanitaire en faveur des éventuelles formes de vie organiques présents sur la Lune et les autres corps célestes : « les Etats Parties au Traité effectueront l'étude de l'espace extra-atmosphérique, y compris la Lune et les autres corps célestes et procèderont à leur exploitation de manière à éviter les effets préjudiciables de leur contamination » (article IX).

1972 : Clarification des responsabilités

En 1972, la convention sur la responsabilité internationale pour les dommages causés par les objets spatiaux vient préciser et organiser les notions de dommages et les modalités de reconnaissance et de partage de responsabilités enfin d'arbitrage et d'indemnisation.

L'objet spatial potentiellement responsable de dommages désigne la charge utile qu'est le satellite et tous les éléments du lanceur. L'Etat de lancement doit réparer les dommages causés à la surface de la Terre et aux aéronefs, c'est-à-dire aux avions en vol. Dans ces cas de figure, la responsabilité de l'Etat de lancement est absolue.

La convention de 1972 définit l'Etat de lancement comme l'Etat qui lance, l'Etat qui fait procéder au lancement, l'Etat dont les installations servent au lancement et l'Etat depuis lequel est opéré le lancement. Plusieurs pays peuvent être déclarés Etats de lancement et sont donc solidairement responsables en cas de sinistre.

Pour les dommages causés ailleurs que sur la Terre à un objet spatial d'un Etat de lancement par l'objet d'un autre Etat de lancement, la responsabilité de ce dernier n'est engagée que s'il a commis une faute dans la conduite de son objet. Les litiges se règlent par les voies diplomatiques. Si toutefois il est constaté qu'une demande en réparation ne peut pas aboutir par ces moyens, une Commission de règlement de demandes peut-être installée à la demande d'une des parties intéressées. Si aucun accord n'intervient entre les deux parties en vue de la nomination du président de la Commission de règlement des demandes, la Secrétaire Général de l'Organisation des Nations Unies peut à la demande d'une des deux parties procéder à cette nomination.

Cette tentative de clarification n'élimine pas le risque des pavillons de complaisance propre au droit maritime. En effet, la société Sea Launch immatriculée au Îles Caïman et fondée en 1995 a utilisé une plate-forme flottante Ocean Odyssey immatriculée au Libéria, avec un lanceur russe et un actionnariat détenu par Boeing, la société russe RSC-Energia, une compagnie anglo-norvégienne et une compagnie ukrainienne.

1973 : On va exploiter la Lune et les autres corps célestes

Enthousiasmé par « On a marché sur la Lune » dès 1954 puis par les premières empreintes de l'Homme sur la Lune en 1969, l'Organisation des Nations-Unies ouvre à la signature « l'Accord régissant les activités des Etats sur la Lune et les autres corps célestes ». Il reflète la croyance en l'imminence d'une activité humaine débordante et fébrile sur le satellite naturel de la Terre. « Sont interdits sur la Lune

l'aménagement de bases, installations et fortifications militaires, les essais d'armes de tous types et l'exécution de manœuvres militaires ». « Les activités menées par les Etats Parties ne doivent pas gêner les activités menées par d'autres Etats Parties ». « Un Etat qui installe une station n'utilise que la surface nécessaire pour répondre aux besoins de la station... ». « Tous les véhicules, le matériel, les stations, les installations et les équipements spatiaux se trouvant sur la Lune sont accessibles aux autres Etats parties ». « L'installation à la surface ou sous la surface de la Lune de personnel ou de véhicules, installations ou équipements spatiaux y compris d'ouvrages reliés à sa surface ou à son sous-sol ne crée pas de droit de propriété ». « Les Etats Parties au présent Accord s'engagent à établir un régime international, y compris les procédures appropriées régissant l'exploitation des ressources naturelles de la Lune... ». Le dit régime international a notamment pour buts principaux « d'assurer la mise en valeur méthodique et sans danger des ressources naturelles de la Lune, de ménager une répartition équitable entre tous les Etats Parties des avantages qui résulteront de ces ressources, une attention spéciale étant portée aux intérêts et aux besoins des pays en développement ». Cet ensemble de dispositions préventives d'une ruée et d'un pillage inéquitable des ressources naturelles de la Lune s'est avéré pour le moment inutile et naïf. Il s'est inspiré notamment en ce qui concerne l'empêchement d'activités militaires du Traité de l'Antarctique entré en vigueur en 1961. L'Accord sur la Lune et les autres corps célestes ouvre cependant la porte juridique à l'industrialisation et à l'exploitation de l'espace extraterrestre au seul profit de l'humanité. L'article IV de l'Accord dispose précisément que l'exploitation de la Lune tiendra compte « des intérêts de la génération actuelle et des générations futures ainsi que de la nécessité de favoriser le relèvement des niveaux de vie ».

En 1973, la sphère politique internationale avait clairement trouvé la solution à l'épuisement prévisible des ressources terrestres. La croissance était dans la Lune en premier et les planètes voisines de la Terre à la suite.

Certes, les Etats Parties au terme de l'article VII devaient éviter de perturber l'équilibre existant du milieu lunaire par « des transformations nocives » mais de la globalité de l'Accord il ressort que les rédacteurs et les signataires se réjouissaient de coloniser un corps céleste inerte où enfin la protection des populations indigènes et de la biodiversité, de l'eau et des paysages ne serait pas un impératif coûteux et encombrant.

1992 : Prise en compte des sources d'énergie nucléaire dans l'espace

Sur proposition du Comité des utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique (COPUOS), l'Assemblée Générale de l'Organisation des Nations Unis adopte les « principes relatifs à l'utilisation des sources d'énergie nucléaire dans l'espace ». Il n'est pas question d'interdiction mais de restriction « aux missions spatiales qui ne peuvent être raisonnablement effectuées à l'aide de sources d'énergie non nucléaires ». Dans le domaine de la protection des populations à la suite d'accidents dont la probabilité est qualifiée de « faible » la radioexposition ne doit concerner qu'une région géographique limitée. Pour chaque individu, l'exposition doit être limitée à 1 mSv / an (millisievert par an) conformément aux objectifs fixés par la Commission Internationale de Protection Radiologique. « Cependant, il est acceptable d'utiliser une limite de dose subsidiaire de 5 mSv / an pendant quelques années à condition que l'équivalent effectif moyen de dose ne dépasse pas au cours de la vie des individus la limite principale de 1 mSv / an.

A ce jour, le Traité de 1967 a été ratifié par 100 pays dont les principaux acteurs dans le domaine spatial. L'Accord sur la Lune et les autres corps célestes de 1979 qui privilégie l'accès équitable à leurs éventuelles ressources a été seulement ratifié par 13 pays dont un seul pays européen : les Pays-Bas. La France en est à l'étape de la signature. Ni la Chine, ni les Etats-Unis, ni la Fédération de Russie n'ont entrepris de procédures de ratification.

Quelques Etats ont adopté des réglementations de leurs activités spatiales dont la Russie, les Etats-Unis, le Royaume-Uni et la Belgique. La France, Etat de lancement important, a adopté le 3 juin 2008 la Loi relative aux opérations spatiales. Positif : elle inclut dans son titre IV sur les responsabilités toute atteinte à la santé publique et à l'environnement causée par un objet spatial et mentionne dans la phase de maîtrise « les activités de passivation », c'est-à-dire de mise en sécurité des matériaux embarqués susceptibles après la fin de l'exploitation de générer des explosions ou d'en aggraver les effets. L'article VIII dispose que l'autorité administrative ou les agents habilités par elle peuvent à tout moment imposer toute mesure considérée comme nécessaire dans l'intérêt de la sécurité des personnes et des biens et de la sécurité publique et de l'environnement. La CNES a joué un rôle important dans la rédaction de cette loi.

La Convention de Londres sur la prévention des pollutions marines par l'immersion des déchets et d'autres matériaux pourrait dans le cas des rentrées de satellites ou véhicules en provenance de l'espace être concernée quand ces retombées sont localisées dans l'environnement marin, ce qui statistiquement représente près de 80% des probabilités. Cependant, l'interprétation que font à ce jour les Etats parties à la convention de Londres écarte les vecteurs de déchets venus de l'espace. La Convention de Londres prend en compte les immersions de déchets en provenance des avions et n'entend pas élargir sa compétence aux déchets en provenance des engins spatiaux. Le débat n'est peut être pas clos.

XI- Les mesures d'atténuation (« mitigation guidelines »)

L'IADC (Inter Agency Debris Committee) regroupe 11 agences spatiales : ASI (Agenzia Spaziale Italiana), BNSC (British National Space Centre), CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), CNSA (China National Space Administration), DLR (German Aerospace Center), ESA (European Space Agency), ISRO (Indian Space Research Organisation), JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency), NASA (National Aeronautics and Space Administration), NSAU (National Space Agency of Ukraine) et ROSCOSMOS (Russian Federal Space Agency).

L'IADC se définit comme un forum international de structures gouvernementales dont le but est la coordination des activités de lutte contre les débris d'origine humaine ou naturelle.

Il agit comme une force de proposition, une plate-forme d'échange d'informations, un « think tank » pour le Comité de l'ONU pour l'utilisation pacifique de l'espace (COPUOS).

Il a rédigé des lignes directrices et des recommandations pratiques tendant à limiter plusieurs catégories de déchets spatiaux d'origine anthropique :

- les déchets d'exploitation doivent être limités à titre préventif par une meilleure conception de l'ensemble lanceur-satellite et l'évitement de l'éjection spatiale des sangles, couvercles, boulons explosifs et autres accessoires.
- les déchets de fragmentation. Pour réduire les explosions orbitales et la prolifération de déchets de déconstruction, il est recommandé de s'assurer avant la fin d'exploitation de l'engin spatial que les gaz de pressurisation et les ergols soient épuisés ou protégés de telle façon qu'ils ne puissent exploser suite à des collisions.

Les bonnes idées de l'IADC se heurtent à la méfiance des fabricants et exploitants de satellites. Comme dans toute concurrence commerciale, ils se disent prêts à appliquer les recommandations si elles s'imposent à tous et sont réticents à aller isolément de l'avant pour ne pas subir de distorsions de concurrence.

Pire, les ennemis sont aussi à l'intérieur puisque la China National Space Administration (CNSA) membre de l'IADC depuis sa création en 2002 n'a pu empêcher les militaires chinois en 2007 de réaliser un tir antisatellite qui pollue durablement et à un rythme exponentiel l'ensemble des orbites basses.

XII- L'entretien Robin des Bois - ESA

L'Agence Spatiale Européenne (ESA)⁹⁵ a pour mission d'assurer et de développer à des fins exclusivement pacifiques la coopération entre les Etats européens dans les domaines de la recherche et de la technologie spatiales et de leur application en vue de leur utilisation à des fins scientifiques et opérationnelles. Les 18 États membres de l'ESA sont l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la République Tchèque et la Suisse. De plus, le Canada, la Hongrie, la Pologne et la Roumanie participent à certains projets de coopération avec l'ESA.

A la suite d'une sollicitation de Robin des Bois, une entrevue a eu lieu le 14 janvier 2011 dans les locaux de l'ESA à Paris entre trois des membres de l'ONG et sept membres de l'ESA dont trois étaient physiquement présents et quatre par vidéoconférence depuis le centre de lancement de Kourou en Guyane - dont le directeur du programme ATV2 - et depuis le siège de l'European Space Research and Technology Centre (ESTEC) à Noordwijk aux Pays-Bas.

L'ESA est pionnière dans les missions d'observation de la Terre notamment avec les programmes CryoSat - étude des banquises polaires -, SMOS - Soil Moisture and Ocean Salinity dédié à l'étude de l'humidité des sols et de la salinité des océans - et

⁹⁵ <http://www.esa.int/esaCP/index.html>

GOCE - Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer sur les champs gravitationnels.

Pour l'ESA, la multiplication des déchets dans les orbites terrestres est un problème crucial qui met en danger la sécurité des missions spatiales. L'ESA exprime sa satisfaction qu'une ONG environnementale s'intéresse à cet enjeu.

L'ESA a été le principal artisan du « Code de conduite européen pour l'atténuation des débris spatiaux » établi en 2004 et signé par l'agence spatiale italienne (ASI), le centre spatial anglais (BNSC), le centre spatial allemand (DLR), le CNES et l'ESA. Ce Code de conduite précise et améliore les mesures d'atténuation de l'IADC (cf. chapitre précédent). Il définit les modalités de conception et de maîtrise des engins spatiaux qui sont susceptibles de réduire la production de déchets. Un responsable des déchets spatiaux doit être désigné pour chaque projet. Il doit veiller à réduire au maximum les dommages pour l'environnement au moment de la rentrée sur Terre.

A titre d'exemples, les carburants ne doivent pas libérer dans l'espace des particules supérieures à 10 microns ; la conception des engins, leurs matériaux et accessoires ne doivent pas générer des déchets supérieurs à 10 microns pendant la phase de mise en orbite ; la rentrée sur Terre d'un engin spatial ne doit pas produire d'effets dommageables pour l'environnement terrestre notamment dans le domaine radiologique, biologique et chimique. Le respect de ce Code de conduite est obligatoire depuis le 1^{er} avril 2008 et le programme des ATV bien que lancé avant son entrée en vigueur applique ses préconisations. Si le projet ne peut pas se conformer aux objectifs du Code de conduite, cette non-conformité doit être justifiée et enregistrée.

L'USSTRATCOM confirme dans son catalogue confidentiel que l'ATV *Jules Verne* n'a abandonné aucun déchet supérieur à 5 cm sur son orbite. Les organes vitaux de l'ATV sont protégés par un bouclier vis-à-vis des météorites et des déchets. Le *Jules Verne* a effectué plusieurs manœuvres d'évitement. Tous les déchets produits par l'ATV doivent être désorbités et rentrés dans l'atmosphère terrestre dans un délai d'un an. Il est confirmé que les ATV ne transportent pas de sources radioactives. Les risques que l'ATV cause un accident au sol lors de sa rentrée sont largement inférieurs à 10^{-4} , c'est-à-dire 1 pour 10.000. Préalablement au contact des ATV avec la Terre et plus précisément avec l'océan Pacifique sud, une alerte aux autorités chiliennes et néo-zélandaises est lancée - il faut espérer qu'aucun navire de pêche illégale ne sera sur zone lorsque le *Johannes Kepler* percutera l'océan -.

Sans pouvoir nous communiquer le manifeste des déchets transportés par l'ATV depuis l'ISS vers la Terre, l'ESA nous a cité les exemples suivants : déchets sanitaires, déchets électriques, emballages souples, matériel médical, filtres à poussières, aliments périmés, appareils de mesures usagés et batteries. Il est prévu que moins de la moitié de la masse totale de l'ATV rentre en contact avec l'océan - soit environ 8 t pour le *Johannes Kepler* - et que tous les déchets coulent.

L'ESA travaille à la conception d'un cargo spatial pouvant effectuer une rentrée atmosphérique complètement contrôlée et un retour sur Terre en douceur à l'aide de parachutes permettant de récupérer des appareillages scientifiques de valeur et les déchets. A moyen terme, l'ambition de l'ESA est de mettre au point et en œuvre des vaisseaux capables de capturer les déchets spatiaux.

Conclusion

L'espace est animé par des enjeux militaires, scientifiques et commerciaux. C'est une succursale de la Terre. Les déchets y posent des problèmes multiples. La sécurité des activités spatiales est compromise par la prolifération et la connaissance fragmentaire du nombre et de la trajectoire des déchets existants. Les initiatives se multiplient chacune de leur côté pour en dresser la cartographie et l'inventaire sans mutualisation des informations.

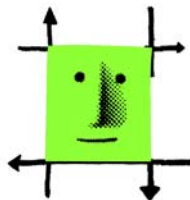
La réduction à la source des déchets dans l'espace est possible si l'ensemble des Etats de lancement et des exploitants de satellites prennent conscience de la gravité du problème et des risques associés. La responsabilisation de tous les acteurs y compris commerciaux doit être accélérée par une pression accrue de la société civile, des Etats de lancement et par la concertation internationale.

Le droit de l'espace se doit d'être coopératif, évolutif et contraignant. Les règles élémentaires de prudence doivent être respectées. Il est notable qu'aucune protestation diplomatique officielle n'ait été émise après le tir anti-satellite réalisé par la Chine en janvier 2007. Il est urgent que les Etats-Unis, la Russie, la Chine, le Japon et les autres principaux Etats de lancement ratifient l'Accord sur la Lune et les autres corps célestes. L'objectif suivant serait une convention internationale sur la prévention et la gestion des déchets dans les orbites terrestres et le système interplanétaire.

Le financement des recherches sur les modalités de capture ou de neutralisation in situ des plus gros déchets susceptibles de se fragmenter en des millions de micro-déchets projectiles pourrait être en partie assuré par un fonds alimenté par tous les usagers de l'espace, en premier lieu les exploitants de satellites commerciaux.

Pour ce qui concerne l'environnement de la Terre, les retours de satellites doivent faire l'objet d'une planification et d'une localisation précises et respectueuses de l'environnement marin et des populations exposées. Les impacts de l'incinération des parties combustibles des engins spatiaux lors de leurs rentrées dans l'atmosphère doivent être mieux connus sans être systématiquement balayés par la mise en avant de la dilution des polluants au dessus de l'humanité.

Rédaction : Jean-Pierre Edin et Jacky Bonnemains
Documentation et iconographie : Jean-Pierre Edin, Jacky Bonnemains,
Charlotte Nithart, Christine Bossard et Miriam Potter
Secrétariat de rédaction, illustration et architecture :
Charlotte Nithart et Elodie Crepeau
Cartographie : Christine Bossard
Fond de carte Terre : Daniel Dalet
Responsable de la publication : Jacky Bonnemains
Robin des Bois juin 2011



ROBIN DES BOIS

Robin des Bois
Association de protection de l'Homme et de l'environnement
Depuis 1985
14, rue de l'Atlas 75019 Paris - France
Tel : + 33 (0) 1 48 04 09 36
Fax : + 33 (0) 1 48 04 56 41
contact@robindesbois.org
www.robindesbois.org