



## A GRAVES Sourcebook

### Version of 2013-08-07

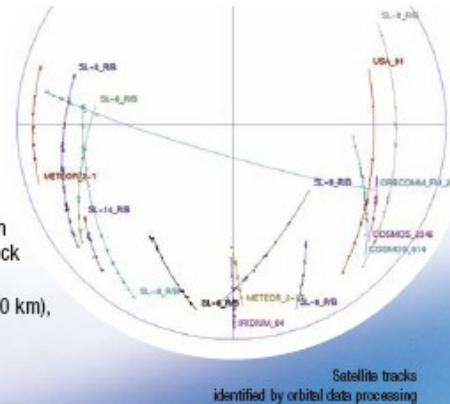
## Graves, a space surveillance system

### Independent capability for France

Designed and built by ONERA as prime contractor, the Graves space surveillance system officially started operation on December 15, 2005. The French air force is now operating the radar and processing system 24 hours a day to detect satellites flying over French territory, determine their trajectory, and create a catalog. Graves is the first space surveillance system in Europe.

In 2005, ONERA also carried out a detailed study for a complete space debris surveillance system, allowing Europe to catalog the following:

- Objects less than 10 cm in low orbit (up to 2,000 km), using a radar system based on Graves. A high-gain transmitting antenna prototype was built to check the feasibility of high-power transmissions.
- Objects exceeding 1 meter in various orbits, including geostationary (36,000 km), using a distributed optical surveillance and tracking system, installed at four sites around the world.



Satellite tracks  
identified by orbital data processing



22

Please send suggestions for additional material to include in this sourcebook to Allen Thomson at [thomson.a@flash.net](mailto:thomson.a@flash.net)

[previ.obspm.fr/articles/Meeting150109/DSE\\_meteo.ppt](http://previ.obspm.fr/articles/Meeting150109/DSE_meteo.ppt)



*site d'émission*



*site de réception*

[http://www.klekoon.com/boamp/BOAMP\\_3\\_Detail.asp?ID\\_appel=937590](http://www.klekoon.com/boamp/BOAMP_3_Detail.asp?ID_appel=937590)

## Détails d'un appel d'offre

Département : 84 (Vaucluse) | Date de parution : 18/06/2008 | Date de péremption : 08/07/2008 16:00:00

Annee : 2008 | Edition (N°. BOAMP) : 117A | N° annonce (BOAMP) : 203

saint-christol (84) - commune de revest du bion. sécurisation du site de réception du radar graves.

### Nom et adresse officiels de l'organisme acheteur :

MINDEF/SGA/DCSID/Et Génie Montpellier.

Correspondant : M. Du Bureau Administration Finances le Chef, B.P. 6066, 34086 Montpellier Cedex 4, tél. : 04-67-16-59-72, télécopieur : 04-67-16-59-62, courriel : baf.eg-montpellier@wanadoo.fr.

Le pouvoir adjudicateur n'agit pas pour le compte d'autres pouvoirs adjudicateurs.

### Principale(s) activité(s) du pouvoir adjudicateur :

Défense.

### Objet du marché :

saint-christol (84) - commune de revest du bion. Sécurisation du site de réception du radar GRAVES.

### Type de marché de travaux :

exécution.

### C.P.V. -

Objet principal : 33253100

Objets supplémentaires : 45343200, 32323500.

### Lieu d'exécution :

saint-christol (84) - commune de revest du bion, 84000 Saint-Christol.

### Code NUTS :

FR826.

L'avis implique un marché public.

### Caractéristiques principales :

l'opération conserne la sécurisation et la protection du site de réception du radar GRAVES sur la commune de Revest du Bion (04) près de SAINT-CHRISTOL (84) au profit de la B.A. 115 d'Orange. Le présent marché a pour objectif l'installation d'une détection intrusion et incendie associées à de la vidéosurveillance, le tout supervisé depuis la B.A. 115 d'Orange.

Les travaux donnent lieu à un marché unique , sans tranche et comportant 3 corps d'états :

- corps d'état n° 01 : détection intrusion (Di) ;
- corps d'état n° 02 : extinction incendie (Ei) ;
- corps d'état n° 03 : vidéosurveillance (Vs)

**Des variantes seront-elles prises en compte :**  
oui.

**La procédure d'achat du présent avis est couverte par l'accord sur les marchés publics de l'OMC :**  
oui.

**Prestations divisées en lots :**  
non.

**Date prévisionnelle de commencement des travaux :**  
2 janvier 2009.

**Modalités essentielles de financement et de paiement et/ou références aux textes qui les réglementent :**

financement : budget de la défense,  
crédits infrastructure de l'état-major de l'armée de l'air,  
prix global et forfaitaire,  
mode de règlement : virement,  
les prix sont fermes actualisables,  
délai de paiement de l'acompte et du solde : 30 jours,  
droit à l'avance.

**Forme juridique que devra revêtir le groupement d'opérateurs économiques attributaire du marché :**

les candidats pourront soumissionner pour l'ensemble du marché sous la forme juridique de leur choix. Chaque candidat ne pourra se présenter en agissant à la fois en qualité de candidat individuel et de membre d'un ou plusieurs groupements.  
Néanmoins, en cas de groupement conjoint, le mandataire devra être solidaire de ses co-traitants pour ses obligations contractuelles à l'égard du pouvoir adjudicateur en ce qui concerne l'exécution du marché.

**Langues pouvant être utilisées dans l'offre ou la candidature :**  
français.

**Unité monétaire utilisée,**  
l'euro.

**Conditions de participation :**

**Critères de sélection des candidatures :**  
l'examen des candidatures s'effectuera conformément à l'article 52 du code des marchés publics.  
En cas de groupement, l'appréciation des capacités professionnelles, techniques et financières des membres est globale.

**Situation juridique - références requises :**  
lettre de candidature ou imprimé DC 4 (intégralement renseigné),  
attestations sur l'honneur et renseignements conformes aux articles 44 et 45 du CMP ou imprimé DC

5 (intégralement renseigné),  
copie du jugement prononcé si le candidat est en redressement judiciaire,  
attestations d'assurance.

**Référence professionnelle et capacité technique - références requises :**  
description des moyens humains et techniques que le candidat dispose pour effectuer les prestations du marché.

**Attestations professionnelles :**

liste de références détaillées des travaux se rapportant à l'objet du marché au cours des trois dernières années Et/Ou attestations de maître d'oeuvre.

**Critères d'attribution :**

Offre économiquement la plus avantageuse appréciée en fonction des critères énoncés ci-dessous avec leur pondération :

- prix : 70 % ;
- valeur technique : 20 % ;
- coût d'entretien : 10 %.

**Type de procédure :**

marché négocié.

**Date limite de réception des candidatures :**

8 juillet 2008, à 16 heures.

**Date prévue pour l'envoi aux candidats sélectionnés de l'invitation à présenter une offre ou à participer au dialogue :**

22 juillet 2008.

Numéro de référence attribué au marché par le pouvoir adjudicateur/l'entité adjudicatrice :  
Projet 08012.

**Renseignements complémentaires :**

les plis des candidatures qui seraient remis ou dont l'avis de réception serait délivré après la date limite des plis ainsi que ceux remis sous enveloppe non cachetée, ne seront pas retenus et seront renvoyés à leurs auteurs.

Les candidats pourront transmettre leur candidature :

- par voie électronique sur le portail du ministère de la défense "[www.achats.defense.gouv.fr](http://www.achats.defense.gouv.fr)",
- ou à la section marchés du service consultant sous pli cacheté, soit par la poste en recommandé avec avis de réception postal, soit par dépôt à la section marchés du service consultant contre remise d'un récépissé.

la durée prévisionnelle d'exécution des travaux est de 4 mois, dont 1 mois de période de préparation incluse.

**Date d'envoi du présent avis à la publication :**

13 juin 2008.

**Adresse à laquelle les offres/candidatures/projets/demandes de participation doivent être envoyés :**

Etablissement du Génie de Montpellier Section marchés B.P. 6066.

Correspondant : M. Du Bureau Administration Finances le Chef B.P. 6066, 34086 Montpellier Cedex 4, tél. : 04-67-16-59-74, télécopieur : 04-67-16-59-62, courriel : baf.eg-montpellier@wanadoo.fr.

This is the html version of the file

[http://www.btpdefense.dcg.terre.defense.gouv.fr/webgenie/rsce\\_app/Wg\\_mppa/pj/20080813\\_165234\\_160.pdf](http://www.btpdefense.dcg.terre.defense.gouv.fr/webgenie/rsce_app/Wg_mppa/pj/20080813_165234_160.pdf)  
Google automatically generates html versions of documents as we crawl the web.

**MARCHE PUBLIC DE TRAVAUX**  
**AVIS D'APPEL PUBLIC A LA CONCURRENCE**

### Objet de la consultation :

**ST CHRISTOL (84) – Commune de Revest du Bion (04)**  
**Site de réception du radar GRAVES – Création de réseaux courants faibles**

Type de travaux : Voiries Réseaux Divers / Electricité

Projet n° : 58/124

**Maître d'ouvrage :** Etablissement du génie de Montpellier  
BP 6066 - 34086 MONTPELLIER cedex 4

Procédure de passation : Marché Passé en Procédure Adaptée (art. 28 C.M.P.)

Date de parution du présent appel d'offre : 14 août 2008

Date de remise des offres : **23 septembre 2008 avant 16 heures**

Le dossier peut être retiré :

- soit à l'établissement du génie de Montpellier - section maîtrise d'œuvre n°1, au 125 avenue de Lodève à Montpellier ;
  - soit en adressant une télécopie mentionnant clairement l'objet de la consultation et l'adresse postale du demandeur.

Renseignements techniques et administratifs : Tél : 04.67.16.59.41 ou 04.67.16.59.49  
Fax : 04.67.16.59.31

## EU Aims For Space Situational Awareness Network

By Amy Svitak

August 05, 2013

The European Union is keen to set up its own network of space surveillance assets that could track spy satellites and near-Earth objects, help satellite operators avoid orbital-debris collisions and protect critical infrastructure when spent spacecraft or other objects enter Earth's atmosphere.

*[deletia]*

Under a July proposal to the European Parliament, Council and other EU bodies, the EC would help EU nations fund development of a space surveillance and tracking (SST) network capable of scanning the skies over Europe to identify spy satellites or avert collisions with orbital debris.

Options outlined in the proposal could cost €10-120 million a year to establish and operate such a network based on existing French and German radars with the aim of protecting the EC's current and future space infrastructure, notably the Galileo satellite navigation constellation and Copernicus Earth-observation system.

The funding could help Paris and Berlin as they upgrade existing ground-based SST networks, though neither has waited for European support. The two have collaborated bilaterally since 2006 to effect the only operational SST system in Europe using the French Graves bistatic radar, a handful of French air force and navy fixed and mobile tracking antennas, and Germany's TIRA, a tracking and imaging radar more powerful and precise than Graves but which can follow only one object in space at a time.

Graves was developed as a demonstrator by the French aerospace laboratory Onera in the 1990s, and entered operations when it was purchased by the French air force in 2005. A bistatic radar, Graves's emitters are located in Broyes le Pesmes in eastern France, while the receiver is situated on the Plateau d'Albion in southern France.

Lt. Col. Bernard Muller, head of the Space Surveillance Div. within the French air force's Air Defense and Operations Command (CDAOA), says Graves is able to detect objects orbiting the Earth with an inclination of 45-135 deg., representing 95% of all objects measuring 1 sq. meter (11 sq. ft.) or larger in low Earth orbit up to 1,000 km (620 mi.) altitude, including eavesdropping and observation satellites.

Although the U.S. Air Force shares data with allies from what is arguably the world's most sophisticated ground- and space-based surveillance network, Graves and TIRA give France and Germany the capability to maintain their own catalog of orbiting objects

"Graves is able to identify something of interest and TIRA then tells us what it might be," Muller says.

Part of the French air force's Systeme de Commandement et de Conduite des Operations Aeriennesair (SCCOA)—which combines all the service's information and communications systems under a single procurement program—Graves is slated for a mid-life upgrade in 2015 that Muller says will improve its capacity for conducting broad sweeps of the skies over Europe.

*[deletia]*

Muller says by fall 2014 the air force plans to co-locate control of all its space surveillance assets with the French air operations center (CNOR) in Lyon, France, where his staff of 20 disparate operators will grow to 30 at the consolidated space tracking center, dubbed Cosmos (Centre Operationnel de Surveillance Militaire des

**Objets Spatiaux).** Ultimately, Muller says, France seeks to develop a Space Information System (SIS) that will provide an overall picture of the aerospace environment.

“We are now working on the definition and realization of SIS, which will be included in the SCCOA procurement system,” he says. Graves, air force Satam and naval radar, Fedome and Oscegeane will be combined under SIS, which he says will automate what is today a largely manual operation.

In the meantime, the German Space Situational Awareness Center (GSSAC) in Uedem, Germany, is working to formalize its relationship with the German Fraunhofer research institute, which owns and operates the TIRA radar.

Since its inception in 2009, the GSSAC has grown from a handful of military personnel to a civil-military operation staffed by more than 20. Col. Olaf Holzhauer, former GSSAC director who is now the senior officer for space situational awareness at the German Air Operations Command's new operations center, says the GSSAC is in an initial operational phase, with the goal of becoming fully operational by 2020. In the near term, he says the center aims to formalize its relationship with Fraunhofer to support continued cooperation with France, the U.S. and other nations.

“We are thinking to develop this cooperation into a service agreement between both entities, so that Fraunhofer would provide to us analysis of TIRA data on the space situation and we would give our assessment based on this information to our partners,” Holzhauer says.

Eventually, the Franco-German space surveillance collaboration would be expanded to form the nucleus of a European space situational awareness network, including space weather, near-Earth-object detection and the SST system proposed by the EC.

The European Space Agency (ESA) took a first stab at such an effort in recent years and was able to establish programs focused on space weather and near-Earth-object detection. But ESA failed to build consensus among its 20 member states to fund a dual-use SST network based on Graves, TIRA and other national assets used for both civil and military operations.

“You have to think about how this would be organized and who provides what products to whom, and then you get into the very sensitive questions of data policy and governance,” Holzhauer says. “But the idea is to be a starting point for a coordinated space situational awareness activity on the European level.”

## France Eyes Milspace Push

Jun 24, 2008

By Michael A. Taverna/Aerospace Daily & Defense Report

PARIS - France plans to greatly expand its military space capabilities in its first major strategic shift since the end of the Cold War.

The move is part of a major reinforcement of reconnaissance/intelligence, ballistic missile protection, force projection and ground force capabilities planned over the next 15 years to allow the country to combat terrorism and other evolving global threats.

The move, outlined in a white paper presented last week by President Nicolas Sarkozy, is to be paid for by stretching out conventional big-ticket weapons programs like the Rafale fighter, Tiger attack helicopter and FREMM multimission frigate, shuttering unneeded bases and equipment and eliminating 54,000 defense jobs.

Sarkozy said annual space spending would more than double, to nearly 800 million euros (\$1.24 billion) per year, as recommended by military space leaders, with an eye to bringing most of the new systems into operation by 2015. The bulk of the undertakings would be conducted in cooperation with European partners.

Much of the new space hardware will have to wait until the white paper recommendations are transformed into a new five-year spending plan for 2009-13, to be decided in the autumn. Although Sarkozy's comfortable parliamentary majority would normally be expected to assure passage, strong resistance is likely from lawmakers worried about base closures and stonewalling within the conservative military establishment itself. Late last week, a group of high-ranking officers published an anonymous article in *Le Figaro* roundly condemning the plan.

However, some programs can be started beforehand using funding already available. Sarkozy said work is likely to get under way this year on a new high-resolution optical satellite design that will replace the existing Helios satellites. Planners hope a quick green light will help jump-start Musis, an ambitious optical/radar image intelligence constellation planned with Germany, Italy, Belgium, Spain and Greece. Year-end approval of a French payload for Italy's new Sicral 2 secure communications satellite and a development go-ahead for the Franco-Italian Athena-Fidus dual-use broadband spacecraft is also likely.

The main focus of the space effort will be to turn experimental satellite systems into new operational capabilities currently lacking in the European arsenal. The first, Ceres, will create a sight constellation drawing on experience from Elint, a small satellite cluster to be launched in 2010. Several European partners, notably Germany and Italy, are said to be showing an interest in this system. The second endeavor will be to establish an early warning satellite system to protect against intermediate ballistic missiles, using feedback from Spirale, to be orbited this year. Because of the technical challenge involved, this objective will be realized in two steps, beginning with a precursor that would nominally be ready by 2015 and ending with a fully operational system by 2020. The satellites would operate in conjunction with a long-range land-based radar that will be derived from yet another demonstrator now in development.

France will also lend strong support to a European Space Agency plan to develop a space situational awareness (SSA) system. This system, which would be built around France's Graves ground radar, already in operation, and other existing units in the U.K., Germany, Italy and ESA itself, is to be proposed at the agency's ministerial summit in November. Sarkozy said SSA will also be one of the top objectives when France takes over the European Union's rotating presidency in July.

[http://www.redorbit.com/news/business/1269849/france\\_develops\\_advanced\\_space\\_surveillance\\_technology/](http://www.redorbit.com/news/business/1269849/france_develops_advanced_space_surveillance_technology/)

## France Develops Advanced Space Surveillance Technology

Posted on: Tuesday, 26 February 2008, 09:01 CST

Originally published by Liberation website, Paris, in French 19 Feb 08.

[<http://www.libération.fr/transversales/futur/reportage/310816.FR.php>]

Source: BBC Monitoring European

[Report by Sylvestre Huet: "The Satellites' Spy"]

A screen several meters in width is showing France; a simple silhouette on a black background covered with small coloured lines representing airplanes that are being tracked by radar. Alongside of this is a list of places that can be contacted [simply] by picking up a telephone: the Elysee, Matignon, the Ministry of Defence.... There is nothing unusual up to this point because we are inside the Air Defence and Operations Command [CDAOA] site located a few steps from the Balard metro station in Paris. Then, a hair-raising change of perspective appeared. At the request of General Desclaux, who is second in command for air defence, the Earth's globe appears in the middle of the screen. It is a strange globe. We can make out the outlines of countries on it but also, and in particular, rectangles and circles that are either blue or green flickering in a flurry of rectilinear trajectories.

### Very Restricted Club

The areas that they define, sometimes extending hundreds of kilometres, are those where satellites (represented by acronyms and numbers) can see, transmit or listen. At this moment, USA-116 is passing over Afghanistan; Helios, a French spy satellite is over New Caledonia ("online" explains Desclaux). Then he ordered the operator to speed up the pace of the simulation and to zoom in on Afghanistan in order to reveal the satellite situation as it will be a few days later. The country changes colour from green to red to indicate the time or the GPS precision, the American global positioning satellite system used by the military deteriorates over the Afghan mountains.

This spectacular presentation means that France has joined a restricted club of countries capable of maintaining space surveillance, which until now had been reserved for the United States and Russia. France - with a radar system a receiver and a good dose of mathematics - knows everything. Not a single satellite or large piece of space debris travelling over France between 400 and 1,000 kilometres escapes the GRAVES [Great Network Adapted for Space Surveillance] system any longer. Its first results: a catalogue of "approximately 2,000 objects, essentially debris and one third active satellites," explains General Patrick de Rousiers, the CDAOA commander. This has already made it possible to point out to our American "friends" that some of their own spy satellites, but which are not included in their own public catalogue, pass over France. This was not going to be shouted from rooftops but that, in exchange, it would be friendly to ask for Paris's advice before revealing the trajectory of French military satellites on its catalogue. This revealing anecdote shows that GRAVES offers the beginnings of autonomy to France and Europe, which depended on the United States for this kind of information. Where does this come from? It comes from an idea that engineers had when facing the delicate question of how to monitor space without it costing an arm and a leg. If the Russians and Americans have circum-terrestrial space surveillance, it is because this is a legacy of the cold war and of the dread of having missiles arriving willy-nilly. This is the reason for the batteries of radars and

telescopes that were set up, even in the icy emptiness of Greenland (in Thule), to monitor their arrival. This is huge and expensive but this is how NORAD (North American Aerospace Defence Command) detects and calculates the trajectories of objects up to geostationary orbit at 3,600 kilometres (a 10-centimeter object can be followed at 400 kilometres). Rational minds underscore that, for the time being, there is no flying saucer on the screens.

Could something be done that did not [look] ridiculous but which was a lot less expensive? "Yes," replied Thierry Michal, who is an engineer with ONERA, the National Office for Aeronautical Studies and Research. The father of GRAVES says, "ONERA has been taking part in precision orbitography studies since 1991. However, we cannot get very far if we cannot follow the satellites' characteristics. You lose one for a few days and after that you are no longer able to identify it with certainty."

### Virtual Radar

A small team of engineers picked up the challenge and replaced money with astuteness. The idea was to use a single stationary radar system, a single receiver, but a huge computer. The radar installation located on a former airbase near Dijon emits into the air above; the receiver located on the site of a former nuclear missile silo on the Albion Plateau (Vaucluse) receives the [radar] echoes. What is the trick? The echoes being received are processed to build a virtual radar system that, for its part, emits in 1,000 different directions. How is it done? It is with an online 60-gigaflop computer (billions of operations per second), which at the end of the 1990s represented a respectable super computer. All of this cost "30 million euros," announces Michal proud of the frugality of the exercise.

The armed forces, once convinced by the demonstration, funded the implementation of this instrument. The GRAVES catalogue has proved to be very useful for knowing where the satellites - its own and those of others - are and where they will be and to determine the moment when a far-off mission will be best covered by communications satellites. Satellite operators and space agencies are among the civilian users that are avid for data on all bodies in space: active ones (satellites under control) as well as the thousands of pieces of debris (lost satellites, pieces of rockets, debris).

### Debris

In spite of the commitments of space agencies and satellite makers and operators, there is an increase in the number of pieces of debris in orbit: 10,000 measuring more than 10 centimeters in orbits between 400 and 1,000 kilometres. The worst [debris situation] is located at 800 kilometres: an orbit that is valued for earth observation and where the lifetime of a piece of debris is approximately one century. The CNES carries out a dozen avoidance manoeuvres on the satellites that it controls. Jean-Jacques Dordain, the general director of the European Space Agency [ESA] notes the risk taken "when Russian debris brushed Envisat, our main environment surveillance satellite."

GRAVES works. Should Europe go further and acquire a space surveillance system? Pulling itself up to the American level with an antiballistic defence system seems out of the question and beyond [its] resources. Isn't it within Europe's means to have a more modest system that is capable of ensuring that the treaties banning the military use of circum-terrestrial space are respected and which deals with the growing dangers of debris? Jean-Jacques Dordain, ESA's general director, is going to propose "proceeding in stages. First, placing French, British, and German resources in a network and

coordinating them through a single structure and then building a radar system in southern Europe, in Spain or Italy. There is also a need to consider [having] a satellite to monitor solar storms so as to be warned of these storms and better operate satellites." If we are to believe the statements made by Nicolas Sarkozy on 11 February 2008 in French Guyana, this issue should move forward during the French presidency of the European Union in the second half of 2008 and perhaps lead to decisions being taken during the ESA's ministerial council meeting in November.

## Coup de maître de la DGSE contre les satellites américains

Jean-Paul Ney

30/07/2007 1:14 am

Branle-bas de combat au Pentagone et à la Maison Blanche. Il y a de quoi : Depuis le 8 juin dernier les espions français ont découvert le moyen de recouvrer les positions des satellites espions américains. Un coup de maître longtemps réfléchi par nos militaires, en effet, depuis le début de l'année 2007, un programme secret de la DGSE permet à l'aide d'un système performant, de découvrir avec précision – et de les suivre – la majorité des satellites militaires américains. La DRM (direction du renseignement militaire) et la DGSE travaillent de concert avec l'armée de l'air sur le système GRAVES, un système radar français de surveillance de l'espace mis à la disposition de l'armée de l'air depuis décembre 2006 mais dont l'exploitation opérationnelle remonte à quelques mois seulement.

C'est depuis notre territoire national qu'opère le nouveau système de radar inventé par les ingénieurs de l'Office national d'études et recherches aérospatiales (Onera). Il est installé sur deux points du territoire, l'un dans l'est de la France, l'autre sur le Plateau d'Albion. Le jeu d'échec du renseignement spatial prend une toute autre tournure depuis que la petite équipe a détecté une trentaine de satellites de l'armée américaine gravitant sur orbite dite « basse » autour de la terre ne figurant pas dans le catalogue officiel du Pentagone.

« C'est une victoire majeure pour la France, cette découverte va permettre aux généraux français de mettre la pression sur leurs homologues américains afin d'obtenir de leur part qu'ils cessent de publier la position de nos propres satellites. » confirme un spécialiste du dossier qui tient à son anonymat.

Cet inventaire du Pentagone est un index régulièrement actualisé, un outil de travail à tous ceux qui s'intéressent au domaine l'espace à travers le monde mais qui n'inclut pas les satellites dits à usage sensible...de l'armée américaine ! Mais qui indique clairement la position des satellites sensibles français exploités par l'armée française pour le compte de la DRM ou la DGSE. Du coup, cette fois-ci, la France lançait en juin dernier un signal d'avertissement au Pentagone via le Colonel Yves Blin, l'un des chefs du bureau Espace à l'État-major français des Armées « nous avons discuté avec nos homologues américains des premiers résultats positifs de GRAVES et nous avons souligné les contradictions entre ce que nous avons trouvé et ce que contient l'index du département de la défense concernant les satellites».

Les Américains sont prévenus, les militaires français font état d'une menace à peine voilée « nous ne communiquerons pas les positions de vos satellites si vous arrêtez de publier les coordonnées des nôtres ». Depuis ce coup de poker totalement maîtrisé, la France mène des négociations solides face aux américains, et le système GRAVES continue de détecter des satellites espions américains à plus de 1000 Km d'altitude. Une source à la DGSE qui est l'instigateur d'un article dans un magazine américain nous confirme que l'avancée des négociations n'est pas vaine « maintenant, nous sommes au même point de force, la balle est au milieu, soit ils négocient, soit nous publierons les résultats, nous sommes prêts à le faire, et ce, très rapidement ».

## **Surveiller l'espace, un impératif de souveraineté**

9 000 objets d'une taille supérieure à 10 centimètres, dont près de 800 satellites actifs, orbitent autour de la Terre. Beaucoup d'entre eux survolent la France quotidiennement, parmi lesquels certains constituent une menace pour la confidentialité et la sécurité d'informations stratégiques militaires et civiles. Tout au long de leur orbite les satellites sont soumis à des risques de collisions. Pour faire face à ces menaces, la France s'est dotée du système de veille spatiale GRAVES.

GRAVES est l'unique système de veille des orbites basses en Europe. Il est opéré par le Commandement de la Défense Aérienne et des Opérations Aériennes (CDAOA).

### **Le système GRAVES démontre son efficacité**

Développé par l'ONERA sous contrat de la délégation générale pour l'armement (DGA), le système GRAVES est constitué d'un radar spécifique associé à un système de traitement qui assure en toute autonomie la création et le maintien à jour d'une base de données des paramètres orbitaux des satellites. Le système GRAVES est capable de détecter des objets d'une taille au moins égale à celle d'un microsatellite (équivalent à une surface d'au moins un mètre carré), évoluant à une latitude supérieure à 35° et à une altitude comprise entre 400 et 1000 km et d'en fournir l'orbite. Une fois qu'un objet est catalogué, le système indique où il se trouvera dans les jours qui suivent. Depuis sa mise en service, GRAVES a répertorié et suit plus de 2 200 objets. Parmi eux se trouvent plusieurs dizaines de satellites, jugés sensibles, qui passent au-dessus de la France, pour lesquels aucune information n'existe.

GRAVES permet de détecter des événements tels que :

- La présence d'un satellite
- L'arrivée d'un nouveau satellite
- Une manoeuvre de satellite
- La disparition d'un satellite

La détection de ces événements élémentaires associée à la base de données orbitographiques permet aux opérateurs d'analyser des événements plus complexes :

- Exemple d'événement élémentaire: anticipation du survol d'une zone, prévision de rentrée atmosphérique, manoeuvre.
- Exemple d'événement complexe : une explosion de satellite se traduira par la détection de sa disparition, la naissance de nouveaux débris issus de ce satellite, dont les trajectoires cohérentes permettent de déterminer l'origine.

La caractérisation des événements part de l'analyse de la base de données des objets et de leurs trajectoires fournie par le système GRAVES. A lui seul, GRAVES ne permet pas d'identifier un satellite, c'est-à-dire de préciser son origine et sa mission. Des études sont en cours afin de se doter de moyens complémentaires pour améliorer cette identification, fonction pour laquelle la connaissance de la position des satellites reste de toute façon un préalable indispensable.

## **Un démonstrateur devenu un système opérationnel**

Le projet a démarré en 1992 avec la notification par la DGA d'une étude de définition du système. L'objectif était alors de développer une maquette probatoire, la réalisation du système définitif devant être confiée à l'industrie. En 1997, après le choix des sites d'émission et de réception puis de l'obtention des autorisations, la réalisation de la maquette a pu démarrer, avec deux panneaux d'émission.

En 1998, l'ONERA, dans un souci d'économie a démontré qu'avec seulement quatre panneaux d'émission, le système GRAVES serait en mesure de remplir son cahier des charges. Par ailleurs, le Centre d'Expertises Aériennes Militaires (CEAM) a étudié le démonstrateur, qu'il a déclaré apte pour un service opérationnel.

Après une période de consolidation du dossier, la DGA a notifié le contrat pour l'extension à quatre panneaux en mars 2002. Les campagnes de test du système complet ont eu lieu en décembre 2004, puis durant l'été 2005. GRAVES a été livré à son utilisateur final, l'armée de l'air, en décembre 2005.

Depuis, GRAVES fonctionne 24 heures sur 24 pour un coût de maintenance minimum et un excellent taux de disponibilité. « Au final, GRAVES a été livré dans le respect du cahier des charges, du délai et du budget prévu. Outre sa capacité à innover pour répondre aux besoins exprimés, l'ONERA a fait preuve d'une capacité d'écoute et d'une souplesse remarquables. Au fur et à mesure que le projet avançait, la DGA et nous-mêmes pouvions émettre des remarques. Elles étaient systématiquement prises en compte et transformées en actions », affirme le chef de la division « surveillance de l'Espace » du commandement de la défense aérienne et des opérations aériennes (CDAOA).

## **Un concept innovant et efficace**

L'objectif prioritaire était de répondre à la mission de surveillance de l'Espace - avec un système à bas coût, tant en termes de développement que de maintenance. Pour obtenir une efficacité maximale, deux contraintes supplémentaires ont été retenues : d'une part, un délai de détection de 24 heures a été fixé pour tout satellite passant au dessus de la France ; d'autre part, les mesures collectées doivent assurer la détermination de l'orbite dès le premier passage. L'originalité du système GRAVES repose sur une architecture selon laquelle l'essentiel de la mission dépend des traitements orbitographiques et non du capteur.

Les éléments clés du concept GRAVES sont :

- Un radar bistatique fabriqué avec des composants du commerce, qui lui confèrent fiabilité et facilité de maintenance. La performance repose sur un traitement du signal évolué, qui requiert toute la puissance d'un calculateur temps réel dédié, d'une puissance de 60 Gflops.
- Des antennes émettent un signal continu à basse fréquence dans un secteur angulaire donné de l'espace, sur le site d'émission, situé à Broye-les-Pesmes, près de Dijon,. Distant de près de 400 km, le système de réception, basé sur le plateau d'Albion, est constitué d'un grand nombre d'antennes omnidirectionnelles. A partir des signaux élémentaires reçus par celles-ci, un faisceau à lobe étroit est

produit selon une technique innovante de calcul. Aucun élément mécanique n'est en mouvement. La direction de ce lobe fournit une mesure angulaire de l'objet détecté, alors que le décalage fréquentiel entre les signaux émis et reçus permet d'obtenir une mesure de la vitesse radiale. Ce qui est suffisant pour déterminer une orbite.

- A l'origine du projet, un effort très important a été consacré au développement des logiciels qui assurent la conversion des mesures brutes en une base de données de paramètres orbitaux de façon autonome et automatique, d'où un coût d'exploitation réduit. Cette tâche représentait un challenge technique très ambitieux car, contrairement au système américain qui utilise de nombreux capteurs répartis autour du globe (déttection + poursuite), les outils développés pour le système GRAVES traitent des mesures issues d'un seul capteur.

Jean-Paul Ney, Vice-président de la Commission des journalistes de la défense.

Remerciements : Colonel Yves Blin, Matthieu Duvelleroy (DGA), ONERA et le Commandement de la Défense Aérienne et des Opérations Aériennes.

[http://www.defense.gouv.fr/defense/votre\\_espace/journalistes/points\\_presse/point\\_presse\\_du\\_ministere\\_de\\_la\\_defense\\_le\\_14\\_06\\_2007](http://www.defense.gouv.fr/defense/votre_espace/journalistes/points_presse/point_presse_du_ministere_de_la_defense_le_14_06_2007)

Point presse hebdomadaire du porte-parole du ministère de la Défense  
le 14/06/2007

(Extraits)

## **Le radar GRAVES**

JEAN-FRANCOIS BUREAU

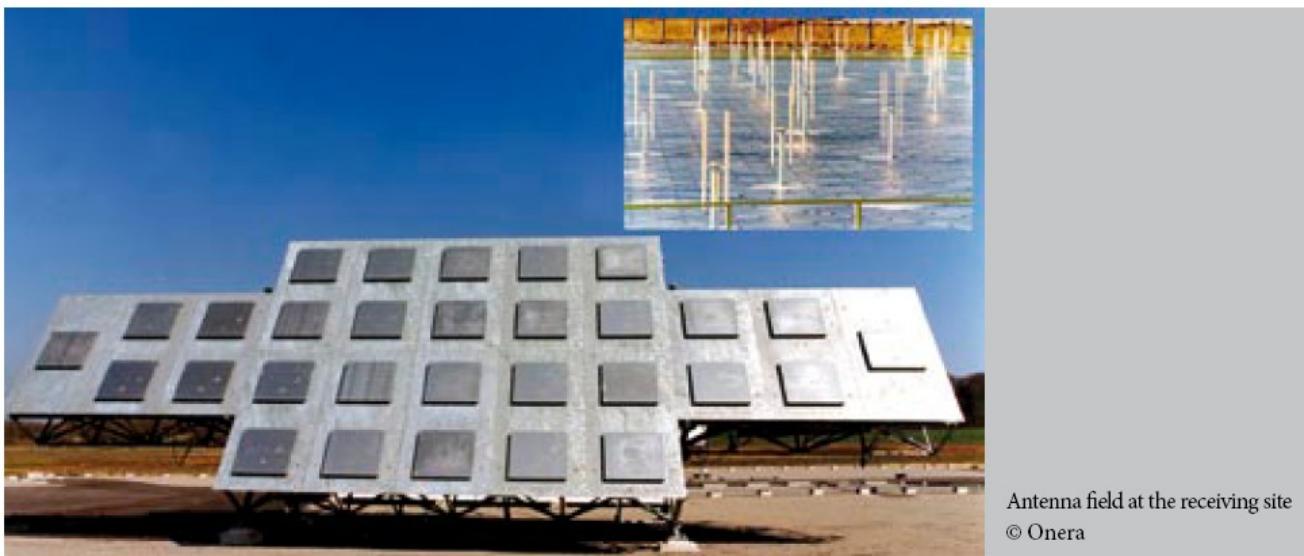
S'agissant du radar GRAVES (Grand réseau adapté à la veille spatiale), il est important de préciser que ce système de veille a permis récemment à la France de détecter 20 à 30 objets non répertoriés. En revanche, il n'est pas encore possible de déterminer si ces objets constituent des débris ou sont encore en activité, et encore moins de déterminer le cas échéant, quelle est leur nationalité. Si la détection des objets spatiaux est possible, leur identification ou leur qualification, s'avère plus délicate ; et si certains de ces objets n'étaient pas recensés dans le document produit par le département américain de la Défense, il n'y a donc pas pour autant matière à en tirer des conclusions.

D'une manière générale, la France se situe, avec ses partenaires européens et américains, dans une démarche de coopération. La surveillance spatiale est un domaine important de coopération possible.

Ainsi, la France a engagé des pourparlers avec l'Allemagne qui dispose d'un programme qui peut être complémentaire du système français. Avec ses partenaires américains, la France se trouve dans le même état d'esprit.

Le développement et la mise en œuvre du radar GRAVES ouvrent donc des possibilités de coopération et d'échange d'informations. La France est parfaitement disposée à engager des coopérations sur la surveillance de l'espace.

## Observing and listening to improve decision-making



### GRAVES

The GRAVES project (French acronym for large-scale network adapted to spatial monitoring) offers the only means for monitoring low orbits in Europe. Its operation was handed over the French Air Force at the time of in-service implementation in December 2005. This system was designed and built by France's Onera Aerospace Research Centre under the supervision of the General Armament Delegation (DGA). With responsibility assigned to the Command and Control System for Air Operations (SCCOA), the GRAVES system offers:

- non-stop operations, 24 hours a day, 7 days a week, without any human intervention;
- detection of objects in orbit at an altitude of between 400 and 1,000 km when flying over mainland French territory;
- orbit pattern descriptions of all detected objects.

Knowing these orbit patterns enables system operators to extrapolate the position of all satellites being monitored at any point in time.

#### The VHF radar subsystem

The emitter is located near the Dijon Air Base in eastern France. The radar emits a wave at a very precise frequency by means of four fixed scanning electron antennas. The beams of these

antennas are synchronised and span a full 180° southward.

The receiver is located on the Plateau of Apt, under the responsibility of the Orange Air Base (Provence) and consists of a fixed omnidirectional antenna field. This antenna's orientation is obtained using a computed beam formation.

Once deployed, this radar yields onsite measurements, relative bearing and speed.

### **The orbitography calculation subsystem**

These measurements are input into the orbitography calculation servers located at the **Balard Air Complex in Paris**, which maintains on an ongoing basis a catalogue containing descriptive orbit data on each detected object. This catalogue has been produced from system measurements alone, without any contribution from external sources. An ancillary calculator function does however make it possible to benefit from these external sources for comparison purposes.

The catalogue is made available to operators assigned to keep track of spatial conditions. This resource enables operators to produce, on behalf of military forces or political / military authorities, zone flight path advisories or early warnings of a collision or atmospheric entry.

### **Contact**

- French Air Force
    - Franck Schrottenloher  
[spatial.cdaoa@air.defense.gouv.fr](mailto:spatial.cdaoa@air.defense.gouv.fr)
  - General Armament Delegation
    - Ronan Moulinet  
[ronan.moulinet@dga.defense.gouv.fr](mailto:ronan.moulinet@dga.defense.gouv.fr)
- [www.defense.gouv.fr](http://www.defense.gouv.fr)  
[www.ixarm.com](http://www.ixarm.com)

[http://www.ixarm.com/IMG/pdf/Coordonnes\\_des\\_sites\\_DGA.pdf](http://www.ixarm.com/IMG/pdf/Coordonnes_des_sites_DGA.pdf)

**Coordonnées du site de Balard de la DGA :**

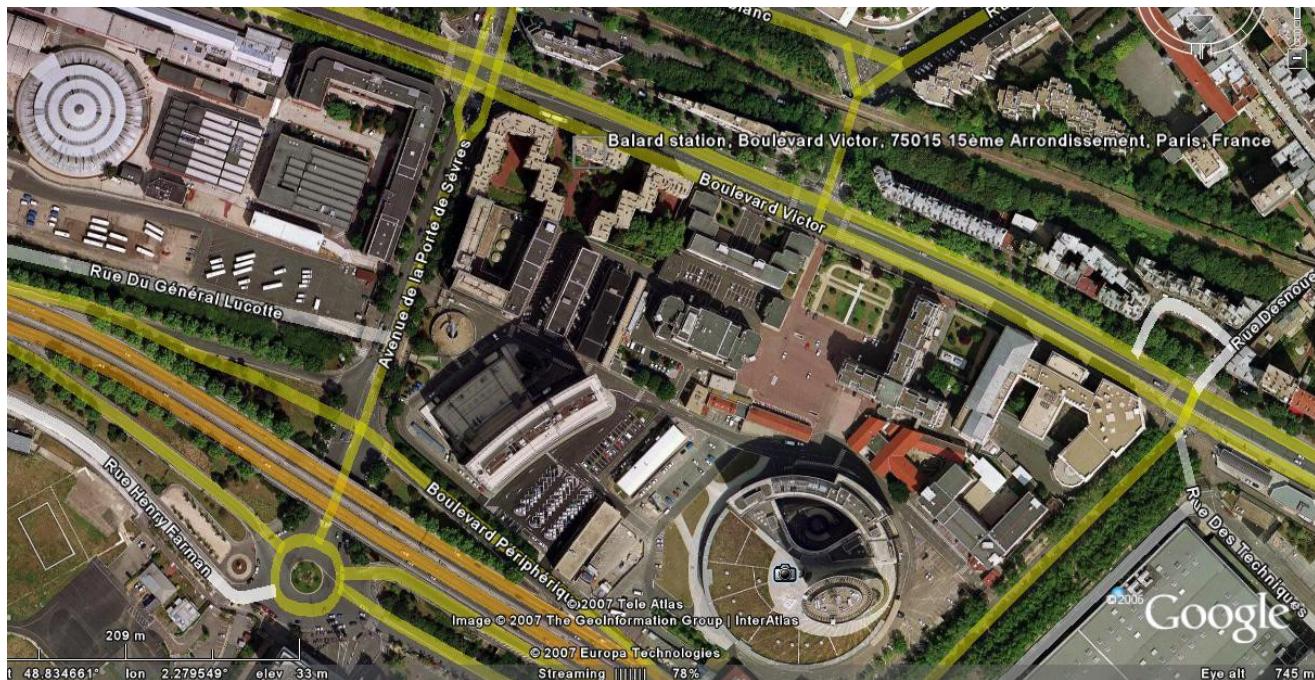
Adresse géographique : 5 bis avenue de la Portes de Sèvres (accès visiteur)

Adresse postale : 26 boulevard Victor- 75015 Paris

Adresse postale militaire : 00457 Armées

Numéro de téléphone : standard 01 45 52 43 21 / 34 56 (**cité de l'air et base aérienne 117**)

Numéro de fax : 01 45 52 66 35



[http://209.73.219.100/spacenews/archive07/editorial\\_0702.html](http://209.73.219.100/spacenews/archive07/editorial_0702.html)

## **Editorial: For Space Surveillance, It's a Brave New World**

posted: 09 July 2007

04:26 pm ET

Recent threats by France to publish the orbital parameters of 20 to 30 unidentified objects presumed to be classified U.S. spy satellites underscores the degree to which space-related diplomacy and policymaking struggle to keep pace with events.

Now comes the question of how much information about operational satellites should be in the public domain. The French are miffed that the orbits and location of their military satellites are published by the U.S. Air Force as part of an almost-comprehensive registry of known satellites and space junk - certain U.S. government satellites are excluded - and say they will return the favor unless that practice ends.

The orbital disposition of U.S. spy satellites is a jealously guarded secret, even though it is fair to assume much of this information already is known to other spacefaring nations such as China, India, Japan, Russia and the major European powers. Indeed, U.S. government officials have accused China of deliberately illuminating a U.S. satellite with a ground-based laser, something Beijing could not have done without an independent means of space surveillance. In fact, spotting U.S. spy satellites - particularly the big radar satellites in low orbit - has long been a game of sport among a small band of hobbyists around the world.

Many of France's military satellites are experimental, but French defense officials say they are serious about fielding operational space capabilities in areas such as electronic eavesdropping and missile warning.

In any case, France has a point: Why should the whereabouts of U.S. national security satellites be held sacred while French satellites are treated as fair game?

Perhaps more importantly, France now has the technical means to even the score.

This goes to the larger point that space-related capabilities that once were the exclusive domain of a very few nations - in many instances the United States alone - are becoming more widely available. This is not so much a revelation as a recurring theme, but it is one Washington has always seemed to accept only grudgingly.

Given the increasingly crowded environment in which satellites of all types operate, there is obvious benefit to having a public registry of Earth-orbiting objects from large satellites to the tiniest pieces of observable debris. The question of whether certain satellites should be left out of the registry - and if so, which ones - is far more complicated now that France has pushed it into the realm of international diplomacy.

The inexorable spread of space technology is bringing an end to the days when issues such as this could be decided unilaterally based on who had what capability. While few would argue that the U.S. Space Surveillance Network is not the world's best in terms of the number and size of space objects it

can detect and track, when it comes to operational spy satellites, France's Graves radar - and probably others operated by countries like China - appears good enough.

France, having made its point, now should refrain from following through on its threat. While some countries already might know the whereabouts of America's satellites, others do not. Some of the countries that presumably are still in the dark - Iran and North Korea come to mind - are engaged in activities that bear watching for the sake of everyone.

The same holds true for non-state actors, including terrorist organizations. The recent hijacking of Intelsat satellite signals by the Tamil Tigers separatist group in Sri Lanka attests to the growing awareness and technical savvy of these organizations: One must assume that, armed with knowledge of the disposition of the U.S. spy fleet, they would time certain activities such as communications or movements of materiel so as to escape detection by satellites passing overhead.

In the meantime, the United States and France should begin a dialogue on this matter, if they have not already done so. Perhaps some sort of a bilateral arrangement can be reached that strikes a reasonable balance between the need, especially among spacefaring nations, to understand the cluttered orbital environment and legitimate security-related concerns. Any such deal could form the basis of a multilateral regime, which will become necessary as other nations acquire sophisticated space-surveillance capabilities.

[http://www.lefigaro.fr/sciences/20070622.FIG000000062\\_graves\\_le\\_radar\\_francais\\_qui\\_surveille\\_les\\_objets\\_dans\\_l\\_espace.html](http://www.lefigaro.fr/sciences/20070622.FIG000000062_graves_le_radar_francais_qui_surveille_les_objets_dans_l_espace.html)

## Un radar français débusque les satellites espions américains

ARNAUD DE LA GRANGE.

Publié le 22 juin 2007

Actualisé le 22 juin 2007 : 08h03

**Le radar Graves permet désormais à la France de contrôler tous les satellites en orbite basse.**



**Posés dans une prairie bourguignonne, les panneaux du nouveau radar constituent l'avant-garde d'une défense spatiale française. Onera.fr**

LES MILITAIRES adorent les acronymes, mais celui de « Graves » laisse perplexe. Et la version longue - « grand réseau adapté à la veille spatiale » - éveille à coup sûr la curiosité. Placidement posés dans une prairie bourguignonne, près du village de Broye-les-Pesmes, les panneaux de cet étrange radar constituent l'avant-garde d'une défense spatiale française. Les antennes de réception, elles, sont situées sur le plateau d'Albion. Mis en service il y a un an et demi, Graves est présenté cette année au salon du Bourget.

Unique en Europe, le radar Graves est destiné à détecter et suivre les « objets » défilant en orbite basse, soit entre 300 et 1 000 kilomètres d'altitude. En janvier dernier, il a permis de confirmer - mais non de détecter en alerte - le tir antisatellite chinois. L'histoire de Graves est originale. Il s'agissait au départ d'un simple démonstrateur technologique, commandé par la DGA (Délégation générale pour l'armement) et développé par l'ONERA (Office national d'études et recherches aérospatiales), qui s'est mué en dispositif opérationnel. Le tout utilisant des technologies disponibles dans le commerce, comme des émetteurs de télévision, et au prix d'une dépense somme toute modique, quelque 30 millions d'euros.

« Aussi important que le nucléaire »

« Ce n'est qu'un premier pas et nous n'avons pas encore de moyens permettant une surveillance globale de l'espace », explique le général Hughes Hendel, N° 2 du CDAOA (Commandement de la défense aérienne et des opérations aériennes) dont dépend Graves, « il existe différents moyens en Europe qui ne sont pas fédérés. Graves pourrait être l'apport français à une coopération européenne. »

En bilatéral, Paris coopère déjà avec Berlin, qui dispose d'un outil complémentaire avec le radar Tira, qui permet d'identifier un objet détecté par Graves. « Aujourd'hui, on n'a pas les moyens d'être sûrs à

plus de 40 % de l'identité d'un objet, concède un spécialiste. Pour aller plus loin, il faut se doter de télescopes optiques spéciaux, capables de suivre un satellite qui passe d'un horizon à l'autre en 10 minutes. »

Pour Graves, la tâche est ardue. Quelque 8 000 objets évoluent en permanence autour de la Terre. « Notre radar nous a permis de nous constituer un catalogue autonome de 2 000 objets », poursuit le général Hendel. Jusqu'à présent, la seule source ouverte disponible était celle du Space Command américain. En se fiant à la liste américaine, les Français auraient dû trouver 1 035 « objets ». Or, ils en ont repéré bien plus. Si l'on exclut les débris, il y aurait 20 à 30 « anomalies orbitales », pour une bonne part des satellites espions, américains notamment.

La perspicacité de Graves a permis à Paris d'entamer une aimable négociation stratégique avec Washington, en s'engageant à rester discret sur ces détections si les Américains cessaient de mettre leurs données sur les satellites sensibles français sur la base de données ouverte du Space Command.

Reste la question des moyens. Lors d'un récent colloque organisé par l'Armée de l'Air, Serge Plattard, secrétaire général de l'Institut européen de politique spatiale, citait des chiffres éloquents : « L'Europe ne totalise que 4 % des dépenses mondiales consacrées à l'espace militaire, soit 0,4 % des budgets européens de défense. À l'inverse, les États-Unis concentrent 90 % des dépenses mondiales du secteur, soit 7 à 8 % du budget américain de défense. » Il y a aujourd'hui une vingtaine de satellites européens à vocation de défense, contre 200 américains. Or, le spatial va s'imposer de plus en plus comme un instrument de puissance. Washington a clairement défini l'espace comme un « intérêt national vital » et le tir chinois a réveillé les esprits engourdis. L'effort de défense français pour le spatial va être augmenté de 50 %, pour atteindre 650 millions d'euros par an.

Pour l'ambassadeur Gutman, « dans les décennies à venir, l'espace va devenir aussi important que le nucléaire pour l'indépendance nationale ».

<http://www.lemonde.fr/web/article/0,1-0@2-3234,36-925954@51-924047,0.html>

*via*

<http://www.spyworld-actu.com/spip.php?article4861>

## **Le radar "Graves" scrute l'espace et détecte les satellites espions américains**

LE MONDE

20.06.07 | 15h21

Mis à jour le 20.06.07 | 15h21

Laurent Zecchini, le Monde

mercredi 20 juin 2007

par Spyworld

Les explications officielles du ministère de la défense paraissent conçues pour aiguiser la curiosité : "Depuis sa mise en service, "Graves" a répertorié et suivi plus de 2 200 objets. Parmi eux se trouvent plusieurs dizaines de satellites, jugés sensibles, qui passent au-dessus de la France, pour lesquels aucune information n'existe." Graves, pour "Grand réseau adapté à la veille spatiale", ce système radar peu connu qui est présenté au Salon du Bourget, constitue une première étape vers une défense spatiale de la France.

Placé sous le contrôle du commandement de la défense aérienne et des opérations aériennes (CDAOA), il fonctionne 24 heures sur 24, scrutant le ciel, détectant les "objets" situés en orbite basse, à une altitude comprise entre 400 et 1 000 kilomètres. C'est un système relativement peu onéreux (il a coûté 30 millions d'euros), qui associe un site d'émission situé près du village de Broye-lès-Pesmes (Haute-Saône), un site de réception composé d'antennes omnidirectionnelles, dressées sur le plateau d'Albion, et une batterie de calculateurs surpuissants.

En se basant sur des projections théoriques, les spécialistes avaient estimé que Graves, qui a été livré à l'armée de l'air en décembre 2005, serait capable de détecter au moins 1 035 "objets". Ils étaient d'autant plus fondés à le croire, que ce chiffre correspondait peu ou prou à celui de la base de données "ouvertes" du commandement spatial de l'armée de l'air américaine, qui est diffusée sur Internet.

## **UN NOUVEL ÉQUILIBRE STRATÉGIQUE**

"Or on a vu deux fois plus d'objets que prévu, explique le colonel Yves Blin, de la division espace de l'état-major des armées (EMA), c'est-à-dire des objets plus petits", d'une taille au moins égale à celle d'un microsatellite (surface d'environ 1 m<sup>2</sup>). Et puis, surprise : parmi eux, figuraient de 20 à 30 "anomalies orbitales", parmi lesquelles - la conclusion s'imposait d'elle-même -, bon nombre de satellites espions, surtout américains.

"Cela nous a conduits à prendre contact avec nos amis américains, explique le général Patrick de Rousiers, commandant de la défense aérienne, et à faire part de notre étonnement." Les choses se sont réglées à l'amiable.

La France a admis que les Etats-Unis disposent de satellites "stratégiques" dont ils préfèrent taire l'existence, mais elle a demandé une réciprocité : que les renseignements collectés par ses satellites militaires (Hélios-2 pour l'observation, Syracuse-2 pour les télécommunications, le démonstrateur

Essaim pour le recueil du renseignement d'origine électromagnétique), ne soient plus disponibles sur les sources "ouvertes" américaines, pratique jugée inamicale.

Mais Paris n'a pas voulu polémiquer. "Nous sommes dans tous les cas très dépendants des renseignements des Etats-Unis, parce qu'ils disposent de bien plus de capteurs que nous, explique le général de Rousiers, et voient des objets plus petits."

La mise en service de Graves a cependant changé l'équilibre de la relation stratégique avec Washington. Une preuve en a été fournie au moment du tir antisatellite chinois, le 11 janvier 2007. Sans attendre les informations américaines, Graves a permis aux autorités françaises d'obtenir une confirmation indépendante de cet essai.

"Nous avons désormais des éléments nous permettant de discuter de façon plus harmonieuse avec les Américains, parce que Graves renforce notre statut de partenaire stratégique", résume le colonel Blin. Les informations de ce radar unique en Europe sont notamment fournies au Centre national des études spatiales (CNES), qui peut ainsi mieux calculer les "fenêtres de tir" des fusées. Mais la fonction première de Graves est de surveiller les véhicules spatiaux évoluant à proximité de la Terre, soit 9 000 objets d'une taille supérieure à 10 centimètres, dont près de 800 satellites actifs.

Il permet aussi d'actualiser les trajectoires des satellites GPS, demain ceux de Galileo, et il aidera le CDAOA à assumer une fonction d'"alerte aux populations", en permettant de détecter d'éventuelles retombées de débris spatiaux.

En 2008, il sera complété par un démonstrateur d'alerte avancée, qui devrait permettre de préciser l'origine et la mission d'un satellite

Point presse hebdomadaire du porte-parole du ministère de la Défense le 14/06/2007  
(Extrait//)

Le radar GRAVES

JEAN-FRANCOIS BUREAU

S'agissant du radar GRAVES (Grand réseau adapté à la veille spatiale), il est important de préciser que ce système de veille a permis récemment à la France de détecter 20 à 30 objets non répertoriés. En revanche, il n'est pas encore possible de déterminer si ces objets constituent des débris ou sont encore en activité, et encore moins de déterminer le cas échéant, quelle est leur nationalité. Si la détection des objets spatiaux est possible, leur identification ou leur qualification, s'avère plus délicate ; et si certains de ces objets n'étaient pas recensés dans le document produit par le département américain de la Défense, il n'y a donc pas pour autant matière à en tirer des conclusions.

D'une manière générale, la France se situe, avec ses partenaires européens et américains, dans une démarche de coopération. La surveillance spatiale est un domaine important de coopération possible.

Ainsi, la France a engagé des pourparlers avec l'Allemagne qui dispose d'un programme qui peut être complémentaire du système français. Avec ses partenaires américains, la France se trouve dans le même état d'esprit.

Le développement et la mise en œuvre du radar GRAVES ouvrent donc des possibilités de coopération et d'échange d'informations. La France est parfaitement disposée à engager des coopérations sur la surveillance de l'espace.

## Espionnage spatial : les satellites qui n'existent pas

Par Jean Etienne, Futura-Sciences

**Le radar GRAVES est le pendant français du réseau américain NORAD (North American Aerospace Defense Command), et exerce une fonction identique : détecter et poursuivre les satellites ou autres objets parcourant l'espace circumterrestre, et notamment ceux qui présentent un risque potentiel pour le territoire. Et après 16 mois de fonctionnement, de bien étranges découvertes apparaissent à son actif...**

De 20 à 30 satellites secrets apparaissent ainsi en orbite à une altitude inférieure à 1000 km. Or, ceux-ci ne sont pas repris au catalogue publié par le département de la défense américain, ce qui autorise à porter de fortes suspicions sur leur origine... Et les services de surveillance de l'Oncle Sam seraient bien mal inspirés d'affirmer qu'ils ne les ont pas aperçus, car le NORAD, qui constitue la référence mondiale en la matière, est capable de photographier des objets de 10 cm jusqu'à une altitude de 8000 km, plus qu'il n'en faut !

Or, les militaires américains préfèrent jouer la carte de l'hypocrisie. Questionnés à ce sujet par un représentant français du radar GRAVES, ils ont répondu tout de go que "si les informations n'étaient pas publiées dans le catalogue, c'est que ces objets n'existaient pas". Pourtant, certains de ces satellites apparaissent bien, à l'analyse des données, équipés de panneaux solaires...

Mais cette situation révèle aussi un malaise qui ternit quelque peu les relations diplomatiques entre la France et les USA. Car si ces derniers refusent obstinément de reconnaître l'existence d'objets que chacun des deux protagonistes observe pourtant, ils ne manquent pas de publier avec force détails les orbites des matériels militaires d'autres nations, y compris la France, au grand dam de leurs dirigeants. Or, l'Europe, qui planche sur le cadre d'un futur programme européen de surveillance de l'espace que les pays associés à l'ESA devront approuver en 2008, souhaiterait entamer des négociations sérieuses pour mettre au point un protocole d'accord sur la publication des informations sur les orbites des satellites. "En ce moment nous n'avons pas assez de cartes en main pour entamer des négociations", affirme le colonel Yves Blin, chef du bureau Espace de la division Espace/SIC de l'EMA, ajoutant qu'il attend des informations complémentaires provenant d'un système radar allemand similaire à GRAVES, et qu'il pourra alors placer les Américains devant une alternative : "nous avons vu des choses que vous pourriez souhaiter garder en dehors du domaine public. Nous accepterons de le faire si vous acceptez en retour de cesser de publier l'emplacement de nos satellites sensibles".

[http://www.space.com/news/060707\\_graves\\_web.html](http://www.space.com/news/060707_graves_web.html)

French Say 'Non' to U.S. Disclosure of Secret Satellites

By PETER B. de SELDING

Space News Staff Writer

posted: 08 June 2007

09:58 am ET

BROYE-LES-PESMES, France - A French space-surveillance radar has detected 20-30 satellites in low Earth orbit that do not figure in the U.S. Defense Department's published catalogue, a discovery that French officials say they will use to pressure U.S. authorities to stop publishing the whereabouts of French reconnaissance and military communications satellites.

After 16 months of operations of their Graves radar system, which can locate satellites in orbits up to 1,000 kilometers in altitude and even higher in certain cases, the French Defense Ministry says it has gathered just about enough information to negotiate an agreement with the United States.

The U.S. Defense Department's Space Surveillance Network is the world's gold standard for cataloguing satellites and debris in both low Earth orbit and the higher geostationary orbit at 36,000 kilometers in altitude, where telecommunications satellites operate.

Data from the U.S. network of ground-based sensors is regularly published and used worldwide by those tracking satellite and space-debris trajectories. The published U.S. information excludes sensitive U.S. defense satellites, but regularly publishes data on the orbits of other nations' military hardware.

In a series of presentations here at the site of the French Graves radar facility, French defense officials said they are gathering data on classified satellites in low Earth orbit as part of a future European space-surveillance program that European Space Agency governments will be asked to approve in 2008. This program, with a cost of some 300 million euros (\$405 million), would feature higher-performance radars to track space debris in low orbit and in geostationary orbit.

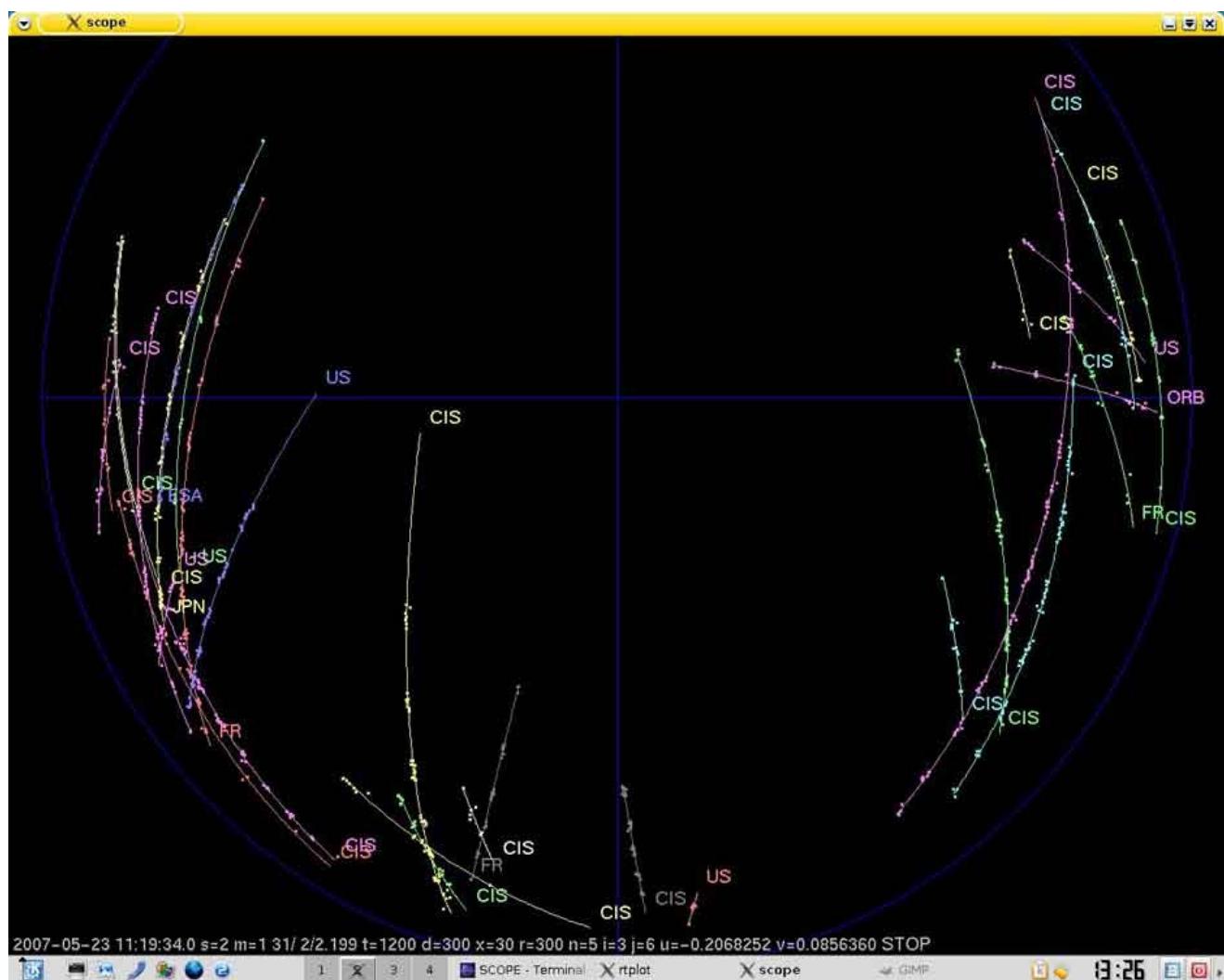
This new space surveillance program may or may not be approved by European governments. But the Graves radar, and a complementary system operated by the German government, together already are enough to pinpoint the location, size, orbit and transmissions frequencies of satellites that the United States would prefer not be broadcast worldwide, French officials said.

"We have discussed the Graves results with our American colleagues and highlighted the discrepancies between what we have found and what is published by the U.S. Space Surveillance Network," said one French defense official responsible for the Graves operation. "They told us, 'If we have not published it in our catalogue, then it does not exist.' So I guess we have been tracking objects that do not exist. I can tell you that some of these non-existent objects have solar arrays."

Col. Yves Blin, deputy head of the space division at the French joint defense staff, said France would wait until it had acquired, with the help of the German radar, further information about the 20 to 30 secret satellites in question before beginning serious negotiations with the United States on a common approach for publishing satellite orbit information.

"Right now we do not have enough cards in our hand to begin negotiations," Blin said here at the Graves radar transmitter site June 7. "We need more time to be sure of what we are seeing. At that point we can tell our American friends, 'We have seen some things that you might wish to keep out of the public domain. We will agree to do this if you agree to stop publishing the location of our sensitive satellites."

<https://www.european-security.org/index.php?id=5669>



Représentation en temps réel des données de surveillance de l'espace.

<https://www.european-security.org/index.php?id=5669>



Site émission du radar GRAVES

Si l'acronyme semble mal choisi, il reflète bien la nature et la mission qui lui sont dévolues. En effet, il s'agit d'un système composé d'une partie radar et d'une partie calculateurs orbitographiques. Le radar émet une onde entretenue (CW), c'est pourquoi il fallait séparer le site de réception du site émission: le radar est de fait bi statique. La partie émission située à Broye-lès-Pesme (près de Dijon) comprend quatre panneaux qui émettent et balayent les  $180^\circ$ . L'ouverture en site des faisceaux est de  $20^\circ$  pour une largeur du lobe d'environ  $10^\circ$  environ. Les antennes sont inclinées à  $30^\circ$ . Chaque antenne couvre une portion de  $45^\circ$ .

<https://www.european-security.org/index.php?id=5669>



Site réception du radar GRAVES

Le site de réception est situé à Revest-du-Bion (près d'Apt) sur un ancien silo du plateau d'Albion. Un disque métallique de 80 mètres est recouvert d'une centaine d'antennes omnidirectionnelles. En jouant sur le déphasage des antennes, on reforme par le calcul des pinceaux fins de réception. Les calculateurs installés sur le site permettent de réaliser simultanément 1200 faisceaux qui sont dirigés vers les zones éclairées. Dans ces conditions, aucun satellite ne peut passer au-dessus de la métropole sans être détecté. Le signal est directement numérisé sur le site puis pré assemblé avant d'être transmis aux calculateurs orbitographiques. Situés à Paris, ces calculateurs traitent les données reçues pour suivre et cataloguer les objets détectés. Cette partie du système est certainement celle qui apporte de la plus-value à la capacité de détection. A ce jour, 2200 objets environ sont suivis et catalogués 24 heures sur 24 par le système.

[http://www.dircam.air.defense.gouv.fr/dia/PDF/ERF\\_ZONE\\_D.pdf](http://www.dircam.air.defense.gouv.fr/dia/PDF/ERF_ZONE_D.pdf)  
[Accessed 2007-06-08]

## ZONES DANGEREUSES

(Réf : AIP FRANCE - MIA - ENR 5.1)

NR	LIEU Nature de l'activité	Lim. Sup Lim. Inf	OBSERVATIONS
D 75	BROYE LES PESMES Emission radar de forte puissance	3000ft ASFC SFC	<b>Gestionnaire :</b> NIL Active H24. Risque de perturbations des systèmes électriques bord.

<http://www.onera.fr/news/2006-02.php>

## February 2006

### Official startup of the Graves system

The result of a thirteen year work, the Graves system (Radar System Adapted to the Space) was officially commissioned by DGA/SPAE on last 15 December, at the end of a successful two month demonstration. During this period, Graves worked 24 H out of 24 and showed its capacity to create and maintain a data base of orbital elements of low altitude satellites. The reliability and performance of this system correspond exactly with the requirements of the end-user. So the Staff of the Air Force (EMAA) pronounced on last 22 December the startup for the operational exploitation of the radar.



The Graves radar emission site

Graves is located in Metropolitan France, with an emission site in the East, and a reception site in the South-East, 400 km away from each other. This radar is made of two autonomous subsystems: a radar that produces measurements and a computer that transforms the measurements into a catalogue of orbital elements. With a single sensor, the French system is able to observe one quarter of all the objects indexed in the American catalogue, which system is much richer in terms of sensors. "*Our processing is probably more coherent*", estimates Jacques Bouchard, the researcher who conceived and developed the orbit computation software of Graves.

### Contacts

#### **Dominique Huard**

dhuard @ onera.fr

Tel : 01 46 73 40 65

Fax : 01 46 73 41 59

[http://www.ambafrance-ca.org/HYPERLAB/actualite/fichiersFranceST/FranceST\\_086\\_US.pdf](http://www.ambafrance-ca.org/HYPERLAB/actualite/fichiersFranceST/FranceST_086_US.pdf)

*FranceST # 86 - 02/20/2006*

## **Graves Is Operational**

After thirteen years in the works, the Graves (*Grand Rseau Adapt. . la Veille Spatiale*) Space Surveillance System was officially commissioned by the DGA/SPA last December 15 after an efficiency demonstration that had started on October 20, 2005. Since then, Graves has been working 24/7 and proving its capacity to create and autonomously maintain a database on the orbital parameters of low altitude satellites. System reliability and performance complied fully with customer and final user (i.e., the French Air Defense and Air Operations Command, CDAOA) expectations. So, on December 22, the French Air Force Joint Chiefs (EMAA) declared Graves ready and operational for radar data processing.

Graves is the outcome of close work between ONERA Long-term Design and Systems Integration Department (DPRS) and the Electromagnetism and Radar Department (DEMR). The Space Surveillance System is located in metropolitan France with a transmission site in the East located 400 kilometers from its receiving site on the Albion plateau in southwest France. The system has two autonomous subsystems, i.e., a radar producing measurements and a calculator turning them into a catalogue of orbital parameters. The system has been designed to observe at altitudes as far up as 1,000 kilometers. Of course, the data broadcast by Graves only amounts to a fraction of what the US system can observe. However, with a single radar sensor, the French system can observe nearly one fourth of all the objects listed in the US catalogue whose system has so many more measurement sensors. "We undoubtedly have much greater processing coherence," said Jacques Bouchard, DPRS Research Engineer who designed and developed Graves orbitographic software.

### ***Contacts :***

***ONERA - Dominique Huard - Phone: +33(0)1 46 73 40 65 - Email: dominique.huard@onera.fr***

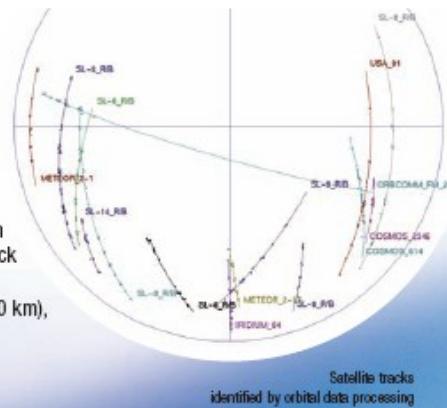
## Graves, a space surveillance system

### Independent capability for France

Designed and built by ONERA as prime contractor, the Graves space surveillance system officially started operation on December 15, 2005. The French air force is now operating the radar and processing system 24 hours a day to detect satellites flying over French territory, determine their trajectory, and create a catalog. Graves is the first space surveillance system in Europe.

In 2005, ONERA also carried out a detailed study for a complete space debris surveillance system, allowing Europe to catalog the following:

- Objects less than 10 cm in low orbit (up to 2,000 km), using a radar system based on Graves. A high-gain transmitting antenna prototype was built to check the feasibility of high-power transmissions.
- Objects exceeding 1 meter in various orbits, including geostationary (36,000 km), using a distributed optical surveillance and tracking system, installed at four sites around the world.



[http://www.fitscience.org/media/upload/FranceST\\_075.pdf](http://www.fitscience.org/media/upload/FranceST_075.pdf)

*FranceST # 75 - 08/24/2005*

### **Imminent delivery of the French space surveillance system**

**Graves (Large Network Adapted to Space Surveillance) is a space surveillance system created and developed by Onera teams for the General Weapons Delegation (DGA). Last December the first trial run of the final operating system took place, the development of the system took thirteen years. Jacques Bouchard, research engineer with Onera's DPRS (Long-Term Design and Systems Integration) department, and creator and developer of the orbitographic software for the system, verified the ability of these tools to establish a database of orbital elements by processing angular measurements and radial velocity data collected by radar. A second, longer trial will be completed before the orbitographic system is delivered to the army in the autumn.**

9,000 satellites or objects whose size is larger than ten centimeters orbit around the Earth - according to the American database which records them. However, it is possible that objects in higher orbit cannot be cataloged, even if their size exceeds ten centimeters. Among these 9,000 satellites or objects, many pass over France daily, creating a potential threat to national security. America currently has an operational space surveillance system composed of two very distant receptors (the distance that separates them is longer than the length of the American continent). This device creates a sort of large, vertical curtain. As soon as a satellite crosses the curtain, it is chased by a pursuit radar. There is also a Russian space surveillance system on which little information is available. In this context, Onera has been suggesting since the beginning of the 1990's the creation of a radar called Graves, which would allow the surveillance of satellites that could observe French territory.

### **More than a quarter of satellites followed by Graves**

Consisting of two autonomous subsystems, a radar that takes measurements and orbitographic algorithms that transform them into a database of orbital elements, the proposed system has made several compromises. Graves is based in metropolitan France, with an emission site situated in eastern France and another in the southeast, on the Albion Plateau. The two sites are 400 kilometers apart, which limits the ability of detection vis-.-vis orbits subtly inclined to the equator, but they are few. Created for observations up to altitudes of 1,000 kilometers, this radar can follow more than a quarter of satellites, the majority of those considered the most threatening.

To obtain maximum efficiency from the detection system, two principal constraints have been defined. One, a maximum detection delay of 24 hours was set, which signifies that each satellite should be seen with a recurrence of 24 hours. Also, the measurements collected must be able to determine the orbit from the first passage. Hence the solution, suggested by Onera, using a bistatic scanning radar. On the emission site, antennae emit a continuous, low-frequency signal toward a given, angular sector of

space. To the south, the reception site houses a large number of omnidirectional antennae. "Based on signals received from these antennae, a narrow lobe beam is produced," explains Jacques Bouchard. "The direction of the lobe provides an angular measurement of the object detected, while the frequency shift between the signals emitted and received measures its radial velocity."

### **Guarantee the independence of the country's space surveillance**

Since 1992, Jacques Bouchard has been working full time on the development of Graves as a spatial mechanics specialist. He began by defining the project, determining the zone that should be scrutinized by the radar to ensure the mission objectives - to provide users (the military) a database of orbital elements updated daily. Next, he created simulation software for the instrument to verify that it was capable of meeting the objectives. Finally, Jacques Bouchard expanded the software to use the orbitographic measurements, work that just ended with the orbitographic system test campaign last December. This trial was mainly carried out with his wife, Aline Bouchard, also a DPRS research engineer, who ensured the software tests. "We had to verify that we were able to establish a database of orbital elements by processing the data provided by the radar." The objective of this campaign was also to verify the quantity and the quality of data produced by the radar, which underwent huge modifications since the was prototype tested in 2001 (double emission power, new signal processing algorithms that are six times more powerful).

In order to be compatible with existing databases, particularly the American one, the French orbital elements database is in the "two lines" distribution format. "The data distributed by Graves will only concern a fraction of what the American system can observe. The American catalog lists objects whose height is near the Moon, a distance of about 300,000 km," notes Jacques Bouchard, who clarifies that the American system is much richer in measurement sensors. That said, with one sensor, Graves is capable of observing nearly a quarter of the total number of objects listed in the American catalog. "We undoubtedly have a data processing coherence highly superior to the Americans'," he thinks.

**During the first campaign, Graves enabled the listing of some satellites that don't appear in the** American database of orbital elements... Furthermore, the Americans voluntarily limit the production of their data to 24 hours, while the frequency of renewal of elements provided by Graves is 12 hours in 70% of the cases. "It is imperative to have our own space surveillance system and have a guarantee against a possible blackout in data distribution," states Jacques Bouchard.

### **The completion of a project after thirteen years of work**

Sometime this summer a second test campaign will be carried out. Its goal is to test the Graves orbitographic system. Once again, Jacques Bouchard and his wife Aline will team up to use the measurements collected by radar, piloted from Onera. Next, the orbitographic system will be delivered to the military and connected to radar via the air force's network. Then some fine tuning will be done, mostly on the software, during 2006. "Solar activity has an influence, particularly on ionospheric refraction, thus on measurement quality. Consequently, the system could experience some fluctuations," declares the engineer from Ch.tillon. That said, the data provided by the space surveillance system will be available and usable beginning autumn 2005. For Jacques Bouchard, this will be the end of thirteen years work, a good many of which he spent creating the "high dose" software, a time-consuming effort. "It is fairly rare to see the end of this type of project," he acknowledges.

<http://www.onera.fr/photos-en/instexp/graves.php>

GRAVES Space Surveillance System - ONERA's Science Pictures

## GRAVES Space Surveillance System



GRAVES Space Surveillance System: the receiving antennas.

copyright © ONERA 1996-2006

(DPRS)

According to information provided by public databases in the United States, there are over 8,000 man-made objects in orbit around the Earth (excluding American military satellites, which is very confidential information). A number of these spacecraft fly over France every day, providing a potential danger to national security. It is therefore vital that the position of these orbiting objects should be known. ONERA's teams have designed and developed the GRAVES space surveillance system to establish and maintain a database of satellites flying over France at altitudes of less than 1,000 kilometers.

Transmitting antennas emit a continuous low-frequency signal towards a given angular section of space. The receiving site, located nearly 400 kilometers away, houses a large number of omnidirectional antennas. Based on the elementary signals picked up by these antennas, a narrow-lobe beam is produced. The direction of this lobe provides an angular measurement of the object detected, while the frequency shift between the emitted signals and the received signals measures its radial velocity.

Based on this brand-new concept, the GRAVES radar network provides angular and radial velocity measurements. These are fed into the orbital processing algorithms developed by ONERA's researchers to calculate the orbital parameters of the detected satellites.



the four transmitting panels.

copyright © ONERA 1996-2006  
GRAVES Space Surveillance System:

Last Update: October 28, 2003



Graves Transmitter Antenna Elements

## The last decades and the future of low frequency radar concepts in France

Marc LESTURGIE (1), Jean Pierre EGLIZEAUD (1), Gilbert AUFRAY (1)  
Daniel MULLER(2) , Bernard OLIVIER (2), Christian DELHOTE (3)

(1) ONERA, Chemin de la Hunière et des Joncherettes, F-91761 Palaiseau

(2) THALES Air Defence, 7-9 rue des Mathurins, F-92221 BAGNEUX-Cedex

(3) DGA/STTC/DE – 8 Bd Victor 00300 PARIS Armées

[*deletia*]

### 5. The GRAVES radar

In 1990, ONERA started the concept study of a very long range radar dedicated to space surveillance. The mission of this radar is to detect and create a directory of objects at orbits between 200 and 1000km from the earth.

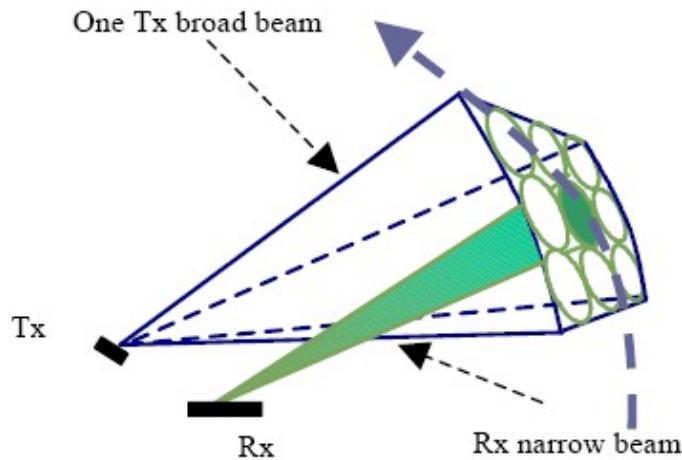


Figure 14: radar bistatic architecture (GRAVES)

#### 5.1 Radar architecture

Radar surveillance is required in a very broad sector in azimuth and elevation. A bistatic architecture was chosen (transmitter site close to Dijon, receiver site close to Apt). Such a bistatic configuration (with nearly 400 km between the emission and the reception) allows transmitting a continuous waveform, very favourable in terms of radar power budget.

The transmitting unit (figure 15) consists of 4 antennas patch arrays. Each array operates with electronically beam steering in a sector of about  $45^\circ$  in azimuth and  $20^\circ$  in elevation. A small number of broad beams is used by the transmitting array.

The reception uses the principle of digital beam forming. With a significant size, the reception antenna allows a precise localisation of the satellites inside the transmitted beam (figure 14). Each receiving antenna (about 100 elements, see figure 17) is connected to its own receiver and ADC unit. Waveform is continuous and not coded (single tone) because range information distance is not essential to localise the satellites on their orbit: as satellites movement is Keplerien, tracking can be performed only from angles and Doppler information. The absence of transmitted bandwidth gave also a significant advantage for the frequency allowance (in primary service) in the VHF band. Because of the high level of radiated power (several Megawatts), frequency allowance had been drastically more difficult for a classical value of radar bandwidth.

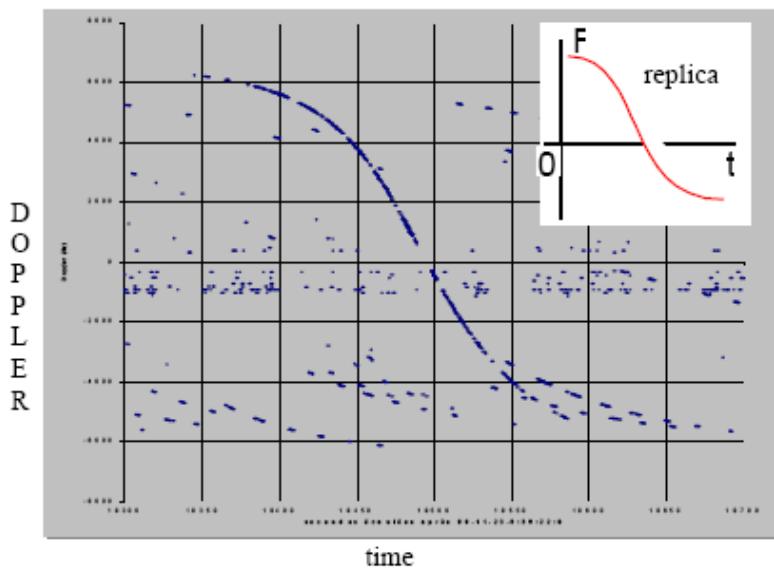


**Figure 15 : transmitting array of patch antennas**

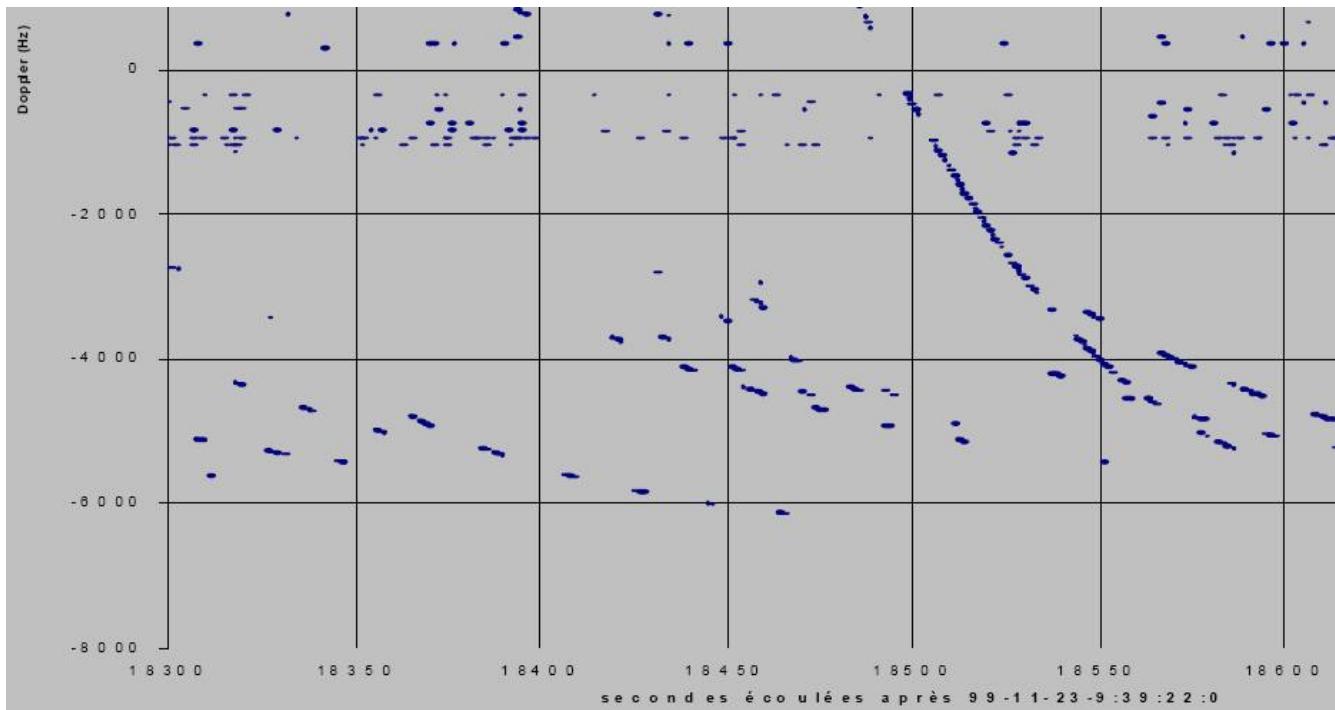
## 5.2 Basement of signal processing

Signal processing consists of digital beam forming, Doppler detection and tracking. Doppler processing is made with regard of a few acceleration cells, because satellites Doppler can change of Doppler cell during the coherent integration time.

When a satellite crosses the radar lobe, received signals presents a Doppler excursion with a S-shape (figure 16). Measurement (even partial) of this characteristic allows computing the satellite orbit, by correlating the signals with a replica matched to the orbit.



**Figure 16 : Doppler analysis of returned signals from satellites**



*[Detail of Fig. 16]*

5.3 Future applications of GRAVES concept Now at the stage of an operational radar, GRAVES has been also an unique demonstrator for a new concept of very long range LF radar, where the originality consists of combining in a bistatic architecture:

- electronic beam scanning in a *wide sector*, (EBS)
- an *high directivity* digital beam forming (DBF) in reception.

EBS allows to process signals during a long time (due to broad beam) and DBF allows to restore the accurate direction of the target. This concept is well matched to operate in low frequencies band (< UHF) for which the signature of the target remains stationary during the integration time. Combination of EBS and DBF techniques in a bistatic configuration allows to reach uncommon range and coverage performances. The concept is interesting for other applications of surveillance at very long range and leads to realisations similar or different from the present radar GRAVES.



**Figure 17 : GRAVES Receiving array**

[deletia]

[http://www.adit.fr/SP/pdf/fst/005\\_US.pdf](http://www.adit.fr/SP/pdf/fst/005_US.pdf)

FranceST n;05 - 16/08/2002

## **Early Warning Tools Unrivaled in Europe**

The Ministry for Defense has allocated 15 million euros to the R&D contract assigning ONERA to make the Graves demonstrator operational before it is transferred to the French Air Force in 2005. The contract also requires ONERA to optimize the performance of the Nostradamus radar system while handling its control from the Palaiseau ONERA center in the Paris region. Ten years of development work went into the Graves and Nostradamus radar systems, which will provide France with detection tools unrivaled elsewhere in Europe. The tools can detect, locate, and identify any potential threat twenty-four hours a day, all year long.

Graves is a new radar design providing a higher field of view in any weather. It will be continually monitoring the space over France starting in 2005. Its mission will be to detect 100% of the satellites flying in a low orbit over France, and to determine their trajectory. The radar will be able to establish a "catalogue" of the objects flying over France's territory in real-time. According to US public databases, more than 8,000 objects are currently orbiting the Earth. Many fly over France daily, representing a potential threat to national security. It is therefore vital that the position of these orbiting objects be known. In 1990, the French Ministry for Defense appointed ONERA to conduct studies with a view to building and updating a database of the satellites flying over France at an altitude lower than 1,000 kilometers. Although the current operational prototype is more limited than the future system, it was able to list more than 2,000 orbiting objects in 1999 during testing.

Nostradamus, the first French over-the-horizon radar, uses low frequency waves whose property is to reflect off the ionized layers of the atmosphere. Accordingly, Nostradamus can detect targets over-the-horizon at more than 2,000 kilometers from the radar. The radar is an early warning tool and long-range monitoring device with two assets over its US and Australian competitors. Its uses the same antennae for transmission and reception, hence simplifying signal processing and location operations since the waves cover the same route going and coming after reflecting off the ionosphere. The Nostradamus antennae array provides 360° coverage and a wave monitored route selection.

***Contacts :***

***ONERA - Pierre Br.gon - Phone: 01.46.73.40.56 - Fax: 01.46.73.41.59 - Email:  
Pierre.Bregon@onera.fr***

<http://www.fas.org/spp/military/program/track/klinkrad.pdf>

## Monitoring Space – Efforts Made by European Countries

H. Klinkrad

ESA/ESOC, Robert-Bosch-Strasse 5, D-64293 Darmstadt, Germany

E-mail: Heiner.Klinkrad@esa.int

*[deletia]*

### 3.2 The GRAVES Experimental Space Surveillance System

The French GRAVES system (Grande R'eseau Adapt'e `a la Veille Spatial) is presently the only European installation outside the US SSN which can perform space surveillance in its classical sense. GRAVES is owned by the French Department of Defense (DoD), and is operated by ONERA. The concept of GRAVES is based on VHF transmitters with planar phased-array antennas of 15 m £ 6 m each, which are located near Dijon (FIG.4). Several of these tilted antennas can ultimately be arranged around a circle to deploy a conical detection fan up to altitudes of 1,000 km (at present there is one South-West facing and one South-East facing transmitter). Objects which pass through the detection volume (composed of individual detection fans) reflect the transmitted power, which is then received by a planar phased array of Yagi antennas located at Apt (FIG.3), 380 km South of the transmitter. The array of receiver antennas is arranged in a circular area of 60 m diameter.

The idea of the GRAVES continuous wave (CW) bi-static radar has its roots in the 1930-ies, when such systems were used as electronic fences for aircraft detection. The GRAVES system was developed during the 1990-ies, and started operational tests in 2001. It determines direction angles (azimuth and elevation), Doppler, and Doppler rates for a large number of simultaneous targets. From these data the processing software determines orbital element sets, of which initial estimates are sufficiently accurate to task other sensors, and to correlate subsequent detections of the same objects. As such, GRAVES produces a "self-starting catalog" which can be autonomously built up and maintained. The detection size threshold up to 1,000 km altitude is on the order of 1 m, and the orbit coverage reaches down to inclinations of » 28±. A 1-month experimental catalog build-up in 2001 produced more than 2,200 entries.



FIG 3: The GRAVES receiver at Apt, France (GRAVES = Grande R'eseau Adapt'e `a la Veille Spatial).



FIG 4: The GRAVES VHF transmitter station at Dijon, France.

[http://www.ueaf.net/actualites/fis\\_207.html](http://www.ueaf.net/actualites/fis_207.html)

**France In Space n° 207 du 17 mai 2002**

**1 : NOSTRADAMUS AND GRAVES**

The French Ministry of Defense granted ONERA (French Office of Air and Space Studies and Research), at the end of April, a 15 million Euro contract to speed up the development of new radar detection techniques. ONERA's task is to optimize the Nostradamus radar system performances and to bring the Graves radar system to an operational stage, the objective being to provide France with a unique detection system in all of Europe by 2005.

Nostradamus sends out waves between 6 and 30 MHz, which bounce against the ionospheric layer, thus traveling thousands of kilometers. The radar also provides an azimuthal coverage of 360 degrees. Graves is a space supervision radar, dedicated to the detection and measurement of low orbit satellite trajectories. Currently undergoing improvements, this radar should be used by the French Air Force in 2004. [L'Usine Nouvelle, 05/15/2002]

---- **France In Space** is a weekly synthesis of French space activities based on French press. Its content does not reflect an official position of the French Government or CNES. It is provided by the CNES office in Washington D.C Editors: Vincent Sabathier, Angele Duffy - Translator: Virginie Thibaud.

France In Space is available online at <http://www.france-science.org/france-in-space> you will find there the current issue, the subscription and un-subscription forms, as well as the archives with a search engine.

Ambassade de France aux Etats-Unis - 4101 Reservoir Road, N.W. - Washington, D.C. 20007-2173 - USA

FRANCE IN SPACE CNES WASHINGTON  
OFFICE FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY  
EMBASSY OF FRANCE  
Tel : +1 202 944 65 79 Fax : +1 202 944 61 38

GRAVES - Un concept nouveau pour la surveillance de l'espace

Author: Michal, T.; Bouchard, J. (ONERA, Chatillon, France);  
Eglizeaud, J. P. (ONERA, Palaiseau, France)

Publication Date: 1994

Report No.: ONERA, TP no. 1994-72

Everybody is now convinced of the importance of data provided by space systems, especially for military applications. Consequently, the number of active satellites is rapidly growing, as well as their capabilities. On the other hand, one must be aware of the threat such space systems pose for conventional military activity. In order to protect these military activities, it is necessary to develop ground-based sensors and systems which allow control [monitoring] of the activity of space systems. The GRAVES radar project, here described, is devoted to this mission. First, the main design parameters of such a radar are analyzed. Then, the technical description and the primary capabilities of the radar are exposed. Finally, the planning of development for a scale model of the radar is presented.

<http://www.amsat.org/amsat/archive/amsat-bb/200410/msg00140.html>

## French GRAVES radar operating frequency

---

- *Subject:* [amsat-bb] French GRAVES radar operating frequency
  - *From:* "Luc Leblanc (VE2DWE)" <[luclebla@xxxxxxxxxxxxxxxx](mailto:luclebla@xxxxxxxxxxxxxxxx)>
  - *Date:* Tue, 12 Oct 2004 12:31:58 -0400
  - *In-reply-to:* <[006501c4b05a\\$8baafa80\\$230110ac@HOMEBECQ7509O8](mailto:006501c4b05a$8baafa80$230110ac@HOMEBECQ7509O8)>
- 

Just read this on hearsat mailing list.

After a quick reading of a very technical paper in short They want to detect LEO satellites in the 500 to 1500KM range. They want to calculate and take measurements to ba able to calculate and correct the doppler effect on the radar waves when they are travelling through the ionosphere. An ionospheric induced doppler?

On 12 Oct 2004 at 7:53, Allen Thomson wrote:

> For about a decade, France has been building GRAVES, a space surveillance  
> radar vaguely similar in concept to the US' NAVSPASUR system. The frequency  
> has been described as "VHF", but details were lacking. There's now a  
> dissertation abstract at

><http://www.onera.fr/formationparlacherche/journeesdestheses/phy2004/pdfs/PaillardonSebastienResume.pdf>

> which says, "Le radar GRAVES est un radar bistatique CW fonctionnant dans la  
> gamme VHF (143 MHz)" which, if my linguistic skills don't fail me, says "The  
> GRAVES radar is a CW bistatic radar functioning in the VHF band (143 MHz)".  
>

> Once the transmitter at Broyes-les-Pesmes is put into full operation in  
> summer 2005, European amateurs will have an opportunity to do things similar  
> to the various amateur uses of NAVSPASUR.

>  
> [http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast06jun\\_1m.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2000/ast06jun_1m.htm)

>  
> <http://web.usna.navy.mil/~bruninga/raft.html>

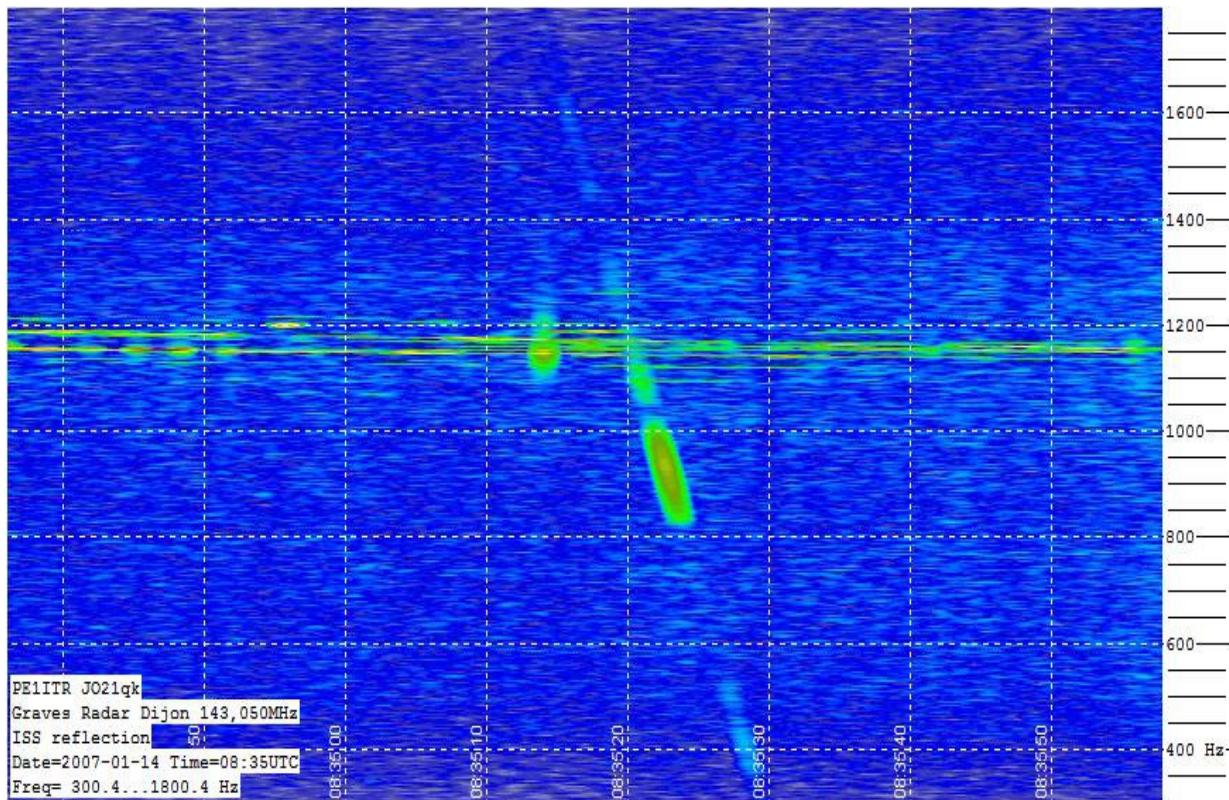
>  
> <http://www.gate.net/~tomk/navspasur/navspasur9.html> ff.  
>

Date: Tue, 16 Jan 2007 21:50:39 +0100 (CET)  
From: "Rob Hardenberg PE1ITR" <rob@itr-datanet.com>  
To: HearSat@mailman.qth.net  
CC:  
Subject: [Hearsat] Graves radar on 143.050MHz

Hi ALL,

After some research it turned out that the freq of the graves radar located near Dijon, France is 143.050MHz.

Its a powerfull transmitter with continues wave carrier. I can receive the radar with my 2meter band rig direct via tropo propagation located 350Km north of the radar. Reflection on satellites are easy to detect. So far received a number of reflection. The strongest are from the ISS. Here is a screenshot:  
<http://www.pe1itr.com/graves/capt0701140741.jpg>

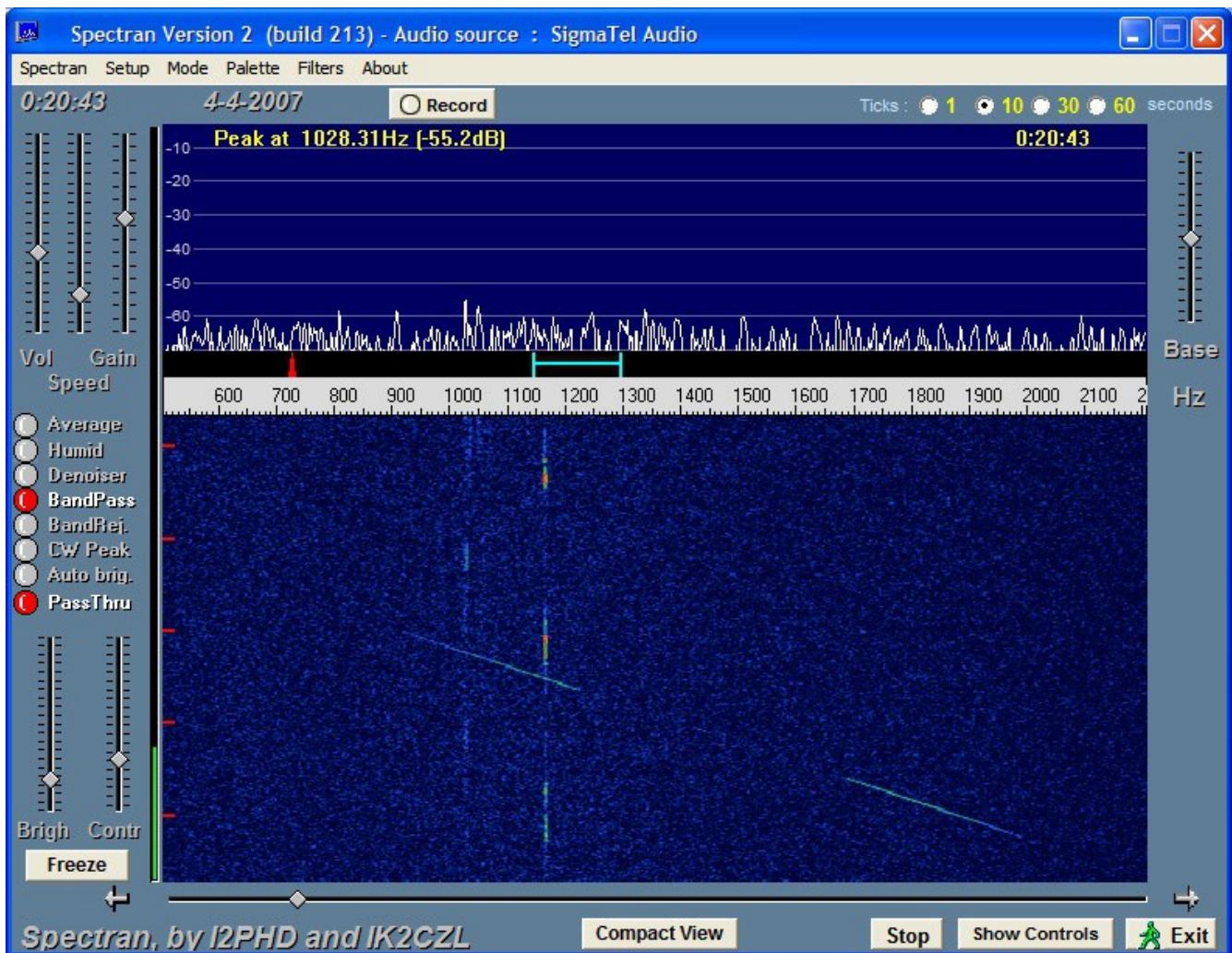


I'am trying to understand when a reflection is happening. So far I can estimate a reflection on a know object within 20~30 seconds but unsuccesfull to determine this exactly. There are 4 antenna beams "sweeping" there sectors. The graves sourcebook gives good info about the radar:  
<http://www.fas.org/spp/military/program/track/graves.pdf>

Maybe some members of this group want to experiment with the radar reflections? Its fun!

73 Rob PE1ITR  
<http://www.pe1itr.com>

<http://www.itr-datanet.com/~pe1itr/graves/graves0047.jpg>

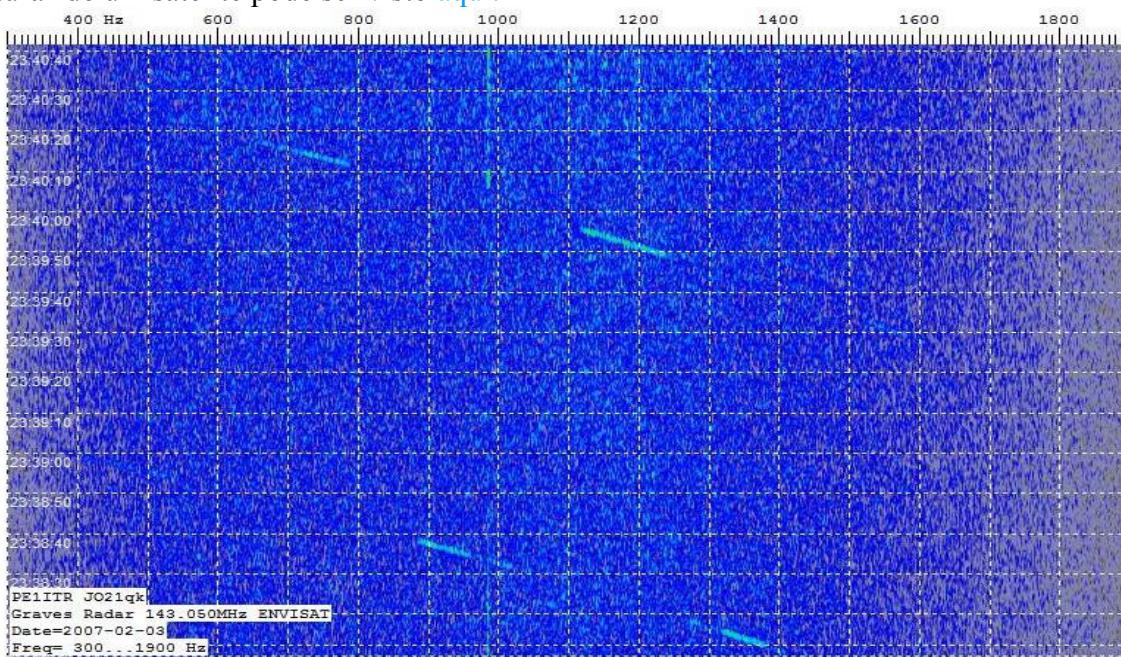


<http://transponderclubedeportugal.blogspot.com/search/label/GRAVES>

Domingo, 4 de Fevereiro de 2007  
Radar GRAVES em VHF

Desenvolvido para a Força Aérea Francesa, o radar espacial GRAVES entrou em operação nos finais de 2006. Este sistema permite monitorizar centenas de satélites LEO (Low Earth Orbiter) tal como os Cubesats e outros objectos espaciais, muitos deles com menos de 10cm em espessura e a altitudes abaixo dos 1000km.

Quatro feixes em VHF varrem uma área de 45 graus que, com medições do efeito doppler, detectam grande parte dos objectos espaciais que passam por cima da Europa. Graças aos esforços de alguns membros da lista Hearsat, determinou-se a frequencia de operação nos 143.050mhz. Um exemplo da "assinatura" de um satélite pode ser visto [aqui](#).



O processo é simples, basta sintonizar um receptor VHF nos 143.050 USB e esperar um pouco. As reflexões dos objectos espaciais traduzem-se em "pings" de menor ou maior duração, dependente do seu tamanho físico. A saída de som do rádio pode ser ligada a um PC e o áudio analizado com um programa tal como o Spectrum Lab.

Passei a manhã a escutar esta frequencia e confirmei, de forma bastante empírica, a passagem do AO51, anunciada momentos mais tarde pelo programa Orbitron.

Créditos para lista Hearsat e PE1ITR  
Postado por CT2IWW em 16:26

<http://home.arcor.de/satellitenwelt/spaceradar.htm#GRAVES>

## **Radar für die Bahnvermessung von Raumflugkörpern**

Seit dem Start von Sputnik-1 im Oktober 1957, gab es ca. 4.700 erfolgreiche Raketenstarts. Mit ihnen brachte man ca. 30.700 von Menschenhand erbaute Objekte in den Weltraum. Von diesen ca. 30.700 katalogisierten Objekten, welche alle größer als 10 Zentimeter im erdnahen Bereich, sowie größer als 1 Meter im geostationären Bereich sind, befinden sich gegenwärtig noch ca. 10.000 Objekte in einer Umlaufbahn um die Erde. Davon sind 7% aktive Satelliten, 22% inaktive Satelliten, 17% ausgebrannte Oberstufen von Trägerraketen, 13% Nutzlast-Fragmente und 41% Trümmer von Explosionen und Kollisionen. Der größte Teil dieser Objekte wird mindestens einmal täglich in ihrer Umlaufbahn vermessen. Bisher verfügten nur die USA und Russland über eigene Weltraum-Überwachungssysteme, welche aus konventionellen und phasengesteuerten Radar-Systemen, sowie optischen Teleskopen besteht.

## **GRAVES**

Seit dem Dezember 2005 verfügte nun auch Frankreich über ein Weltraum-Überwachungssystem mit dem Namen GRAVES (Grand Réseau Adapté à la Veille Spatiale), welches auf der Basis eines bi-statischen Radar-Meßsystems funktioniert. GRAVES besteht aus einer Sendestation in Broyes-les-Pesmes südöstlich der Stadt Dijon und einer Empfangsstation die sich ca. 380 km südlich des Senders und nördlich der Stadt Apt in Revest-du-Bion befindet. Mit GRAVES ist es möglich mehr als ein Viertel aller Objekte in ihren Umlaufbahnen zu beobachten. Die Bahnvermessung finden hauptsächlich von Objekten in tiefen Umlaufbahnen unter 1.000 km statt, wo man Objekte bis zu einer detektierbaren Größe von kleiner als 1 m und einer Bahnneigung ab 45° orten kann. Es soll ständig eine Datenbank von ca. 2.000 Objekten aufrecht erhalten werden, deren Überflüge der Endbenutzer das französische Verteidigungsministerium, als potentielle Bedrohung für das Französische Territorium ansieht. Fast alle Objekte dieser Datenbank werden mindestens zwei mal in 24 Stunden vermessen. Frankreich hat sich ein eigenes Weltraum-Überwachungssystem errichtet, da Bahndaten bestimmter militärischer Satelliten nicht von der USA veröffentlicht werden.

Die Sendestation von GRAVES besteht aus vier 15 x 6 m großen geneigten Phased-Array-Antennen, welche den Himmel von Südwesten bis Südosten bedienen und eine Abdeckung von ca. 240° gewährleisten. Eine Phased-Array-Antenne ist eine Gruppenantenne mit starker Richtwirkung, die eine Bündelung der Strahlungsenergie durch die Anordnung und Verschachtelung von Einzelstrahlern erreicht. Mit diesen Radarsystem ist man in der Lage, simultan gleich mehrere Objekte zu vermessen. Die Phased-Array-Antennen senden kontinuierlich eine frequenzmodulierte Trägerwelle, in bestimmte eckige Bereiche des Himmels, womit man ein sogenanntes bi-statisches Radar bzw. Dauerstrich-Radar erzeugt. Die ca. 380 km entfernte Empfangsstation besteht aus einer kreisförmigen Fläche von 60 m Durchmesser, wo in ihr eine große Anzahl an Omnidirektionale Antennen aufgestellt ist, welche nach dem Prinzip eines Radar-Interferometers arbeiten. Da GRAVES mit einen bi-statischen Radar-Meßsystem arbeitet, muß der Sender zum Empfänger weit genug auseinander entfernt liegen, damit der Empfangsstation keine Bodenwellen und keine Radarechos von Flugzeugen mehr erreichen kann.

## **Praxis der Bahnvermessung:**

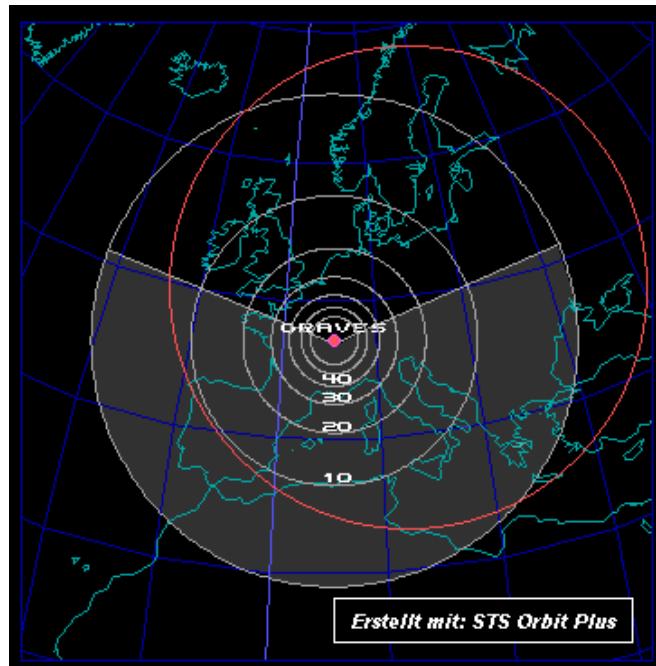
Die Sendestation in der Nähe der Stadt Dijon, sendet kontinuierlich eine frequenzmodulierte Trägerwelle auf 143,050 MHz, mit einer Sendeleistung im Kilowatt Bereich in Richtung Weltraum aus.

Von allen überfliegenden Objekten wird dieses Signal, stärker oder schwächer je nach Radar-Rückstreu-Querschnitt, zurück zum Boden reflektiert. Die Empfangsstation empfängt die zurück geworfenen Radarechos im Einseitenband, wo man die 2 kHz tiefer liegende Trägerfrequenz des Senders, zusammen mit der entstandenen Doppler-Verschiebung auswertet. Diese Methode kann man auch als Radio-Echo-Verfahren bezeichnen. Von den empfangenen Radarechos kann man Aussagen über die Entfernung, die Geschwindigkeit und der Oberfläche des Objektes machen. Mit mehreren hintereinander folgenden Radarechos eines Objektes und der genauen Peilung der Quelle des Signals, kann so eine vollständige Bahnbestimmung durchgeführt werden. Mit diesem ziemlich einfachen Konzept, kann man sehr zuverlässig jedes mögliche Objekt aufspüren und katalogisieren.

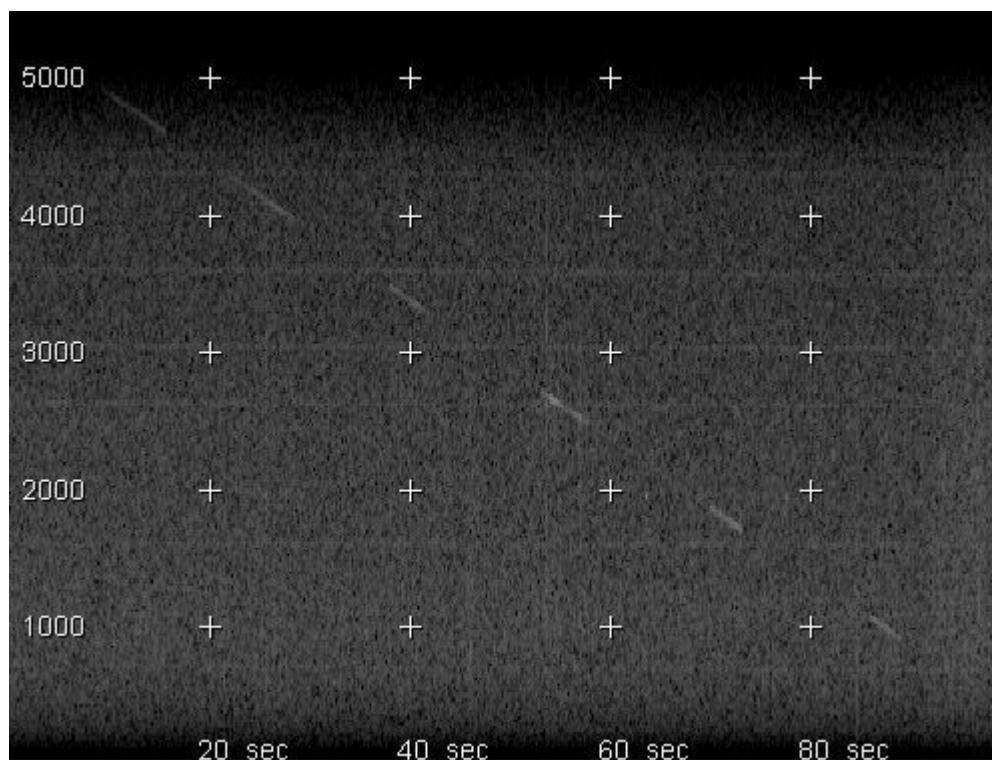
Bezeichnung	Frequenz	Standort
GRAVES	143,050 MHz	Dijon, Frankreich

### Passiver Satellitenempfang:

Die reflektierten Radarechos sind ein quasi passiver Empfang von Satellitensignalen. Objekte mit einen hohen Radar-Rückstreu-Querschnitt, geben teilweise auch ein stärkeres Radarecho zurück, welches man schon mit einer normalen Rundstrahlantenne gut empfangen kann. Hauptsächlich sind dies Oberstufen von Trägerraketen, größere Satelliten und bemannte Raumfahrzeuge wie die ISS oder das Space Shuttle. Der Radar-Rückstreu-Querschnitt ist eine physikalische Eigenschaft von Objekten der angibt, wie groß die rückstrahlende Fläche des Gegenstandes erscheint, wenn er von einer Radarstrahlung erfaßt wird. Die Maßeinheit des Radar-Rückstreu-Querschnittes wird dabei in Quadratmeter angegeben. Eine Übersicht wie hoch der Radar-Rückstreu-Querschnitt bei einen jeweiligen Raumflugkörper ist, findet man im Satellite Situation Report von Space-Track.



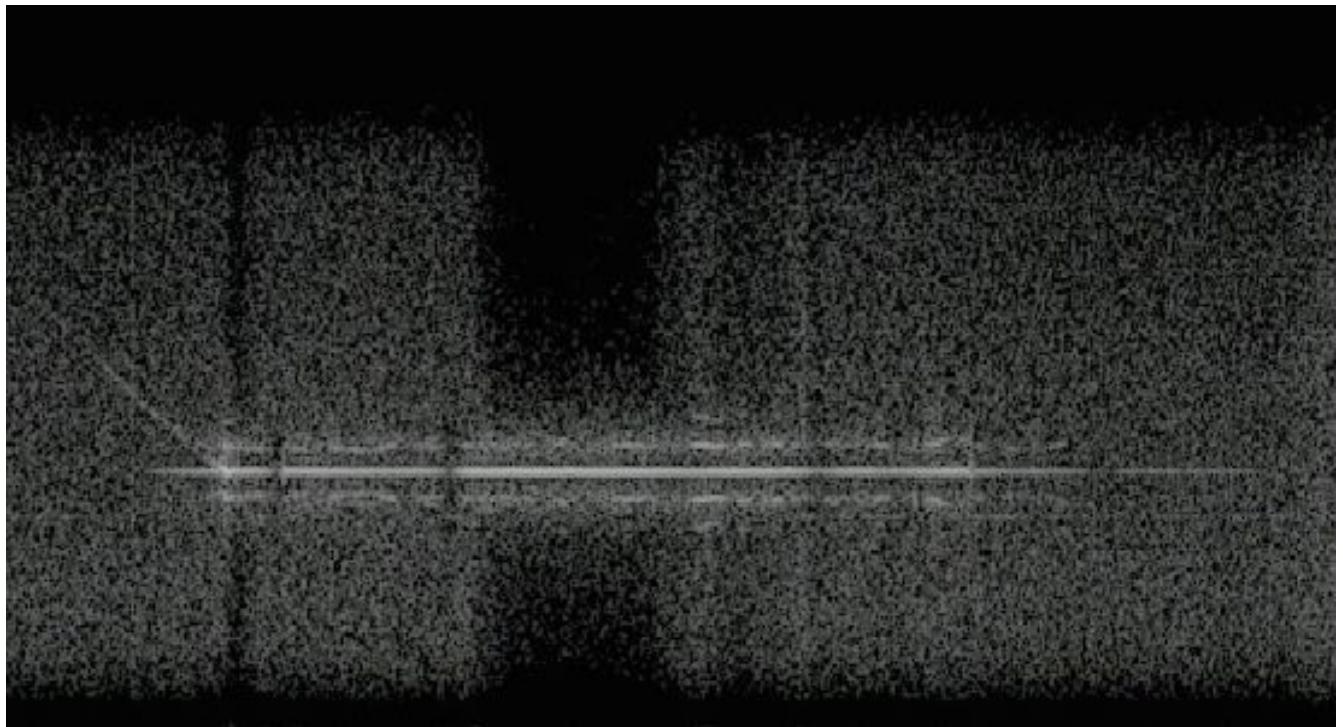
Der Radar-Rückstreu-Querschnitt vom bisher größten Objekt in einer Umlaufbahn um die Erde, der ISS, liegt bei  $386 \text{ m}^2$ . Bei den Überflügen der ISS sind Radarechos nur möglich, wenn sich die ISS auch im Aktionsbereich von der GRAVES Sendestation befindet. Für den Sichtbereich Ost-Deutschland ist das vor allem, bei den ersten Überflügen eines jenen Tages, bis zu einer max. Elevation von ca.  $55^\circ$  möglich. Die nachfolgenden in der Elevation hohen Überflüge der ISS, können dann nicht mehr von GRAVES erfaßt werden. Erst wieder der letzte flache Überflug im Süden unter ca. max.  $25^\circ$  Elevation, wird die ISS wieder von der GRAVES Sendestation getroffen. An dem Radarecho der ISS ist auffällig, daß es eine gestrichelte Spur ergibt, was Radarechos von nicht länger als 10 Sekunden bildet. Dies ist darauf zuführen, daß es sich hier um die aufeinander folgenden eckigen Bereiche der Phased-Array-Antenne handeln muß. Radarechos können immer nur von Objekten empfangen werden, die zu dem Zeitpunkt auch Funksicht zum Radar haben. Theoretisch könnte man auch Radarechos von Flugzeugen empfangen, was aber bei der niedrige Flughöhe und der größeren Entfernung der Flugzeuge zu Deutschland somit nicht möglich ist. Auf der Ansicht rechts, kann man den Aktionsbereich bei einer Flughöhe von ca. 400 km der GRAVES Sendestation sehen. Die grau unterlegte Fläche ist nach meiner Beobachtung in etwa der Bereich, wo es zu Reflexionen von Objekten kommen kann. Der rote Kreis ist der Sichtbereich von Ost-Deutschland. Wie man sehen kann, ist es nicht gerade ein großer Bereich, wo ein passiver Satellitenempfang überhaupt möglich ist. Im Januar 2007 veröffentlichte Rob Hardenberg, PE1ITR in der HearSat Mailing List, daß er die genutzte Frequenz von GRAVES gefunden hatte. Erst durch diese Information ist diese Seite überhaupt möglich geworden.



FFT-Analyse (Langzeit) Radarecho der ISS am 02.02.2007  
ab 23:53 Uhr MEZ mit einer Doppler-Verschiebung von 70 Hz/s.

## **Echos von Meteore**

Nach dem Prinzip des Radio-Echo-Verfahrens, wie es auch bei dem bi-statischen Radar-Meßsystem GRAVES verwendet wird, ist es auch gegebenenfalls möglich nahe Planeten, den Mond und auch Meteore zu beobachten. Wenn ein Meteor in die dichteren Schichten der Erdatmosphäre, mit einer Geschwindigkeit von 10-70 km/s und in einer Höhe zwischen 80-120 km eindringt, entzündet er sich durch die Reibungswärme, bis er brennend vollkommen verdampft und eine Spur ionisierten Gases erzeugt wird. Diese dann auch sichtbare sehr schnell über den Nachthimmel ziehende Lichtspur, bezeichnet man volkstümlicherweise als Sternschnuppe. Pro Jahr verglühen ca. 40.000 Tonnen Meteore in der Atmosphäre der Erde. Der Meteor selbst und die hinterlassene Spur von ionisierten Gas, kann Radiowellen reflektieren. Die Reflexionsdauer an den verdampfenden Teilchen, kann von mehreren Sekunden bis zu über 2 Minuten anhalten. Die Funkamateure haben aus dieser Möglichkeit eine Betriebsart entwickelt, welche man Meteorscatter nennt. Ein Meteor der sich mit einer hohen Geschwindigkeit durch die Erdatmosphäre bewegt, durchführt seine Doppler-Verschiebung in sehr kurzer Zeit. Wenn er in die tiefer liegenden dichteren Schichten der Erdatmosphäre gelangt und sich entzündet, wir der Meteor plötzlich sehr schnell verlangsamt.

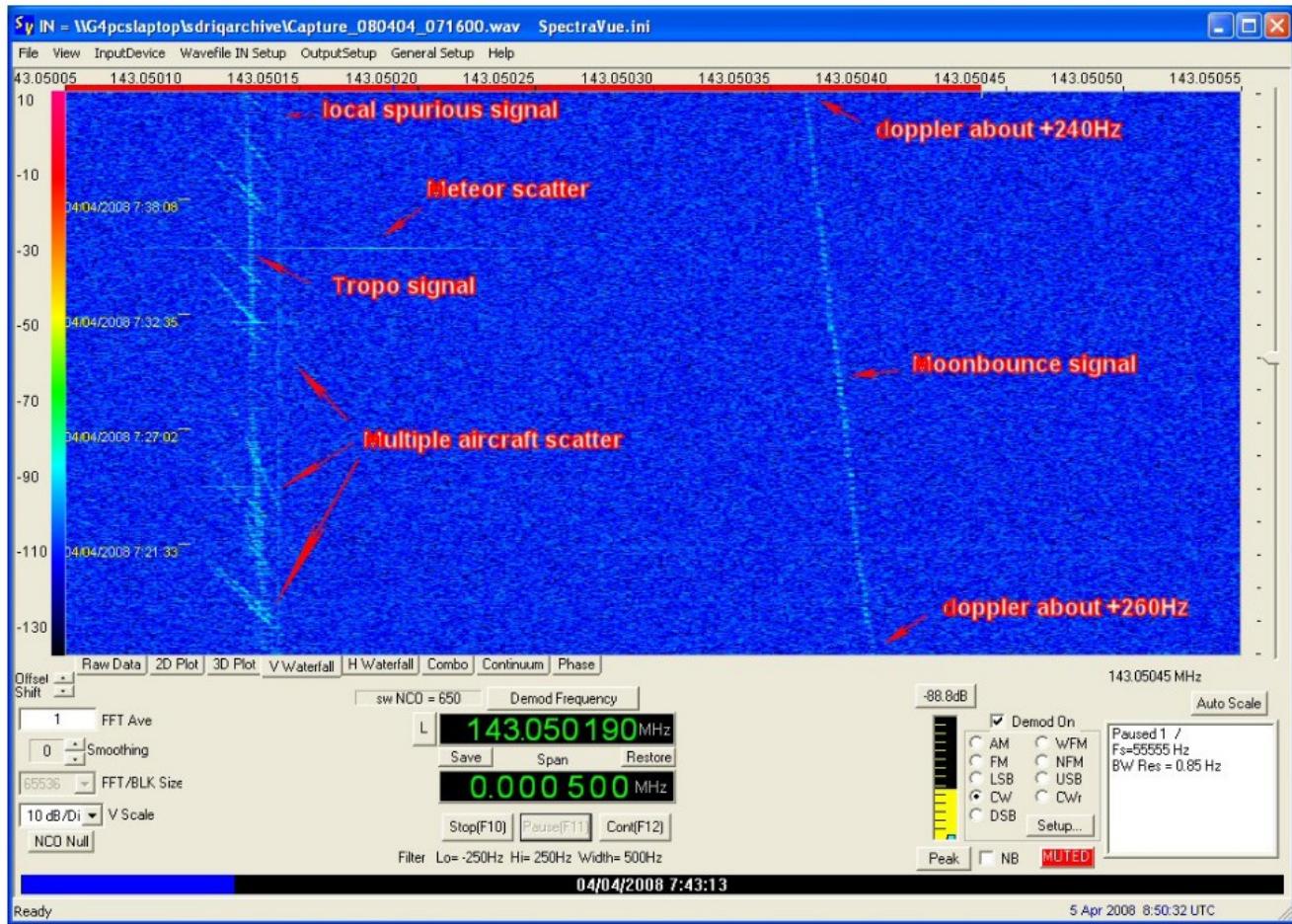


FFT-Analyse (Echtzeit) Radarecho eines Meteors am 18.01.2007 um 11:43 Uhr MEZ

<http://www.pocketrainbow.co.uk/gallery2/v/G4PCS/misc/Graves.jpg.html>

Signal from Graves radar

Signal from Graves radar (JN27si, 143.050MHz), received in IO91ww (650km) on a 4el dz7zb antenna fixed at 100° azimuth and 10° elevation. My receive system noise figure is about 2dB, with an indicated frequency offset of +130Hz (the local oscillator also drifts slightly). 500Hz of spectrum is displayed horizontally with a resolution bandwidth of 0.85Hz, over a vertical time period of nearly 30 minutes starting from 04/04/08 07:16:00 UTC at the bottom of the screen.

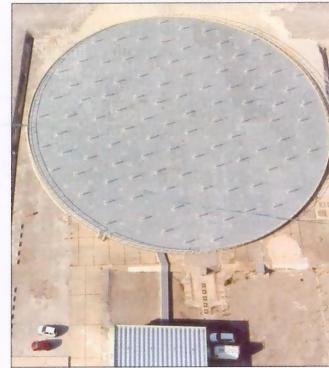


# Radar VHF et émission d'amateur

Par Denis AUQUEBON, F6CRP



1 - La station d'émission de GRAVES est composée de 4 groupements d'antennes patch.



2 - Vue aérienne de la station de réception.

**F**in 2005, la presse scientifique et la presse spécialisée dans le domaine de la défense titraient : "GRAVES est opérationnel". Suivait une description sommaire de ce nouveau radar situé en Bourgogne ainsi qu'un aperçu des premiers résultats très encourageants obtenus lors des campagnes de validation.

Quel rapport peut-il y avoir entre un radar, manifestement destiné aux militaires et à la Défense Nationale, et les radioamateurs ? C'est ce que nous allons examiner au fil de cet article...

## LE RADAR GRAVES

GRAVES est l'acronyme de Grand Réseau Adapté à VEille Spatiale. Il s'agit d'un radar conçu et développé par l'ONERA<sup>1</sup> visant à assurer la détection de satellites orbitant au-dessus du territoire national, dans une tranche d'altitude comprise en 400 et 1 000 km. Les résultats des mesures sont utilisés en outre pour élaborer un catalogue des objets détectés accompagné d'une description précise de leurs orbites. Si les Américains et les Russes disposent de tels outils, rien d'équivalent n'existe jusqu'alors en Europe. D'après les premiers résultats fournis par le radar, il semble que ce dernier ne soit pas superflu puisqu'un

Généralement les auteurs d'articles essayent de trouver un titre qui soit suffisamment évocateur pour que le lecteur comprenne immédiatement de quel sujet il va être traité et raisonnablement accrocheur pour susciter l'intérêt. Je ne suis pas certain d'y être parvenu et pourtant le sujet est vraiment passionnant et nous ouvre un terrain d'étude abondant.

certain nombre d'objets, non répertoriés par le NORAD<sup>2</sup> et ce manifestement d'une manière volontaire, ont été détectés lors de leur survol de la France.

Il s'agit d'un radar à émission continue, sur 143,050 MHz, il est dit "bi-statique" puisque le lieu d'émission est éloigné du lieu de réception (contrainte liée à la permanence de l'émission). Les émetteurs sont situés à Broyes-les-Pesnes tandis que les récepteurs sont

[1] Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales  
[2] North American Aerospace Defense Command



3 - Vue partielle des antennes de réception.

positionnés sur le célèbre plateau d'Albion, précisément à Revest-du-Bion. Les passionnés d'imagerie pourront observer les sites avec les outils du web en se positionnant aux coordonnées suivantes : Récepteurs : 44,0706 N - 5,5347 E (JN24SB)  
Émetteurs : 47,3477 N - 5,5136 E (JN27SI)

Le principe de mesure fait appel, entre autres, à l'effet Doppler. Le signal sur 143,050 MHz balaye, grâce à un jeu d'antennes et d'émetteurs, un gisement de 180° entre l'est et l'ouest en passant par le sud. Ce balayage est obtenu par quatre panneaux d'antennes patch, chacune couvrant un secteur de 45°. Ces 45° sont balayés en approximativement 20 secondes par un faisceau

de 8° d'ouverture en azimut et 20° d'ouverture en élévation. Il y a donc quatre zones éclairées en permanence (figure 5).



4 - Détail d'un des groupements d'antennes de réception.

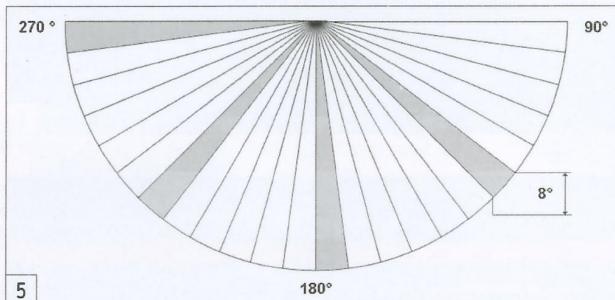
Tout mobile traversant une zone couverte renverra une partie de l'énergie émise, la mesure du Doppler permettra de tirer des informations de vitesse de défilement et corrélativement d'altitude tandis qu'un phasage des antennes de réception et du calcul temps réel permettront d'obtenir des informations de trajectoire.

La réception est élaborée à partir d'un réseau de 100 antennes, chacune alimentant un récepteur indépendant. Chaque signal est numérisé pour être ensuite traité. Un système de phasage/déphasage des signaux permet d'obtenir virtuellement un lobe de réception très étroit. Entre l'étude, le prototypage, l'élaboration d'un démonstrateur et l'industrialisation, treize années se sont écoulées. Dans le peu de documentation que l'on peut se procurer sur ce projet, il apparaît que de

143,050 MHz ne devrait pas être problématique.

Avant de passer en revue les quelques expériences que nous pouvons mener, il convient de s'intéresser aux outils, disponibles gratuitement sur le web, qui nous seront indispensables.

Nous avons besoin d'un analyseur de spectre BF doté d'une fonction spectrogramme. De nombreux amateurs ont travaillé le sujet et nous n'avons que l'embarras du choix. Par ailleurs, un logiciel de prévision de passage de satellites (naturels ou artificiels) complétera l'équipement logiciel. Notons qu'il convient, pour faire fonctionner ces programmes, de disposer d'un ordinateur muni d'une carte son et d'une interface BF. À titre indicatif vous pourrez télécharger aux adresses suivantes les plus connus :



nombreux choix technologiques ont été effectués en fonction de la disponibilité sur le marché d'éléments existants à coût réduit.

## GRAVES ET LES RADIOAMATEURS, QUELQUES EXPÉRIMENTATIONS

Avec ce radar, nous disposons, sur une fréquence très proche du 144 MHz, d'une balise extrêmement puissante. La réduction des performances des installations sur 2 m, liée à la différence de fréquence, qu'il s'agisse des récepteurs, préamplificateurs et antennes est dérisoire. Par ailleurs, bien que la fréquence de ce radar ne soit pas dans les bandes amateur, la couverture des appareils depuis quelques années permet de larges débordements, l'écoute du

## ESTIMATION DE L'ACTIVITÉ MÉTÉORITIQUE

Cette puissante émission, balayant une large zone de ciel nous permet d'évaluer à tout instant l'activité météoritique. Ceux qui trafiquent en meteor scatter le savent, les rentrées atmosphériques sont nombreuses. Calez la fréquence sur 143,050 MHz, connectez l'interface à votre récepteur et votre ordinateur, lancez le programme d'analyse. Vous allez être surpris du nombre de réflexions que vous allez comptabiliser.

Sur la figure 6, vous pouvez observer une capture d'écran réalisée pendant le passage des Perséides le 13/08/2007. Notez la longueur de la réflexion qui a duré plus d'une minute. Avec la procédure adaptée et un opérateur efficace, en MS, sur une telle durée, on peut faire plusieurs QSO en phonie. La réflexion qui s'est produite à 00h45 est beaucoup plus courte mais est très facilement exploitable en FSK441 ou CW rapide dans une moindre mesure. Les traits horizontaux sont des réflexions courtes marquées d'un effet Doppler important.

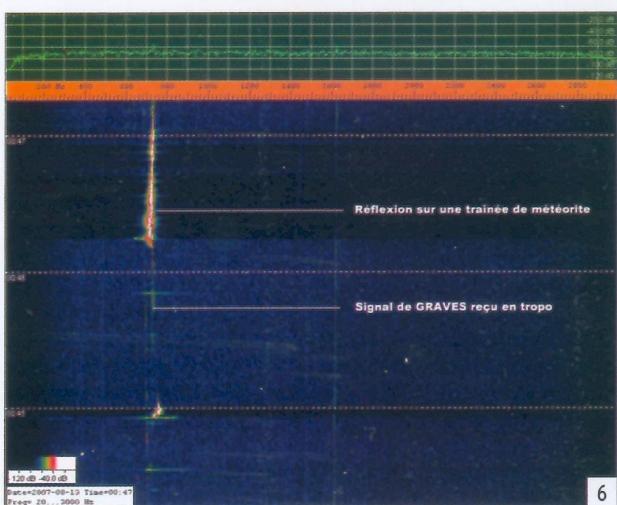
## DÉTECTION DE SATELLITES

C'est ici que nous allons avoir besoin d'un logiciel de prévision de passage. Nous savons depuis que nous nous intéressons à la radioélectricité que si l'émetteur et le récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, il apparaît un décalage de fréquence. Si l'émetteur et le récepteur se rapprochent, la fréquence tend à augmenter, inversement, s'ils s'éloignent, la fréquence tend à diminuer. Cet effet a été mis en évidence par Christian Doppler en 1842 et Hippolyte Fizeau en 1848. Il est fréquemment fait appel à lui pour tout ce qui touche aux mesures de vitesse comme vous avez peut-être déjà eu l'occasion de l'expérimenter... sur la route.

Concernant les objets en orbite autour de la Terre, l'effet Doppler s'applique et c'est même grâce à lui que nous allons pouvoir identifier avec certitude un satellite. Pour commencer et ainsi mettre toutes les chances de notre côté, nous allons écouter un objet volumineux, ISS en l'occurrence, qui va provoquer un écho facilement écoutable avec une installation standard. L'installation standard sur 2 m correspondant à une antenne en polarisation horizontale, d'au moins 3 m de long et d'un récepteur pourvu de la détection SSB, le tout relié par une longueur de câble de qualité raisonnable.

La procédure est simple, il faut choisir un passage d'ISS qui soit éclairé par le radar comme l'indique la figure 7, pointer l'antenne dans la direction du satellite (le pointage n'est pas très critique) et être vigilant.

Vous allez détecter le passage de la station orbitale par l'effet Doppler très notable que vous allez entendre d'une part et visualiser d'autre part.



**La figure 8** témoigne d'une réception d'un écho d'ISS le 13/08/2007 à 22h42 TU. Comme GRAVES est un radar à balayage, la station orbitale ne sera pas éclairée tout au long de son passage, spécificité que vous pouvez observer sur le spectrogramme.

Une fois que vous maîtriserez cette procédure, vous pourrez vous consacrer à la détection d'objets en orbite plus petits ayant une Surface Equivalente Radar (SER) moins importante.

#### RÉFLEXION DES SIGNAUX DE GRAVES PAR LA LUNE - (EME)

Nous ne disposons pas d'information sur la puissance et le gain des antennes de l'installation d'émission. On peut toutefois imaginer que la PAR résultante ne doit pas être négligeable. Il doit donc être possible, quand GRAVES illumine la Lune, d'écouter ses échos. De surcroît les échos doivent être facilement identifiables car, comme déjà évoqué, GRAVES balaye le ciel par secteur. On doit donc recevoir des signaux non pas continus mais intermittents.

Pour commencer, il faut trouver, grâce à un programme de prédition, la position de la Lune (voir figure 9).

Pour que l'expérience fournit des résultats positifs, il faut que la Lune soit éclairée par le radar, que l'angle d'incidence de l'écho soit plus ou moins compatible avec ceux de vos lobes de réception, en d'autres termes que la Lune ne soit pas trop haute sur l'horizon, et que le Soleil ne masque pas, par son bruit, le signal. Il va sans dire que ceux qui disposent de la capacité de régler en site leurs antennes auront des temps de poursuite et des signaux très largement supérieurs. D'après mon expérience, on reçoit encore correctement des échos,

sans élévation, quand la Lune est à 20° au-dessus de l'horizon avec une antenne de 5 m de long (9 él. DK7ZB).

Si vous recevez le radar en propagation troposphérique, ce qui doit être possible pour une grande partie du territoire, vous constaterez que les échos sont soit au-dessus de la fréquence, soit au-dessous, ceci en fonction des mouvements mutuels de la Terre et de la Lune. Par ailleurs, vous constaterez que le signal reçu est bien intermittent, comme l'indique la figure 10.

Bien que ce ne soit pas de prime abord extrêmement spectaculaire, il faut bien se représenter que le signal a parcouru une distance comprise entre 800 000 km. C'est un beau DX si le critère d'appréciation est la distance.

#### EN CONCLUSION

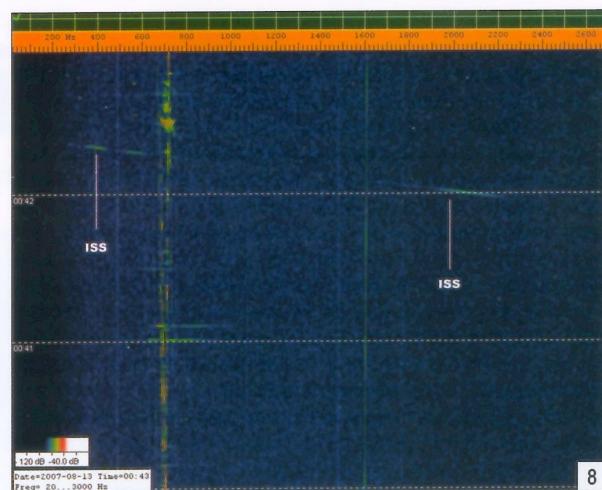
Grâce à cet émetteur puissant situé dans une gamme de fréquence proche du 144 MHz, nous pouvons, et ce de manière permanente et continue, nous livrer à quelques expérimentations intéressantes. Il y a certainement d'autres applications que celles décrites ci-dessus à mener et assurément tout aussi passionnantes. Certains pourront aussi recevoir pour la première fois des signaux réfléchis par la Lune ce qui représentait, il y a encore quelques années, un véritable challenge technique nécessitant la mise en œuvre de moyens importants.

Nous ne disposons pas malheureusement d'informations sur la puissance du ou des émetteurs ainsi que du gain des antennes. Bien que la vraie richesse de GRAVES se situe bien plus probablement dans son logiciel que dans son matériel, ces données, ne sont pas, à notre connaissance, publiées.

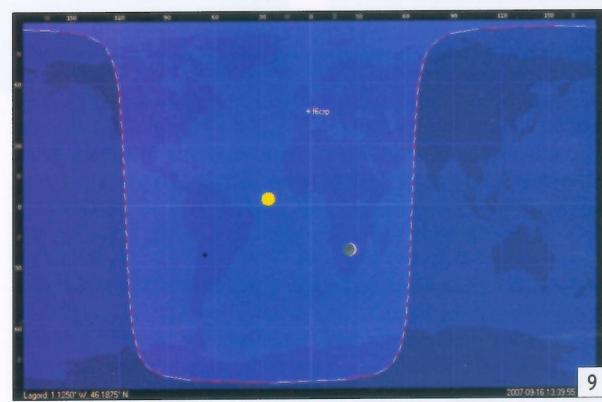
Il n'en demeure pas moins qu'il est plaisant pour l'esprit d'utiliser à des fins "amateur", un dispositif conçu et exploité pour la Défense Nationale. Bonnes expérimentations !



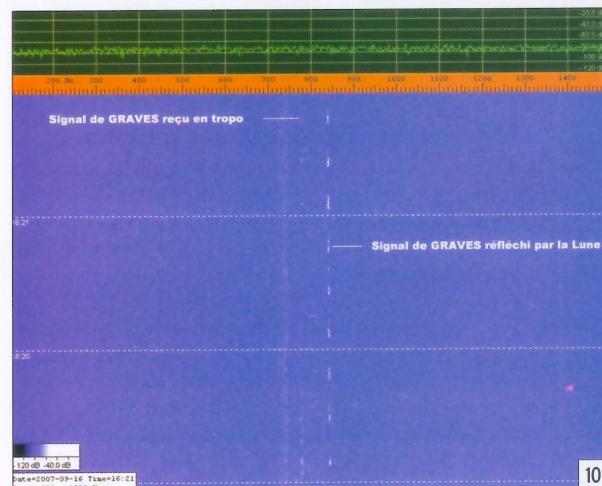
7



8



9



10

#### BIBLIOGRAPHIE

- Site de l'ONERA <http://www.onera.fr/vo-programme/2005-07.php>
- Federation of American Scientists - The GRAVES sourcebook <http://www.fas.org/spp/military/program/track/graves.pdf>

NB : les captures d'écran utilisées pour cet article provien-

ment, pour ce qui concerne les spectrogrammes, de Spectrum Lab et pour les prévisions de passages de satellites d'Orbitron.

Les photos de l'installation GRAVES publiées dans cet article l'ont été avec l'autorisation des différents acteurs du projet, à savoir l'ONERA et la DGA. Qu'ils en soient ici vivement remerciés. ♦

[http://list-serv.davidv.net/pipermail/moon-net\\_list-serv.davidv.net/2007-April/008957.html](http://list-serv.davidv.net/pipermail/moon-net_list-serv.davidv.net/2007-April/008957.html)

[Moon-net] [Fwd: Moonbounce Beacon 143.050MHz]

Rob Hardenberg PE1ITR rob at itr-datanet.com

Mon Apr 2 16:15:54 CDT 2007

>This may be of interest of european radio amateurs to test your 2 meter receiver.

Oeps, I made a mistake. The moon is at greater distance. Not only europeen amateurs but every radio amateur who can see the moon can receive the radar. I mainly use the radar to track low orbiting satellites and than its true.

73 Rob

*[Previous message:]*

Hello Moonbouncers,

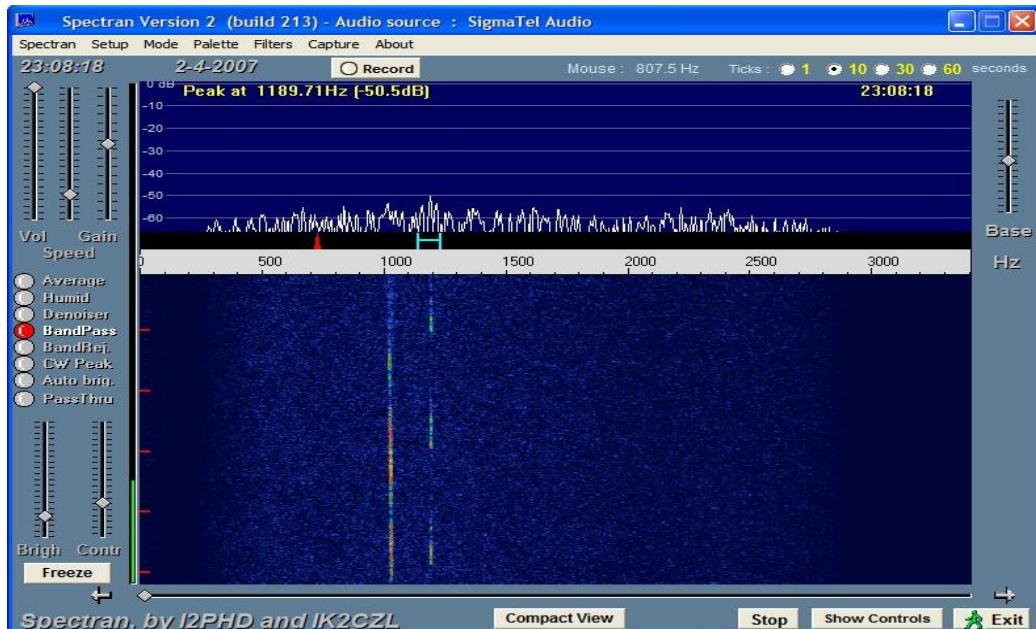
This may be of interest of european radio amateurs to test your 2 meter receiver. Today I tried to receive the graves radar on 143.050MHz via moonreflection. Signals where very strong!!!

The moon must be south of Dijon, France around 20 degrees elevation. This is the location of the radar. Every 19,2 second you will receive a cw carrier of 3.2 seconds.

Here is an example. The direct signal is at 1000Hz. The moonreflection is because of doppler about 180Hz higher.

<http://www.pe1itr.com/graves/graves0021.jpg>

Good luck with this moonbounce beacon!



# Graves

**GRAVES** (Grand réseau adapté à la veille spatiale) est un capteur automatique de veille satellitaire mis en œuvre par le CASSIC et mis pour emploi auprès du CDAOA. Il constitue le premier maillon d'une capacité de surveillance de l'espace (positionnement et activité des satellites) depuis le sol.

Le système est destiné à fournir des données orbitographiques jusqu'alors obtenues par Internet et à gérer un catalogue regroupant les satellites évoluant à une altitude comprise entre 400 et 1 000 km et une inclinaison allant de 35 à 145°. Il devra donner en moins de 48 heures les informations d'alerte relatives aux nouveaux objets ainsi qu'aux changements d'orbite.

**GRAVES** repose sur un dispositif à quatre niveaux:

- Un centre émission (Broyes-les-Pesmes)
- Un centre réception (Revest-du-Bion)
- Un centre de traitement des informations (CCOA)
- Les ESIC (Orange, Dijon, Taverny) chargés de la mise en œuvre

Le système compte de nombreux points forts. Tout d'abord, le volume de détection comprend la majorité des satellites d'écoute et d'observation. Ensuite, c'est un capteur indépendant et unique en Europe qui nous confère une avance par rapport à nos partenaires. Enfin, la technologie qu'il met en œuvre est maîtrisée.

**Points faibles:** la détection doit s'accompagner d'une identification qui ne pourra se faire qu'avec le catalogue NASA dans un premier temps. La synchronisation des sites dépend du signal GPS. Pas d'adaptabilité possible pour la défense antimissile (il faut plusieurs passages pour générer une piste).

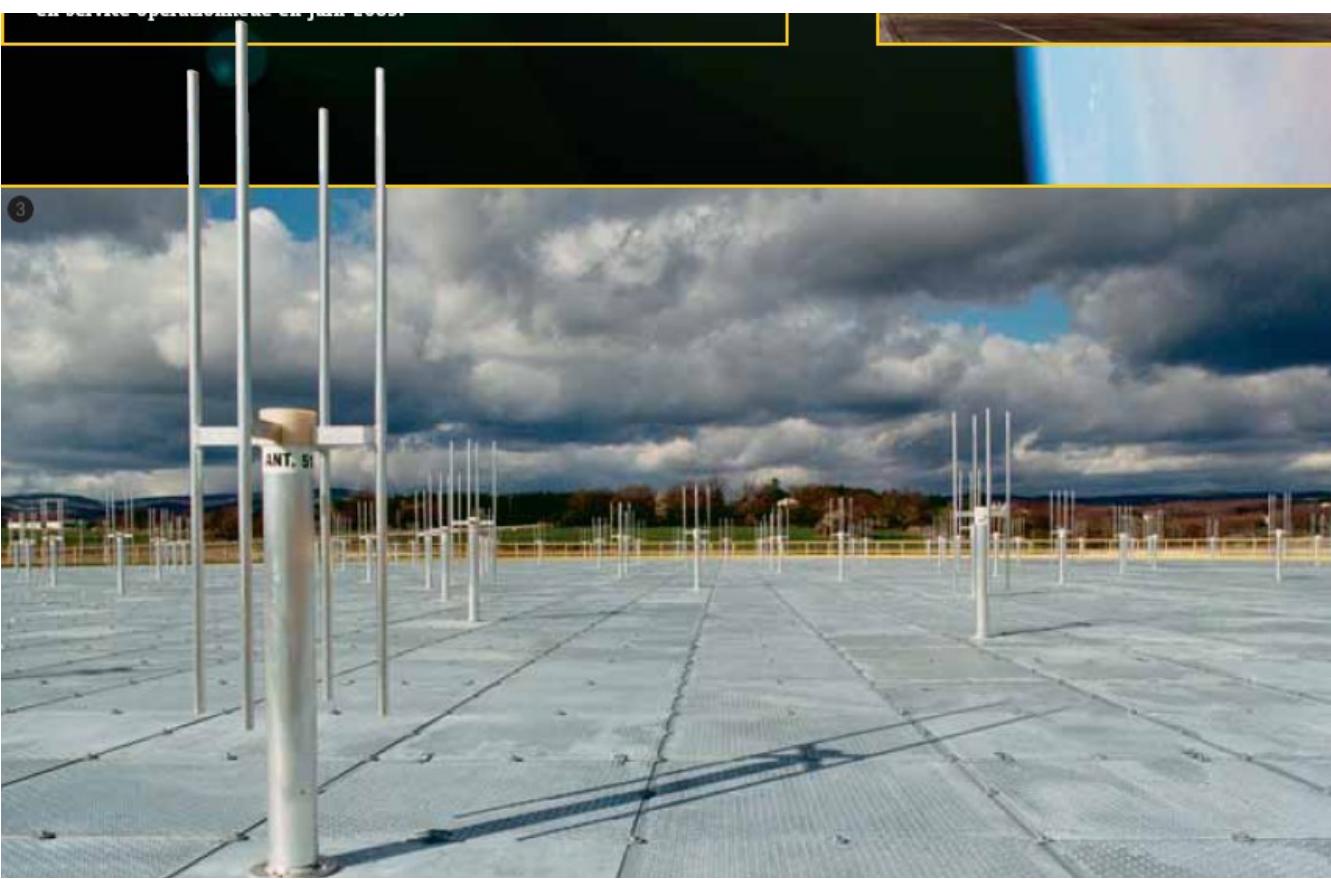
**Calendrier:**

- 1992: Réalisation des premières études
- Fin 1999: Expérimentation d'un système à deux panneaux, choix et décisions de l'armée de l'air
- 2002: Notification du marché
- 2004: Les premiers essais devraient être menés pour une mise en service opérationnelle en juin 2005.



1 et 2 Centre d'émission de Broyes-les-Pesmes

3 Centre de réception de Revest-du-Bion



<http://www.onera.fr/dprs/graves/>

## Graves

### Le système français de surveillance de l'espace

Plus de 9000 satellites ou objets dont la taille est supérieure à dix centimètres orbitent autour de la Terre selon le catalogue américain chargé de les répertorier. Parmi ceux-ci, nombreux sont ceux qui survolent la France quotidiennement, constituant ainsi une menace potentielle pour le territoire. Or seuls Américains et Russes disposaient jusqu'à présent d'un système de veille spatiale opérationnel. Dans ce contexte, l'Onera a proposé dès le début des années 1990 de concevoir un système indépendant baptisé Graves permettant de surveiller les satellites en orbite « basse » (d'altitude inférieure à 1000 km).

Développé sous contrat de la Délégation Générale pour l'Armement, le système Graves est constitué d'un radar spécifique associé à un système de traitement automatisé qui permet la création et le maintien à jour d'une base de données des paramètres orbitaux des satellites qu'il détecte.

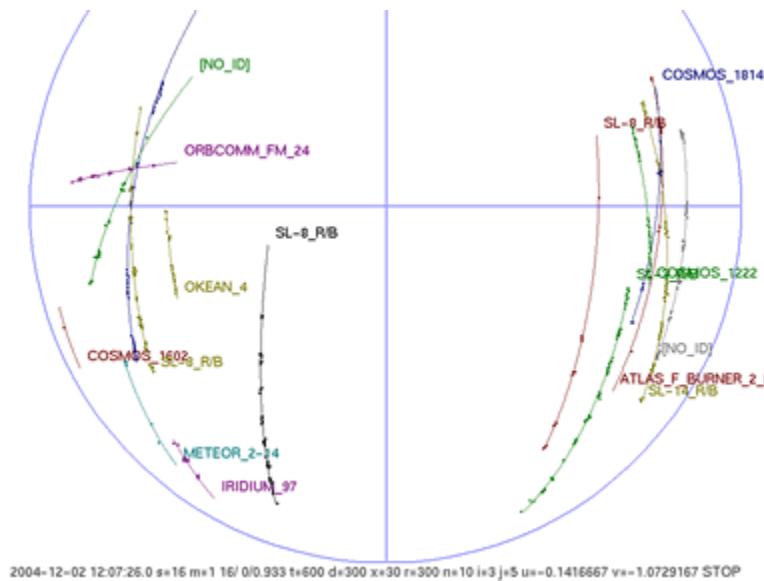
Fruit de la collaboration des spécialistes des départements Electromagnétisme et radar (DEMR) et Prospective et synthèse (DPRS), le radar du système Graves a été spécifiquement conçu pour la surveillance de l'espace. L'objectif prioritaire fut de concevoir un système peu coûteux tant en terme de développement que de maintenance. Cette approche a conduit à un concept original de radar bistatique à balayage électronique et émission continue en bande VHF. Le système de réception est basé sur la détection Doppler et met en œuvre une technique innovante de formation de faisceaux par le calcul. Utilisant des sous-ensembles de technologie très classique qui lui confèrent fiabilité et maintenabilité, la performance de ce radar repose sur un traitement de signal évolué qui requiert toute la puissance d'un calculateur temps réel dédié.



Vue du site d'émission du radar Graves

En aval du radar, un effort très important a été consacré au développement des logiciels qui assurent la conversion des mesures brutes en une base de données de paramètres orbitaux. Cette tâche représentait un challenge technique très ambitieux car contrairement au système américain qui utilise de nombreux capteurs répartis autour du globe, les outils développés pour le système Graves ne traitent que des mesures issues d'un seul capteur.

**Aboutissement de 15 ans de travaux, le système Graves a été livré à son utilisateur final, l'armée de l'Air, en décembre 2005. Opérationnel depuis cette date, il permet de maintenir à jour une base de données de l'ordre de 2000 satellites. Pour plusieurs dizaines de ces satellites, jugés sensibles, les Etats-Unis ne diffusent pas d'éléments orbitaux correspondants.**



**Vue des pistes de satellites identifiées par les traitements orbitaux**

<http://www.onera.fr/vo-programme/2005-07.php>

Graves : "bon pour le service" dès l'automne - VisionONERA

### **Graves: "bon pour le service" dès l'automne**

En décembre 2004, durant onze jours, s'est déroulée la première campagne d'essai de fonctionnement du système final Graves (Grand Réseau Adapté à la Veille Spatiale), le système de veille spatiale conçu et développé par les équipes de l'Onera pour le compte de la Délégation Générale pour l'Armement (DGA). Pour Jacques Bouchard, ingénieur de recherche au sein du Département Prospective et Synthèse (DPRS), mais surtout concepteur et développeur des logiciels orbitographiques de ce système, il s'agissait de vérifier la capacité de ces outils à établir un catalogue d'éléments orbitaux à partir du traitement des mesures angulaires et de vitesse radiale collectées par le radar. Durant l'été 2005, une seconde campagne, d'une durée plus longue, sera réalisée avant que ce système orbitographique soit livré à l'armée de l'air au cours de l'automne. Retour sur une aventure à laquelle Jacques Bouchard a consacré treize années.



Le site d'émission de Graves, près de Dijon

9000 satellites ou objets dont la taille est supérieure à dix centimètres orbitent autour de la Terre selon le catalogue américain chargé de les répertorier. Cependant, il est probable que des objets en orbite élevée ne peuvent être catalogués même si leur taille excède dix centimètres. Parmi ces 9000 satellites ou objets, nombreux sont ceux qui survolent la France quotidiennement, constituant ainsi une menace potentielle pour la défense du territoire. Les Américains disposent à ce jour d'un véritable système de veille spatial opérationnel. Composé de deux récepteurs très éloignés, la distance qui les sépare étant proche de la longueur du continent américain, ce dispositif dessine une sorte de grand rideau vertical. Dès qu'un satellite franchit ce rideau, il est pris en chasse par un radar de poursuite. Il existe également un système de veille spatiale russe sur lequel cependant peu d'informations sont disponibles. Dans ce contexte, l'Onera a proposé dès le début des années 1990 de concevoir un radar baptisé Graves permettant de surveiller notamment les satellites susceptibles d'observer le territoire français



Détails des antennes de réception

### Le suivi de plus d'un quart des satellites

Constitué de deux sous-systèmes autonomes, un radar qui produit des mesures et un calculateur orbitographique qui les transforme en un catalogue d'éléments orbitaux, le système proposé adopte un certain nombre de compromis. Ainsi Graves est basé en France métropolitaine, avec un site d'émission situé dans l'est de la France et un site de réception, au sud-est, sur le Plateau d'Albion, distant de 400 km, ce qui limite sa capacité de détection vis-à-vis d'orbites très peu inclinées sur l'équateur mais néanmoins peu nombreuses. Conçu pour observer jusqu'à 1000 kilomètres, ce radar peut suivre plus d'un quart des satellites dont la majorité de ceux qui sont considérés comme les plus menaçants.

Pour obtenir une efficacité maximale du système de détection, deux contraintes principales ont été définies. D'une part, un délai maximal de détection de 24 heures a été fixé, ce qui signifie que tout satellite doit être vu avec une récurrence de 24 heures. D'autre part, les mesures collectées doivent assurer une capacité de détermination d'orbite dès le premier passage. D'où la solution, proposée par l'Onera, basée sur un radar bistatique à balayage. Sur le site d'émission, des antennes émettent un signal continu à basse fréquence dans un secteur angulaire donné de l'espace. Plus au sud, le site de réception abrite un grand nombre d'antennes omnidirectionnelles. "C'est à partir des signaux élémentaires reçus par celles-ci qu'est reconstitué par calcul un faisceau à lobe étroit", explique Jacques Bouchard. "La direction de ce lobe va fournir une mesure angulaire de l'objet détecté, alors que le décalage de fréquence entre les signaux émis et reçus permet d'obtenir une mesure de sa vitesse radiale."



Le site de réception près d'Apt, vu du ciel

### **Un système qui garantit l'indépendance de notre surveillance spatiale**

Depuis 1992, Jacques Bouchard travaille à plein temps au développement de Graves en tant que spécialiste de mécanique spatiale. Il a commencé, dans le cadre de l'étude de définition de ce projet, par définir la zone que devait scruter le radar pour assurer les objectifs de la mission, c'est-à-dire fournir aux utilisateurs, c'est-à-dire les militaires, un catalogue d'éléments orbitaux régulièrement mis à jour. Ensuite, il a conçu des logiciels de simulation de cet instrument pour vérifier que celui-ci était capable de satisfaire les objectifs. Enfin, Jacques Bouchard a développé les logiciels d'exploitation orbitographique des mesures, un travail qui vient de se terminer par la campagne de test des systèmes orbitographiques en décembre dernier. Cette campagne, il l'a effectuée notamment avec sa femme, Aline Bouchard, également ingénieur de recherche au sein du DPRS, qui a assuré les tests de ces logiciels. "Il s'agissait notamment de vérifier que nous étions capables d'établir un catalogue d'éléments orbitaux à partir du traitement des mesures fournies par le radar." L'objectif de cette campagne était également de vérifier la quantité et la qualité des mesures produites par le radar qui avait subi des modifications profondes par rapport au prototype testé en 2001 (doublement de la puissance d'émission, nouveau calculateur de traitement du signal six fois plus puissant).

Afin d'être compatible avec les catalogues existants, notamment le catalogue américain, le catalogue d'éléments orbitaux français est au format de diffusion dit "two lines". "Les données diffusées par Graves ne concerneront qu'une fraction de ce que le système américain peut observer. Il faut savoir que le catalogue américain répertorie des objets dont l'apogée est proche de la Lune, c'est-à-dire à une distance d'environ 300 000 km", souligne Jacques Bouchard qui précise que le système américain est incroyablement plus riche en capteurs de mesure. Cela dit, avec un capteur unique Graves est capable d'observer presque le quart de la totalité des objets répertoriés par le catalogue américain. "Nous avons sans doute une cohérence de traitement bien supérieure à ce dont disposent les Américains", estime-t-il.

Au cours de cette première campagne, Graves a permis de répertorier quelques satellites qui n'apparaissent pas dans le catalogue d'éléments orbitaux diffusé par les Américains... Par ailleurs, les Américains limitent volontairement la production de ces données à 24 heures alors que la fréquence de

rafraîchissement des éléments fournis par Graves est de 12 heures dans 70% des cas. "C'est donc tout l'intérêt de disposer de son propre système de surveillance spatiale et de se garantir ainsi contre un éventuel arrêt de la distribution de ces données", constate Jacques Bouchard.



[*GRAVES Transmitters*]

### L'aboutissement de treize années de travail

Dans le courant de l'été sera menée une seconde campagne d'essai visant à tester le système orbitographique de Graves. Une nouvelle fois, Jacques Bouchard et sa femme Aline feront équipe pour exploiter les mesures collectées par le radar, piloté depuis l'Onera. Ensuite, le système orbitographique sera livré aux militaires et connecté au radar via le réseau de l'armée de l'air. Il restera alors à effectuer quelques réglages plus fins du système, et notamment des logiciels, au cours de l'année 2006.

"L'activité solaire a une influence, en particulier sur la réfraction ionosphérique et donc sur la qualité des mesures. Par conséquent, il se peut que le système connaisse certaines fluctuations", déclare l'ingénieur de Châtillon. Cela dit, les données fournies par ce système de veille spatiale seront disponibles et utilisables dès l'automne 2005. Pour Jacques Bouchard, ce sera l'aboutissement d'un travail de treize ans, treize années dont une bonne partie durant laquelle il a réalisé du développement logiciel "à haute dose", un travail particulièrement prenant. "C'est assez rare de voir l'aboutissement d'un tel projet", reconnaît-il.

<http://www.sat-net.com/listserver/sat-space-news/msg00166.html>

from: [owner-sat-space-news@tags1.dn.net](mailto:owner-sat-space-news@tags1.dn.net)

- Date: Sun, 02 Aug 1998 21:59:50 +0200

---

```
||||| Space News InNet
||| Une production Space News International
||| -----
||| Periodique d'informations et d'actualites internationales sur
||| l'Astronomie, l'Astronautique, l'Espace et les Sciences connexes
||| distribue gratuitement par liste de diffusion sur l'Internet.
||| -----
||| Abonnement en ligne sur : http://www.sat-net.com/space-news
||| ou transmettez un mail a : Majordomo@tags1.dn.net comportant
||| uniquement le texte : subscribe sat-space-news
||| Space News InNet numero 212 dimanche 2 aout 1998
```

[deletia]

LES RADARS SECRETS DE L'ONERA

L'office de recherche français dévoile ses nouveaux radars. Il s'agit notamment d'un radar transhorizon, d'un autre assurant la surveillance de l'espace ou encore permettant de voir les avions "invisibles".

Depuis plusieurs années déjà l'Onera, Office national d'études et de recherches aérospatiales, a entamé l'étude de nouveaux concepts de radars et conduit d'importants travaux sur la furtivité. Si certains systèmes comme le premier radar basse fréquence à impulsion et antenne synthétique (RIAAS) ont fait l'objet d'un transfert industriel, vers Thomson Airsys, d'autres bénéficient depuis quelques mois d'une indiscutable montée en puissance du rythme de leur développement. C'est le cas du radar transhorizon "Nostradamus", du radar de surveillance de l'espace "Graves" et un concept original permettant de déjouer la furtivité.

On peut à ce titre considérer que 1998 sera l'année de consécration du vaste et ambitieux programme de radar transhorizon Nostradamus. Tout en effet est maintenant prêt pour que débute à la fin de l'année la phase d'expérimentation globale de ce système capable de détecter des cibles situées entre 700 et 2.000 km de distance. Quant au calendrier de la suite des opérations, il dépendra bien sûr des résultats obtenus à l'occasion des essais, mais également de son éventuelle industrialisation par Thomson Airsys. L'industriel, en effet, s'intéresse de plus en plus à Nostradamus et le transfert de ce programme vers lui aboutirait à accélérer la réalisation. Déjà le développement exploratoire sur la base d'une étude de définition du LETTI associait Thomson-CSF au programme.

Le concept du radar à rétrodiffusion par onde de ciel West pas original en lui-même. Il a en effet déjà fait l'objet d'applications opérationnelles, notamment aux Etats-Unis, en Russie et en Australie. En revanche, ce qui

s'affirme d'une grande originalite, c'est le choix effectue en faveur d'une solution faisant appel a un reseau monostatique avec architecture surfacique a trois bras, a la place des longues antennes s'étirant sur des kilometres.

Nostradamus (NOuveau Systeme TRAnshorizon Decametrique Appliquant les Methodes Utilisees en Studio) est un radar monostatique, c'est-a-dire avec des antennes d'émission et de reception colocalisees fonctionnant dans la bande HF (haute frequence, longueur "onde decametrique), architecture autour d'une étoile a trois branches de 400 m de long espace angulairement de 120 deg. Chaque bras comporte une centaine d'antennes en forme de diabolo de 7 ni de haut et de 6 ni de diametre. Un tiers d'entre elles sont bifonction (emetteur-recepteur), avec leur electronique associee installee dans trois tunnels de 80 ni de Ion tandis que les autres assurent uniquement la reception.

#### Radar en étoile

Grace a ce dispositif triangulaire en étoile, le radar a pour autre particularité d'être omnidirectionnel sur 360 deg. Et grace au pilotage des phases de chaque antenne, l'inclinaison du faisceau peut être orientée a volonté afin d'être pointée vers la zone ionosphérique favorable à sa propagation de detection. Ce systeme permet ainsi de localiser les cibles avec une précision nettement supérieure à celle accessible aux radars transhorizons classiques a reseau lineaire. Ces derniers sont en effet limités a environ 60 deg d'ouverture et leur faisceau est fixe en site.

On précise par ailleurs a l'Onera qu'outre ses fonctions classiques de detection a longue distance Nostradamus, implanté sur une ancienne base de l'Otan entre Dreux et Senonche, pourrait également être utilisé afin de caractériser l'état de l'ionosphère et d'élaborer des modèles de propagation des signaux transitant (ou se réfléchissant) dans cette zone de l'espace.

Toujours dans le domaine de la detection a longue distance, le programme radar Graves de surveillance de l'espace (Grand Reseau Adapte a la VEMe Spatiale) va entrer dans une toute nouvelle phase de son développement. Celle-ci associe dorénavant l'Allemagne (F-GAN) a travers le couplage d'un radar capable d'effectuer de l'imagerie satellitaire avec pouvoir de resolution de 25 cm a 1.000 km de distance. Les premiers essais de cet ensemble intégré se dérouleront fin 1998 et devraient amener à valider un concept de surveillance où le réseau Graves scrute l'espace et après détection d'un objet adresse ce dernier au module d'imagerie allemand pour identification.

Développé sur financement de la Direction des missiles et de l'espace de la Délegation générale pour l'armement, le réseau Graves s'appuie sur une architecture radar bistatique à balayage électronique. Les premiers essais du système prévu pour être opérationnel au début des années 2000 se dérouleront à la fin de cette année et permettront d'évaluer les capacités de détection et localisation d'objets spatiaux à partir d'un signal émis d'un site implanté à Broyes-les-Pesnes dans la région de Dijon, et dont la réception s'effectuera sur une station du plateau d'Albion.

Destiné à détecter en moins de 24 heures les satellites d'orbite circulaire dont l'altitude sera comprise entre 250 km et 1.000 km, le réseau Graves est conçu, précise-t-on à l'Onera, autour d'un certain nombre de compromis,

Positionné en France métropolitaine, il verra par exemple ses capacités de détection limitées vis-à-vis d'objets gravitant sur des orbites faiblement inclinées sur l'équateur. Mais l'on fait observer que ces dernières sont assez peu utilisées et que dans tous les cas le radar Graves sera en mesure de poursuivre 60 % des satellites. À titre indicatif une portée en altitude de 2000 kilomètres aurait permis d'élargir à 85 % le potentiel de détection du réseau Graves, mais un tel choix aurait conduit à l'installation d'émetteurs seize fois plus puissants.

#### Traque des satellites

Graves en revanche aura une très grande promptitude de détection. La détermination d'orbite s'effectuera dès le premier passage du satellite. Quant à la zone de surveillance, elle aura la forme d'une couronne conique dont le site sera compris entre 10 degrés et 30 degrés, et sera couverte par un ensemble de huit faisceaux de 20 degrés d'ouverture en site et 8 degrés en gisement. Chaque faisceau balaye de façon continue à une vitesse parfaitement ajustée un secteur de 45 degrés en azimut.

S'agissant du réseau de réception, il est constitué d'une couronne sur laquelle sont implantées 200 antennes élémentaires. Omnidirectionnelles en gisement, chacune de ces antennes peut assurer un recueil de signal en site de 10 à 50 degrés. Les satellites ne pouvant en fait être différenciés que par leur position angulaire, leur vitesse radiale et plus particulièrement leur accélération, le radar Graves, précise-t-on à la direction de programme, nécessitera de colossaux moyens de calcul pour traiter l'important volume d'informations que nécessite la surveillance spatiale.

Un autre axe de recherche privilégié par les chercheurs de l'Onera concerne les radars SAR (Radars à ouverture de synthèse) qui permettent d'obtenir des images aussi précises que de la vidéo. Toutefois dans l'immédiat la maîtrise de ce nouveau concept se heurte encore à des difficultés que les chercheurs estiment pouvoir résoudre dans un avenir qui ne pourra être inférieur à 2 ou 3 ans. Typiquement l'imagerie SAR est bidimensionnelle. Mais en faisant voler deux antennes superposées avec une base interférométrique connue on parvient, par analyses de la phase différentielle entre antennes, à reconstituer la troisième dimension.

Pour cela, un nouveau moyen d'études, la station aéroportée "Ramses" (RADar Multispectral d'Etudes des Signatures), est utilisée. Installé à bord d'un Transall C-160, il disposait jusqu'à ces derniers temps de sept têtes radar allant de la bande L (1,6 GHz) à W (95 GHz). Une huitième se trouve actuellement en cours d'installation et concerne la bande basse fréquence (400 MHz). L'objectif des travaux conduits sur cette bande vise à évaluer l'aptitude des systèmes radar SAR travaillant sur les longueurs d'ondes correspondantes à penetrer les feuillages épais et effectuer de l'observation et de la détection souterraine.

Ramses peut également être installé au sol. Dans ce cas ce n'est plus la plate-forme embarquant le radar qui bouge, mais les avions ou les satellites évoluant dans l'espace qui se déplacent devant le radar. Ce concept dit "d'imagerie inverse" permet d'obtenir des images à haute résolution de mobiles aériens.

## Radars antifurtivite sur la television

Depuis plusieurs années l'Onera poursuit des études sur un concept "exotique" de détection appelé programme DARC utilisant la porteuse image du signal de télévision comme moyen de surveillance de l'espace aérien. Ce procédé multistatique présente l'avantage d'une très grande discréetion et d'une vulnérabilité nulle. En effet, les émetteurs et réémetteurs de TDF font office d'émetteurs pour le radar alors que chaque récepteur de télévision, muni d'un boîtier spécifique, peut devenir un centre de contrôle de détection de défense aérienne.

Ce concept fait l'objet d'un aussi discret que sérieux engouement avec la perspective de voir se développer en France la diffusion d'images TV en numérique hertzien. D'où les travaux conduits par l'Office de recherche français en partenariat avec Thomson CSF sur les nouvelles possibilités résultant de l'exploitation des derniers procédés de cryptage de la télévision numérique. Ils ont mis en évidence la parfaite adaptation de certains codes de signal au traitement de l'antifurtivité. Un nouveau champ d'application qui ne laisse pas les militaires indifférents.

Serge Brosselin

[EXCERPTS; Full text below]

## Les perspectives d'avenir pour les équipements au sol

Thierry MICHAL

ONERA  
thierry.michal@onera.fr

### 2.1.1. Capteurs de veille radar

À l'heure actuelle, il n'existe pas en Europe de capteur de veille spatiale opérationnel. Par contre, une maquette probatoire d'un tel capteur a été réalisée en France.

Le radar GRAVES (Fig. 3), réalisé sous contrat de la DGA, est un radar spécifiquement dédié à la surveillance de l'espace. Il a été conçu pour assurer la détection et le suivi des satellites en orbite jusqu'à 1000 km d'altitude.



Fig. 3 Vue des sites d'émission et de réception du radar GRAVES

Le radar GRAVES est un radar à émission continue et à détection Doppler fonctionnant en bande VHF. L'utilisation d'une émission continue conduit à un radar bistatique (émission et réception sur des sites distincts).

L'émission est assurée par réseau phasé et la réception par une technique de formation de faisceau par le calcul. La maquette probatoire développée par l'ONERA comprend deux panneaux d'antennes d'émissions dont chacun permet de couvrir 45° en azimut par balayage en une vingtaine de secondes d'un faisceau de 8° d'ouverture en azimut et 20° d'ouverture en site. La zone couverte s'étend donc sur 90° en azimut. La taille des faisceaux et la vitesse de balayage ont été dimensionnées pour assurer la détection de tous les satellites traversant le faisceau d'émission.

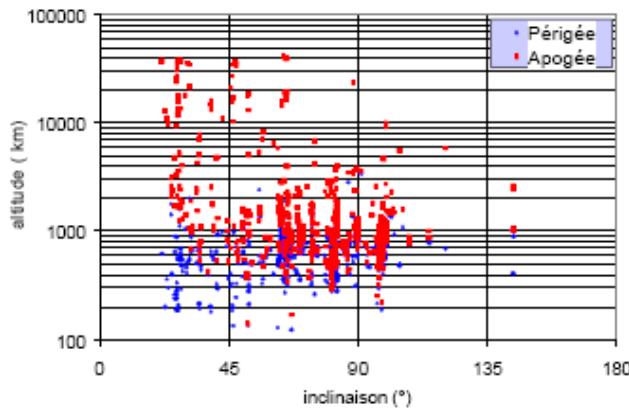
Le réseau de réception est constitué d'un ensemble de 100 antennes réparties sur un disque métallique formant plan de sol. Chaque antenne est reliée à un récepteur individuel dont les signaux sont ensuite numérisés. L'addition, en phase, de tous les signaux issus des antennes de réception conduit à la création d'un faisceau de réception vertical équivalent à celui qui serait créé par une antenne unique de taille égale au disque sur lequel sont réparties les antennes (soit une ouverture de l'ordre de 2°).

Cependant, les signaux issus de chaque antenne étant numérisés, il est possible d'affecter au signal issu de chaque antenne un déphasage spécifique. Le choix d'un jeu de phase adapté permet alors de créer un faisceau orienté selon n'importe quelle direction (et non plus seulement à la verticale). Cette technique de formation de faisceau par le calcul (FFC) permet, sous réserve de disposer d'un calculateur en temps réel suffisamment puissant, d'observer simultanément l'ensemble des directions potentiellement éclairées par l'émission.

La détection des satellites est ensuite assurée par une technique de détection Doppler en procédant à la transformée de Fourier du signal issu de la FFC après corrélation avec une réplique préenregistrée destinée à corriger la variation de Doppler durant le temps d'intégration.

Vis-à-vis des besoins évoqués précédemment (suivi jusqu'à 2000 km d'altitude d'objets dont la taille caractéristique est inférieure à 10, voire à 5 cm), il est clair que ce capteur, dédié au suivi des satellites, ne peut faire face qu'à une partie seulement des besoins exprimés. On peut néanmoins observer ci-dessous, (Fig. 4) qu'il permet de disposer d'une capacité réelle de veille puisque la campagne d'octobre 2002 a permis de détecter plus de 2235 objets qui se répartissent (selon la corrélation réalisée avec les données de la NASA) de la manière suivante :

- ✓ 1139 satellites,
- ✓ 756 étages de lanceurs,
- ✓ 340 débris.



*Fig. 4 Répartition des objets détectés par GRAVES  
(campagne de mesure octobre 2001)*

À l'heure actuelle, le système GRAVES est en cours d'extension avec un objectif de mise en service opérationnelle courant 2005. Cette extension comprend :

- le doublement du système d'émission : la mise en place de deux antennes d'émission supplémentaires permettra de couvrir 180 degrés en azimut et assurer ainsi une périodicité d'observation de moins de 24 heures pour l'ensemble des satellites suivis ;
- le remplacement du calculateur de traitement de signal pour assurer la création du nombre de faisceaux de réception requis suite à l'augmentation du volume éclairé par l'émission ;
- le développement des outils de traitement orbitographiques permettant d'assurer la création et le maintien à jour d'un catalogue des paramètres orbitaux des satellites détectés (voir paragraphe 3.1).

<http://www.onera.fr/actualites/presse/2000-2002/020424.php>

## Surveillance du ciel et de l'espace : l'ONERA dote la France d'outils d'alertes précoce en Europe

Châtillon, le 24 avril 2002

15 millions d'euros de R&D, pour des radars innovants, viennent d'être notifiés à l'ONERA par contrat du Ministère de la Défense. Objectif : rendre opérationnel le démonstrateur GRAVES avant de le transférer à l'Armée de l'Air en 2005 et optimiser les performances du radar NOSTRADAMUS tout en assurant son pilotage depuis le centre ONERA de Palaiseau. Développés depuis 10 ans par les chercheurs du premier acteur français de la recherche aérospatiale, ces radars vont doter la France d'outils de détection uniques en Europe. Ces 2 moyens fonctionneront 24 h sur 24 toute l'année pour détecter, localiser et identifier toute menace potentielle.

Proches des applications, l'ONERA conduit régulièrement ses travaux jusqu'à la réalisation de maquettes et de démonstrateurs comme les radar Graves et Nostradamus.

La surveillance de l'espace : Graves, un nouveau concept de radar pour voir plus haut et par tout temps

En 2005, ce radar surveillera l'espace au-dessus de la France en permanence. Objectif : détecter 100 % des satellites survolant la France en orbite basse et déterminer leur trajectoire. Ce radar, unique en Europe, établira, en temps réel, un " catalogue " des objets qui passeront au-dessus de notre territoire. Selon les informations issues de données publiques américaines, plus de 8 000 objets orbitent autour de la Terre. Beaucoup survolent la France chaque jour, constituant ainsi une menace potentielle pour notre territoire. Il est donc essentiel de connaître en permanence la position de ces objets.

Aujourd'hui, la France ne dispose pas de capteurs permanents et autonomes capables de détecter les engins en orbite. C'est pourquoi, dès 1990, le Ministère de la Défense a confié des études à l'ONERA avec pour objectif de constituer et de mettre à jour une base de données des satellites survolant la France à une altitude inférieure à 1 000 km. Le prototype actuellement en service est une version limitée du futur système ; il a permis néanmoins, dès sa première expérimentation en 1999, de recenser plus de 2 000 objets en orbite.

[deletia]

J.O. Numéro 283 du 6 Décembre 1998 J

Texte paru au JORF/LD page 18410

Ce document peut également être consulté sur le site officiel Legifrance

## **Arrêté du 29 octobre 1998 portant création d'une zone dangereuse dans la région de Broye-lès-Pesmes (Haute-Saône)**

---

**NOR : EQUA9801422A**

---

Le ministre de la défense et le ministre de l'équipement, des transports et du logement,  
Vu le code de l'aviation civile, et notamment les articles D. 131-1 à D. 131-10 et leurs annexes ;  
Vu le décret no 96-319 du 10 avril 1996 relatif à la définition des espaces aériens dans lesquels sont assurés des services de la circulation aérienne ;  
Vu le décret du 16 juin 1997, modifié par le décret du 29 juillet 1998, portant délégation de signature ;  
Vu le décret du 18 mai 1998 portant délégation de signature ;  
Vu l'arrêté du 24 décembre 1996 relatif au directoire de l'espace aérien,  
Arrêtent :

Art. 1er. - Il est créé, à l'intérieur de la région d'information de vol (FIR) de classe G, une zone dangereuse, identifiée LF-D 75 Broye-lès-Pesmes, pour les besoins d'émissions radar de forte puissance pouvant perturber les systèmes électriques de bord.

Art. 2. - Les limites en plan et en altitude de cette zone dangereuse sont définies ci-après :

a) Limites latérales : cercle de 0,4 NM (750 mètres) de rayon centré sur le point :

47° 20' 53" N, 005° 30' 55" E ;

b) Limites verticales : de la surface à 3 000 pieds (900 mètres) par rapport à la surface.

Art. 3. - L'arrêté du 7 novembre 1994 portant création d'une zone dangereuse dans la région de Broye-lès-Pesmes (Haute-Saône) est abrogé.

Art. 4. - Les dispositions du présent arrêté sont portées à la connaissance des usagers par la voie de l'information aéronautique.

Art. 5. - Le directeur de la circulation aérienne militaire et le directeur de la navigation aérienne sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent arrêté, qui sera publié au Journal officiel de la République française.

Fait à Paris, le 29 octobre 1998.

Le ministre de l'équipement,  
des transports et du logement,  
Pour le ministre et par délégation :  
Le directeur de la navigation aérienne,  
H.-G. Baudry  
Le ministre de la défense,  
Pour le ministre et par délégation :  
Par empêchement du directeur  
de la circulation aérienne militaire :  
Le directeur adjoint  
de la circulation aérienne militaire,  
F. Rivet

J.O. Numéro 41 du 18 Février 1998

Texte paru au JORF/LD page 02557

Ce document peut également être consulté sur le site officiel Legifrance

## **Arrêtés du 5 janvier 1998 portant suppression d'aérodromes**

---

**NOR : DEFL9801112A**

---

Par arrêté du ministre de la défense et du ministre de l'équipement, des transports et du logement en date du 5 janvier 1998, sont abrogées toutes dispositions relatives à la création, à la mise en service et à l'affectation de l'aérodrome de **Broye-lès-Pesmes** (Haute-Saône).

La liste visée à l' article D. 211-3 du code de l'aviation civile sera modifiée en conséquence.

[http://www.capcomespace.net/dossiers/espace\\_europeen/albion/albion\\_aujourd'hui\\_ZL.htm](http://www.capcomespace.net/dossiers/espace_europeen/albion/albion_aujourd'hui_ZL.htm)

## LE PLATEAU D'ALBION AUJOURD'HUI

### VISITE DES ZL

Les 18 zone de lancement ZL sont restés dans l'état prêt pour une éventuelle reconversion, d'autres ont été recouverte de remblais après avoir fermés les silos. Il était prévu de raser les bâtiments de surface des ZL mais le manque de financement a retardé puis annulé l'échéance. Seules deux ZL ont vu leur BDS rasé, la ZL 1-4 et la 2-4 à coté de la BA 200. Toutes les ZL ont été revendus soit à leur ancien propriétaire et laissés tel quel servant de parc à animaux, de stockage pour le foin ou le bois, soit rachetés par des mairies pour des projets quelquefois originaux (l'observatoire SIRENE, la déchèterie de Sault...). Une ZL sert de station de mesures sismiques, une autre abrite une antenne de l'ONERA.

Eté 2004, à l'occasion d'une série de conférences sur la conquête de la lune donnée par l'équipe de l'observatoire SIRENE à Lagarde d'Apt sur un ancien silo nucléaire, je décide de passer la zone au peigne fin et de photographier ce qui restent des ZL depuis 1999.

[*deletia*]

La D950 m'amène à Revest du Bion. Deux routes en partent vers le Sud pour rejoindre St Christol et Simiane. Le long de la première (D218), deux sites, la ZL 2.6 et la ZL 1.4. La ZL 2.6 en face la chapelle Notre Dame de l'Ortiguière a été reconvertit en septembre 1997 et accueille les antennes radar GRAVES (Grand Réseau Adapté à la VÉEille Spatiale) pour la surveillance de l'espace de l'ONERA développées avec Thomson-CSF. Il s'agit d'un système bistatique dont l'émetteur se trouve dans la région de Dijon à Broyes-les-Pesnes et le récepteur sur le plateau d'Albion. Il permet de détecter des objets volants jusqu'à 1.000 km d'altitude. Dans un second temps, il s'agira de développer les techniques d'identification. Pour cela, l'Onera étudie un instrument à optique adaptative, tandis que le FGAN allemand étudie un radar. L'Onera a acquis dans ce domaine une expérience avec le télescope VLT du Chili. Par ailleurs, le radar trans-horizon Nostradamus, qui utilise la réflexion sur l'ionosphère pour détecter les missiles de croisière à basse altitude possède déjà deux branches des quatre éléments du radar de 400 m de diamètre. Dans ce cas, l'émission et la réception s'opèrent au même endroit. Actuellement, l'Onera termine la troisième branche. Le réseau GRAVES scrute l'espace et après détection d'un objet adresse ce dernier à un module d'imagerie pour identification. Ce projet a été développé sur financement de la Direction des Missiles et de l'Espace de la Délégation Générale de l'Armement. A noter que sur cette ZL, la porte du silo est toujours intacte et visible.

[Box containing text "D'après un document de l'ONERA , juillet 2005 "]

+++++START BOX+++++

Depuis plusieurs années déjà l'Onera, Office national d'études et de recherches aérospatiales, a entamé l'étude de nouveaux concepts de radars et conduit d'importants travaux sur la furtivité. Si certains systèmes comme le premier radar basse fréquence à impulsion et antenne synthétique (RIAAS) ont fait l'objet d'un transfert industriel, vers Thomson Airsys, d'autres bénéficient depuis quelques mois d'une indiscutable montée en puissance du rythme de leur développement. C'est le cas du radar de surveillance de l'espace "Graves".

Dans le domaine de la détection à longue distance, le programme radar Graves de surveillance de l'espace (Grand Réseau Adapté à la VEMe Spatiale) va entrer dans une toute nouvelle phase de son développement. Celle-ci associe dorénavant l'Allemagne (F-GAN) à travers le couplage d'un radar capable d'effectuer de l'imagerie satellitaire avec pouvoir de résolution de 25 cm à 1.000 km de distance.

Développé sur financement de la Direction des missiles et de l'espace de la Délégation générale pour l'armement, le réseau Graves s'appuie sur une architecture radar bistatique à balayage électronique. Les premiers essais du système prévu pour être opérationnel au début des années 2000 se sont déroulés en décembre 2004 après de nombreux retards. Il s'agissait de vérifier la capacité de ces outils à établir un catalogue d'éléments orbitaux à partir du traitement des mesures angulaires et de vitesse radiale collectées par le radar à partir d'un signal émis d'un site implanté à Broyes-les-Pesnes dans la région de Dijon, et dont la réception s'effectue sur l'ancienne ZL du plateau d'Albion.

Destiné à détecter en moins de 24 heures les satellites d'orbite circulaire dont l'altitude sera comprise entre 250 km et 1.000 km, le réseau Graves est conçu, précise-t-on à l'Onera, autour d'un certain nombre de compromis. Positionné en France métropolitaine, il verra par exemple ses capacités de détection limitées vis à vis d'objets gravitant sur des orbites faiblement inclinées sur l'équateur. Mais l'on fait observer que ces dernières sont assez peu utilisées et que dans tous les cas le radar Graves sera en mesure de poursuivre 60 % des satellites. A titre indicatif une portée en altitude de 2000 kilomètres aurait permis d'élargir à 85 % le potentiel de détection du réseau Graves, mais un tel choix aurait conduit à l'installation d'émetteurs seize fois plus puissants.

Graves en revanche aura une très grande promptitude de détection. La détermination d'orbite s'effectuera dès le premier passage du satellite. Quant à la zone de surveillance, elle aura la forme d'une couronne conique dont le site sera compris entre 10 degré et 30 degré, et sera couverte par un ensemble de huit faisceaux de 20 degré d'ouverture en site et 8 degré en gisement. Chaque faisceau balaye de façon continue à une vitesse parfaitement ajustée un secteur de 45 degré en azimut.

S'agissant du réseau de réception, il est constitué d'une couronne sur laquelle sont implantées 200 antennes élémentaires. Omnidirectionnelles en gisement, chacune de ces antennes peut assurer un recueil de signal en site de 10 à 50 degrés. Les satellites ne pouvant en fait être différenciés que par leur position angulaire, leur vitesse radiale et plus particulièrement leur accélération, le radar Graves, précise-t-on à la direction de programme, nécessitera de colossaux moyens de calcul pour traiter l'important volume d'informations que nécessite la surveillance spatiale.

Depuis 1992, Jacques Bouchard travaille à plein temps au développement de Graves en tant que spécialiste de mécanique spatiale. Il a commencé, dans le cadre de l'étude de définition de ce projet, par définir la zone que devait scruter le radar pour assurer les objectifs de la mission, c'est-à-dire fournir aux utilisateurs, c'est-à-dire les militaires, un catalogue d'éléments orbitaux régulièrement mis à jour. Ensuite, il a conçu des logiciels de simulation de cet instrument pour vérifier que celui-ci était capable de satisfaire les objectifs. Enfin, Jacques Bouchard a développé les logiciels d'exploitation orbitographique des mesures, un travail qui vient de se terminer par la campagne de test des systèmes orbitographiques en décembre 2004. Cette campagne, il l'a effectuée notamment avec sa femme, Aline Bouchard, également ingénieur de recherche au sein du DPRS, qui a assuré les tests de ces logiciels. "Il s'agissait notamment de vérifier que nous étions capables d'établir un catalogue d'éléments orbitaux à partir du traitement des mesures fournies par le radar." L'objectif de cette campagne était également de vérifier la quantité et la qualité des mesures produites par le radar qui avait subi des modifications profondes par rapport au prototype testé en 2001 (doublement de la puissance d'émission, nouveau calculateur de traitement du signal six fois plus puissant).

Afin d'être compatible avec les catalogues existants, notamment le catalogue américain, le catalogue d'éléments orbitaux français est au format de diffusion dit "*two lines*". "Les données diffusées par Graves ne concerneront qu'une fraction de ce que le système américain peut observer. Il faut savoir que le catalogue américain répertorie des objets dont l'apogée est proche de la Lune, c'est-à-dire à une distance d'environ 300 000 km", souligne Jacques Bouchard qui précise que le système américain est incroyablement plus riche en capteurs de mesure. Cela dit, avec un capteur unique, Graves est capable d'observer presque le quart de la totalité des objets répertoriés par le catalogue américain. "Nous avons sans doute une cohérence de traitement bien supérieure à ce dont disposent les Américains", estime-t-il.

Au cours de cette première campagne, Graves a permis de répertorier quelques satellites qui n'apparaissent pas dans le catalogue d'éléments orbitaux diffusé par les Américains... Par ailleurs, les Américains limitent volontairement la production de ces données à 24 heures alors que la fréquence de rafraîchissement des éléments fournis par Graves est de 12 heures dans 70% des cas. "C'est donc tout l'intérêt de disposer de son

propre système de surveillance spatiale et de se garantir ainsi contre un éventuel arrêt de la distribution de ces données", constate Jacques Bouchard.

Dans le courant de l'été 2005 sera menée une seconde campagne d'essai visant à tester le système orbitographique de Graves. Une nouvelle fois, Jacques Bouchard et sa femme Aline feront équipe pour exploiter les mesures collectées par le radar, piloté depuis l'Onera. Ensuite, le système orbitographique sera livré aux militaires et connecté au radar via le réseau de l'armée de l'air. Il restera alors à effectuer quelques réglages plus fins du système, et notamment des logiciels, au cours de l'année 2006. "L'activité solaire a une influence, en particulier sur la réfraction ionosphérique et donc sur la qualité des mesures. Par conséquent, il se peut que le système connaisse certaines fluctuations", déclare l'ingénieur de Châtillon. Cela dit, les données fournies par ce système de veille spatiale seront disponibles et utilisables dès l'automne 2005. Pour Jacques Bouchard, ce sera l'aboutissement d'un travail de treize ans, treize années dont une bonne partie durant laquelle il a réalisé du développement logiciel "à haute dose", un travail particulièrement prenant. "C'est assez rare de voir l'aboutissement d'un tel projet", reconnaît-il.

++++++END BOX++++++

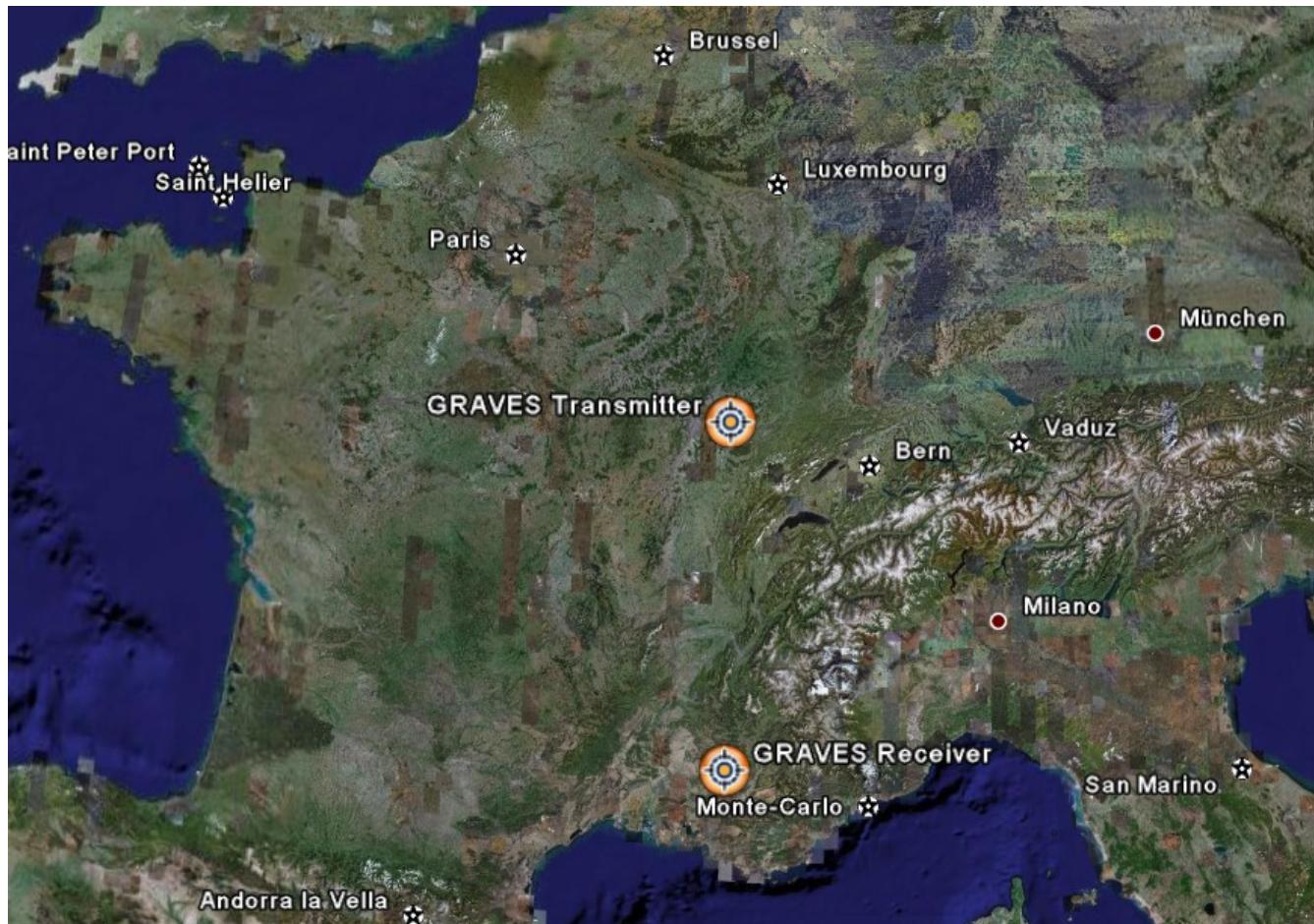


[GRAVES Receiver Antenna Array]



*[GRAVES Receiver Building]*

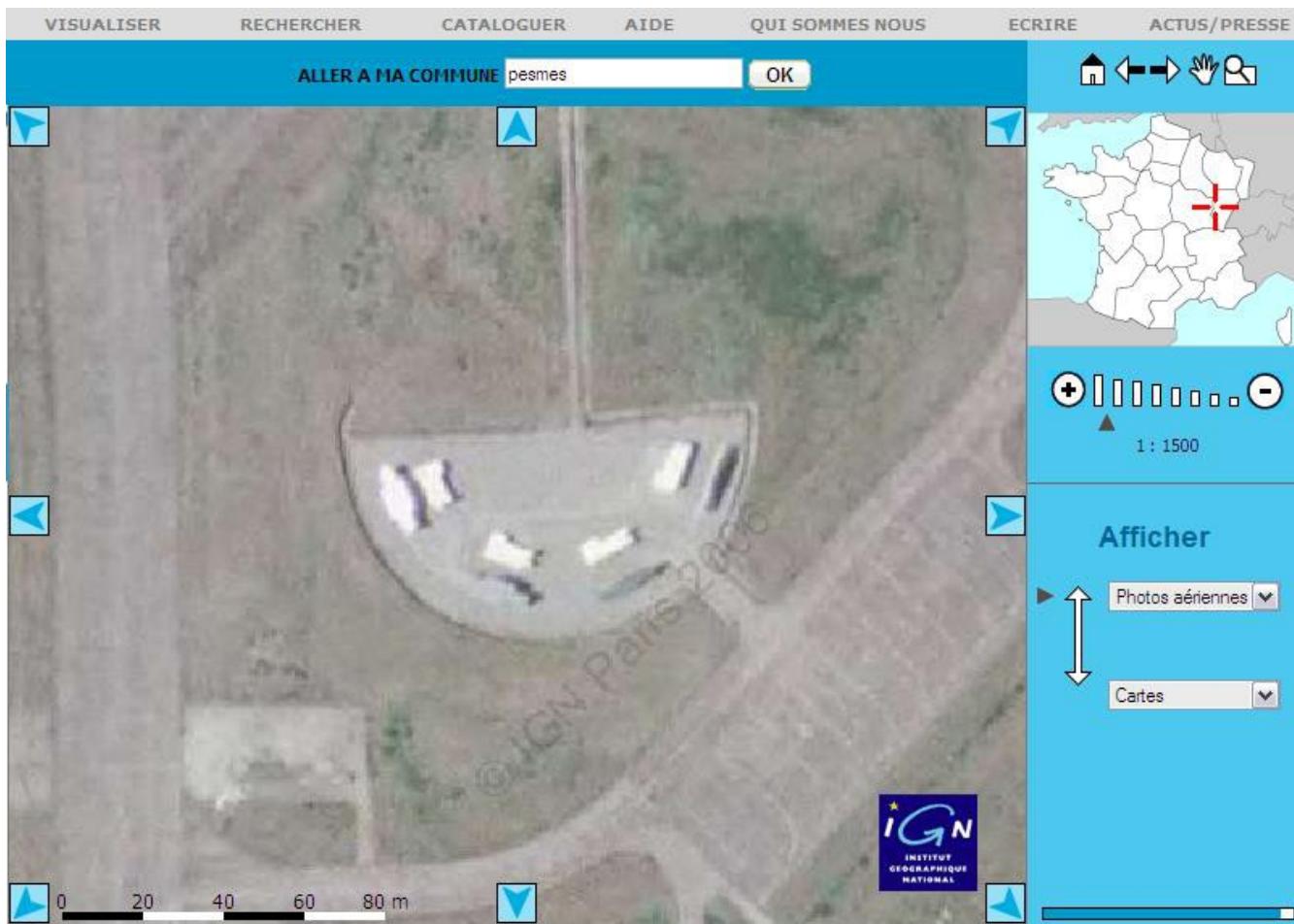
[Google Earth](#)



**Location of GRAVES sites in France**

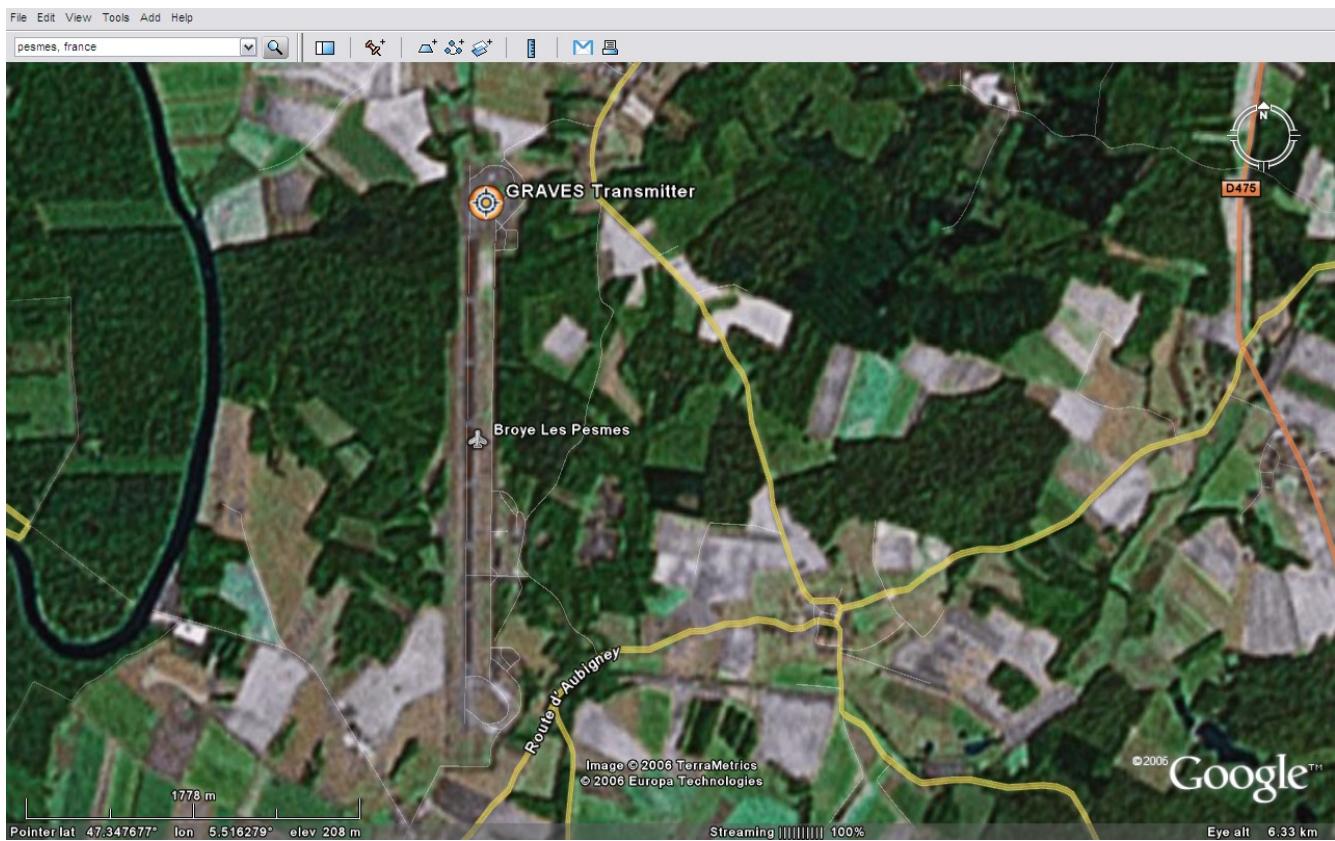
**Transmitter: Broye-les-Pesmes**

**Receiver: Revest du Bion**



**GRAVES Transmitter**

## Google Earth



**GRAVES Transmitter**  
**Google Earth Coordinates:**  
**Latitude 47.3477 N**  
**Longitude 5.5163 E**



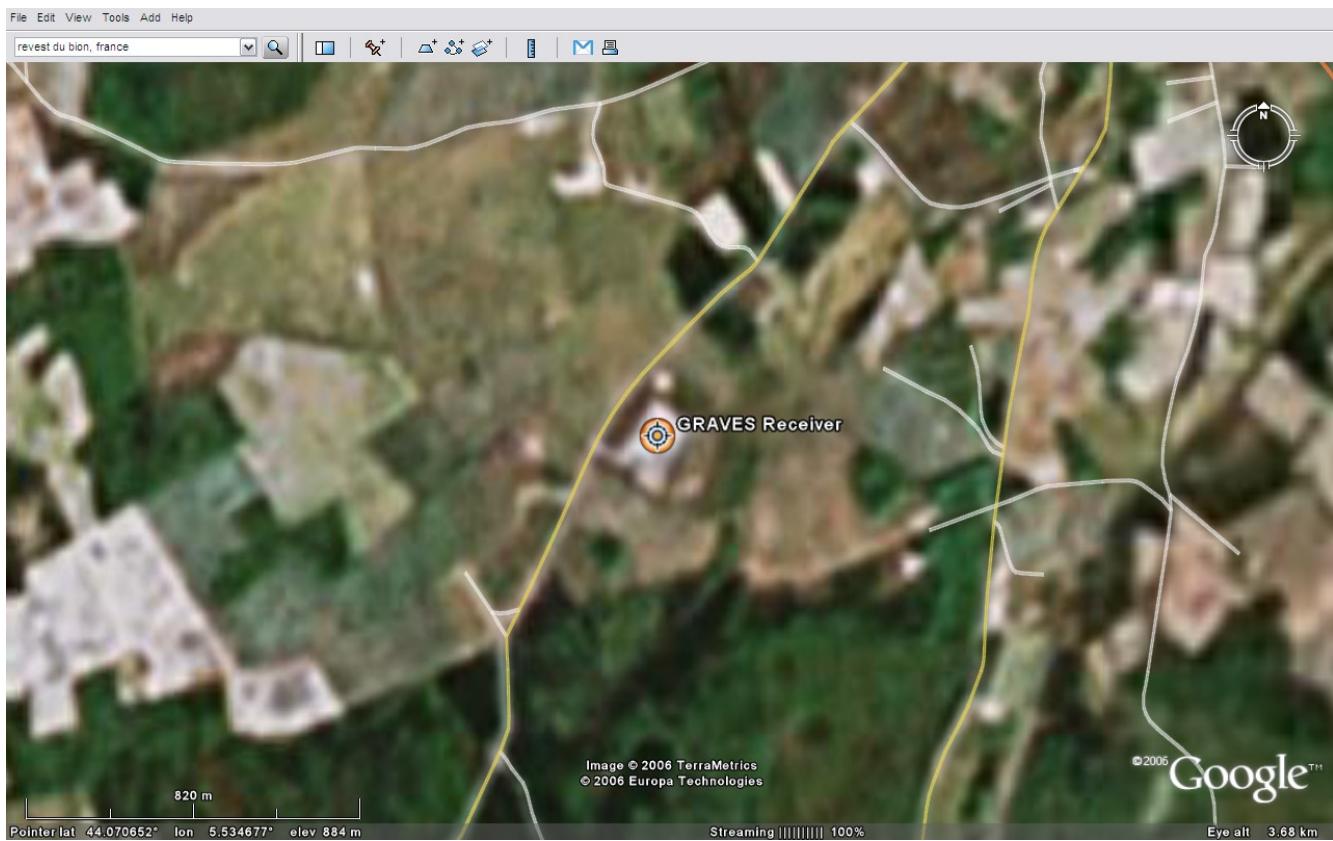
**Location of Graves Transmitter Relative to Pesmes**

[www.geoportail.fr](http://www.geoportail.fr)



**GRAVES Receiver**

## Google Earth



**GRAVES Receiver**  
**Google Earth Coordinates:**  
**Latitude 44.0706 N**  
**Longitude 5.5347 E**

[www.geoportail.com](http://www.geoportail.com)



**Location of Graves Receiver Relative to Revest du Bion**

## UN SYSTEME DE VEILLE SPATIALE POUR LA FRANCE

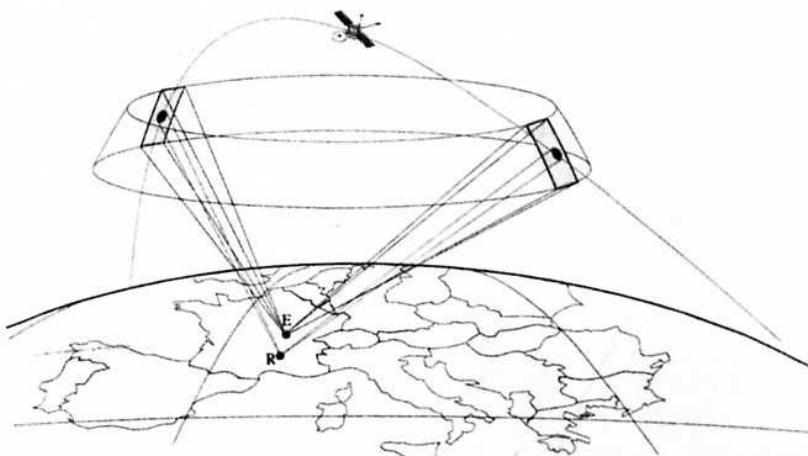
L'heure des démonstrations grandeur nature approche pour le radar GRAVES. Développé par l'ONERA et financé par la DGA, il doit répondre au problème de l'identification des satellites susceptibles d'observer la métropole.

**C**haque jour, un grand nombre de satellites se trouvent en position favorable pour observer la France. Combien exactement ? Quels sont-ils ? Quels sont leurs paramètres... Les données sont vagues, trop vagues. Enjeux militaires, économiques ; il serait bon de connaître en détails ces satellites : leurs trajectoires, leurs horaires de passage, leurs origines et pour finir, leurs missions exactes. Avoir ce que l'on appelle "nos propres éphémérides orbitales".

Malheureusement, à l'heure actuelle, il n'existe en notre pays aucun moyen au sol susceptible d'analyser la menace apportée par ces systèmes spatiaux. Compte tenu du nombre croissant de mises en orbite, cette lacune préoccupe de plus en plus les autorités militaires. C'est ainsi qu'est né le projet de radar GRAVES (Grand Réseau Adapté à la Veille Spatiale). Proposé par l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA) et financé par la Direction des Missiles et de l'Espace (DME) de la Délégation Générale pour l'Armement (DGA), le projet vient d'entrer dans sa deuxième phase de réalisation : celle des démonstrations en vraie grandeur.

GRAVES doit fournir une surveillance efficace de tous les satellites susceptibles d'observer le territoire de la France métropolitaine. Un projet ambitieux au regard de la complexité de l'activité orbitale terrestre. Car, même si cette surveillance s'intéresse principalement aux satellites en activité, son efficacité ne pourra être réelle que si la totalité des objets en orbite, qu'ils soient actifs ou inactifs, est suivie. Et à en croire la NASA, il existe un très grand nombre de satellites ou objets en orbite : 7.000 d'une taille caractéristique supérieure à 10 centimètres !

La solution réaliste de l'ONERA adopte un certain nombre de compromis : le radar de veille sera positionné en France métropolitaine, les orbites très peu inclinées sur l'équateur (en réalité très peu nombreuses) seront ainsi laissées pour compte et la surveillance sera limitée aux altitudes inférieures à 1.000 kilomètres. Comme l'explique Gérard Garnier, directeur adjoint au département des études de synthèse à l'ONERA, ce schéma permettra tout de même de suivre plus de 60 % des satellites dont la majorité des satellites les plus menaçants. Ceci tout en restant dans des gammes de puissance d'émission



**Principe de fonctionnement du radar de veille GRAVES.** Les sites d'émission et de réception sont représentés arbitrairement au centre de la France et pour simplifier la lecture de ce schéma, seulement deux des huit faisceaux radar sont représentés. Chacun éclaire une zone de 20° d'ouverture en site et 8° en gisement et effectue un balayage continu sur 45° en azimut pour suivre les satellites.

fort raisonnables. Bien sûr, il était possible de limiter la surveillance à 2.000 km, ce qui aurait permis de suivre 85 % des satellites... mais la puissance d'émission nécessaire était alors seize fois supérieure !

Pour une efficacité maximale du système de détection, deux contraintes principales sont définies. D'une part, un délai maximal de détection (séparant le moment d'entrée du satellite dans la zone surveillée et le moment de la détection par le radar) de 24 heures est imposé. Le radar de veille étant en effet le premier maillon de la chaîne conduisant à l'identification de la mission du satellite, il est indispensable de réaliser la détection au plus tôt. D'autre part, il doit être possible de déterminer l'orbite du satellite détecté en un seul passage. Une telle contrainte suppose que le satellite traverse la zone de surveillance en deux points.

La solution pratique retenue est basée sur un radar bistatique à balayage. La zone de surveillance correspond à une couronne conique comprise entre 10 et 30 degrés de site. Celle-ci est couverte par un ensemble de huit faisceaux de 20 degrés d'ouverture en site et 8 degrés en gisement (voir schéma ci-dessus). Chaque faisceau balaye un secteur de 45 degrés en azimut de façon continue (émission permanente) et avec une vitesse de balayage soigneusement ajustée.

Chacun de ces faisceaux est généré par un panneau d'antennes alimenté par un nombre

égal d'émetteurs de puissance (le prototype de démonstration n'utilisera, lui, que deux panneaux d'émission et donc deux faisceaux). Le réseau de réception, quant à lui, est constitué de 200 antennes élémentaires disposées sur un contour circulaire. Chacune de ces antennes est omnidirectionnelle en gisement pour assurer un éclairage en site de 10 à 50 degrés et rester insensible à la polarisation (déformée par l'ionosphère, l'onde arrive avec une polarisation quelconque). Réseau de réception et réseau d'émission doivent être les plus distants possibles (100 km) de manière à bien découpler les signaux et obtenir une bonne directivité en gisement.

Pour ce qui est de la longueur d'onde du radar, celle-ci ne doit pas être trop faible pour éviter les problèmes de réflexion sur l'ionosphère. En réalité, sa valeur variera en fonction de l'heure de manière à s'adapter aux variations de l'atmosphère (soit une fréquence comprise entre 3 et 28 MHz).

Ainsi défini, le système permettra de détecter en moins d'une journée les satellites d'orbites circulaires d'altitudes comprises entre 250 et 1.000 km et d'inclinaisons comprises entre 40 et 140 degrés. Leur localisation s'effectuera ensuite par traitement de l'évolution Doppler du signal reçu, caractéristique de l'orbite du satellite. Un traitement pour lequel l'ONERA développe un code de calcul adapté aux architectures parallèles. ■ CHRISTEL TARDIF



# OFFICE NATIONAL D' ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES

29, av.de la Division Leclerc. Châtillon (Hauts-de-Seine)  
Téléphone: (1) 46 73 40 40 - Télécopie : (1) 46 73 41 41

Adresse postale : BP 72, F - 92322 CHATILLON CEDEX

895 - 15846

## GRAVES : UN CONCEPT NOUVEAU POUR LA SURVEILLANCE DE L'ESPACE

**GRAVES: A NEW CONCEPT FOR SPACE SURVEILLANCE**

T. MICHAL, J. BOUCHARD, J.-P. EGLIZEAUD

Colloque international sur le radar,  
Paris (France), 3-6 mai 1994.

Ce document ne peut être vendu

N° Rubrique : 32

N° DED : 5945

NOTICE: THIS MATERIAL MAY BE  
PROTECTED BY COPYRIGHT LAW  
(TITLE 17 U.S. CODE)

TIRE A PART N° 1994 - 72

## GRAVES: A NEW CONCEPT FOR SPACE SURVEILLANCE<sup>1</sup>

## GRAVES: UN CONCEPT NOUVEAU POUR LA SURVEILLANCE DE L'ESPACE

T. Michal, J. Bouchard  
 ONERA  
 29, Av de la division Leclerc  
 BP 72  
 92322 Châtillon CEDEX

### Résumé:

Tout le monde est maintenant convaincu de l'importance des informations issues de systèmes spatiaux. En conséquence le nombre de satellites en orbite croît régulièrement. A contrario, il faut également être conscient de la menace que font peser de tels systèmes sur l'activité militaire classique. Pour protéger ces activités, il faut disposer de moyens au sol susceptibles d'analyser la menace apportée par ces systèmes spatiaux. Pour mener à bien cette mission, le premier capteur nécessaire est un instrument de veille et de trajectographie, capable de détecter la présence des satellites et d'en calculer la trajectoire. Le projet de radar GRAVES présenté dans cette communication répond à cet objectif. Dans un premier temps, les paramètres de dimensionnement radar sont analysés, la solution technique retenue et les principales performances accessibles sont exposées. Enfin, le calendrier de réalisation d'une maquette probatoire est présenté.

J.P. Eglizeaud  
 ONERA  
 Fort de Palaiseau  
 Chemin des Joncherettes  
 91120 Palaiseau

### Summary:

Everybody is now convinced of the importance of data provided by space systems, especially for military applications. Consequently, the number of active satellites is rapidly growing up as well as their performances. On the other hand, it is also important to be aware of the threat that constitute such space systems on conventional military activity. In order to protect these military activities, it is necessary to develop ground based sensors and systems which allow to control the activity of space systems. In order to fulfil this mission, the very first sensor to develop is a sensor providing detection of satellites and allowing their orbit determination. The GRAVES radar project, here described, is devoted to this mission. First, the main design parameters of such a radar are analysed. Then, the technical description and the mains performances of the radar are exposed. Finally, the planning of development for a scale-1 model of the radar is presented.

### 1. Introduction

Tout le monde est maintenant convaincu de l'importance des informations fournies par les systèmes spatiaux, particulièrement dans le domaine militaire. En conséquence, le nombre des satellites en activité croît de façon régulière alors que, parallèlement, leurs performances s'améliorent. Par ailleurs, il est également important d'être conscient de la menace que constituent ces systèmes spatiaux (observation à haute résolution, Elint, Comint) sur des forces conventionnelles.

Pour protéger ces forces, il est nécessaire de développer un système utilisant des capteurs permettant de contrôler l'activité spatiale. Les principales fonctions que doit remplir un tel système sont les suivantes:

- détection des satellites,
- trajectographie et prédiction des orbites,
- identification de la mission des satellites et évaluation de leurs performances,
- synthèse des informations et transmission aux utilisateurs.

Depuis plusieurs années maintenant, l'ONERA participe aux études visant à la réalisation d'un tel système: études consacrées aux techniques d'orbitographie, aux moyens de veille et d'analyse.

Dans ce contexte, l'ONERA a proposé un projet de radar de veille et de trajectographie dénommé GRAVES spécifiquement dédié à la surveillance de l'activité spatiale. (GRAVES: Grand Réseau Adapté à la Veille Spatiale)

Le radar GRAVES dont une maquette probatoire sera réalisée prochainement, est le fruit d'une étude de faisabilité réalisée conjointement par les équipes "Radar" et "Espace" de l'ONERA pour le compte de la DME. L'idée de ce concept de radar est due Gérard Garnier, Directeur adjoint de la direction des études de

synthèse de l'ONERA. L'intérêt de ce concept a en outre été mis en évidence lors de tests de détection réalisés sur des satellites réels.

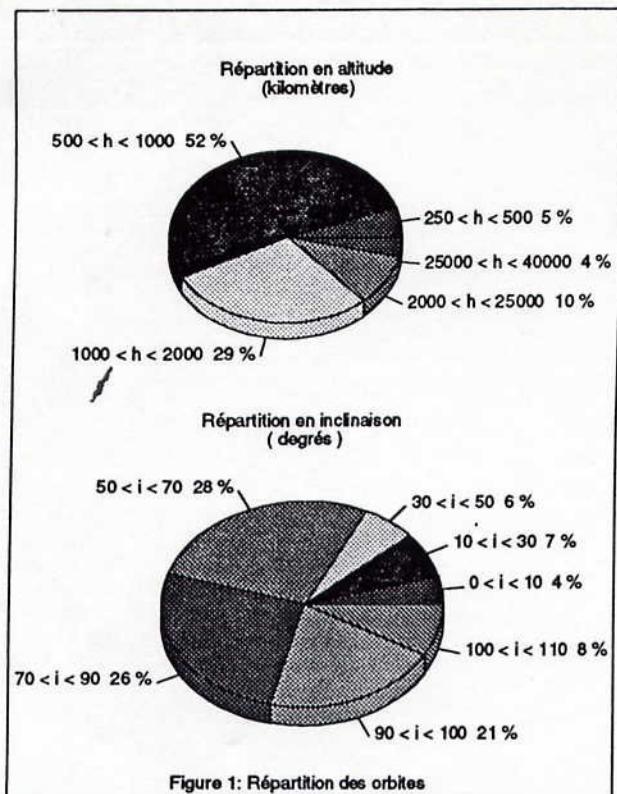
Le but de cette présentation est dans un premier temps de rappeler le contexte de la surveillance spatiale et les hypothèses prises en compte pour le dimensionnement du domaine de détection requis. Puis les principales caractéristiques du radar GRAVES sont détaillées. Enfin, les principales étapes du développement de la maquette probatoire de GRAVES ainsi que les objectifs poursuivis sont présentés.

### 2. Contexte de l'étude

Ce qui caractérise le problème de la surveillance de l'activité spatiale, c'est le nombre très élevé de satellites ou d'objets en orbite ainsi que la très grande diversité des orbites rencontrées. Bien entendu, la surveillance de l'activité spatiale est principalement intéressée au suivi des satellites en activité. Néanmoins, si l'on veut être capable de suivre sans ambiguïté ces objets et de détecter l'arrivée d'un nouveau satellite, il est nécessaire de suivre la totalité des objets en orbite, qu'ils soient actifs ou inactifs.

Sur la base de données issues de la NASA, le nombre d'objets en orbite d'une taille caractéristique supérieure à 10 centimètres s'élève plus de 7000 dont deux à trois centaines seulement de satellites en activité. Les diagrammes ci-après indiquent la répartition en altitude moyenne et inclinaison (angle du plan de l'orbite par rapport au plan équatorial) pour ces satellites. On observe la très grande prédominance des orbites à altitude faible (inférieure à 1000 kilomètres).

<sup>1</sup> Les travaux concernant le radar GRAVES sont financés par la Direction des Missiles et de l'Espace (DME) de la Délégation Générale pour l'Armement (DGA).



Pour dimensionner le radar de veille GRAVES, il a été nécessaire de fixer, compte tenu de ce qui vient d'être vu sur la population de satellites, les principales spécifications souhaitées pour le radar.

Ces spécifications sont les suivantes:

- implantation du radar: France métropolitaine
- détection de satellites jusqu'à 1000 km d'altitude
- délai maximal avant détection: 24 heures
- possibilité de réaliser une première détermination d'orbite en un seul passage

Ces spécifications appellent un certain nombre de remarques:

- La localisation du radar en France Métropolitaine limitera la capacité de détection du radar vis à vis d'orbites très peu inclinées sur l'équateur. On remarque cependant sur la figure 1 que ces orbites sont relativement peu nombreuses.
- La limitation aux altitudes inférieures à 1000 kilomètres permet de suivre plus de 60 % des satellites dont la majorité des satellites les plus menaçants. En outre, une augmentation de ce paramètre à 2000 kilomètres qui permettrait de suivre 85 % des satellites se traduirait par une multiplication par 16 de la puissance d'émission nécessaire.
- Le radar de veille étant le premier maillon de la chaîne conduisant à l'identification de la mission du satellite détecté, il est indispensable de réaliser la détection au plus tôt. Un délai de 24 heures correspond en outre à la valeur minimale accessible en utilisant un seul capteur.
- Il est indispensable de pouvoir déterminer à partir des mesures fournies par le radar de veille, l'orbite du satellite détecté, pour pouvoir reconnaître celui-ci lors des passages ultérieurs. Sinon, il faudrait être capable de désigner en temps réel un radar de trajectographie situé à proximité, ce qui complexifierait beaucoup le système.

### 3. Dimensionnement du domaine de détection

#### 3.1 Choix de la forme du domaine

La forme du domaine de détection est pour une grande part imposée par le fait que l'on souhaite pouvoir réaliser une première

détermination d'orbite en un passage. En effet, si les mesures élémentaires fournissent 3 informations (site, gisement et distance) ou (site, gisement et Doppler), il est nécessaire et suffisant de disposer de deux instants de mesures distincts pour calculer l'orbite correspondant à ces mesures.

De ce fait, le domaine de détection théorique le mieux adapté est constitué d'un volume très mince réparti à la surface d'un cône d'axe vertical. Il est possible alors comme on peut le constater sur la figure 2 d'obtenir systématiquement 2 points de mesure dès qu'un satellite rencontre ce domaine. Par souci de simplification, un tel domaine sera dénommé "nappe de veille" dans la suite de cette communication.

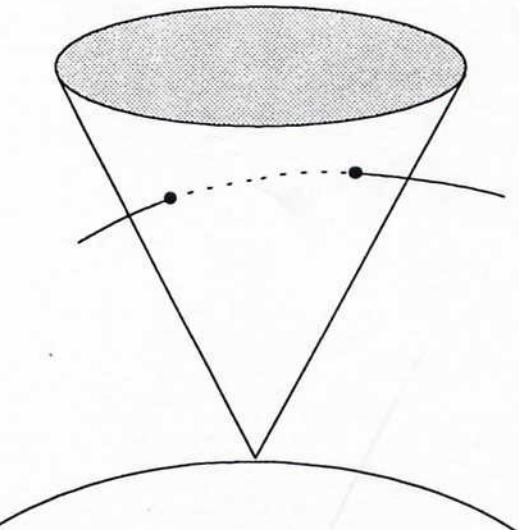


Figure 2

L'épaisseur effective de ce domaine de veille dépend uniquement de la durée d'observation nécessaire pour réaliser une détection compte tenu du traitement envisagé (temps d'intégration).

#### 3.2 Optimisation du dimensionnement

En pratique, une fois choisie la forme générale du domaine de détection, il faut définir précisément ses caractéristiques. C'est à dire dans le cas présent:

- le nombre de nappes de veille,
- le site d'observation de ces nappes,
- la portée dans chaque nappe.

Pour un satellite à une altitude donnée  $h$ , la portée nécessaire à la détection  $D$  est directement liée à l'angle de site d'observation  $s$  suivant la relation suivante où  $R_t$  représente le rayon terrestre.

$$D = \sqrt{R_t^2 \sin^2(s) + h(h + 2R_t)} - R_t \sin(s)$$

Cette formule permet de constater que la distance de détection croît fortement lorsque le site d'observation diminue. A titre d'exemple, un satellite à 1000 km d'altitude est vu à 3200 km de distance sous 5 degrés de site et sous 1350 km de distance à 45 degrés.

A contrario, plus le site d'observation est élevé et plus le délai de détection croît. Sans entrer dans les détails, la figure 3 permet d'illustrer cette situation. Le radar d'observation est situé en métropole. En trait fin est représentée la zone de détection obtenue, pour une nappe de veille orientée à 10 degrés de site (pour des satellites à 300 km d'altitude). En trait gras, le même domaine pour une nappe à 30 degrés. On observe que les traces au sol d'un satellite incliné à 80 degrés et à 300 km d'altitude interceptent le premier domaine mais pas le second. Cela signifie que, quelle que soit la portée du radar, si le domaine de veille est constitué d'une seule nappe conique inclinée à 30 degrés, le délai de détection, pour certaines orbites peut s'avérer nettement supérieur à 24 heures.

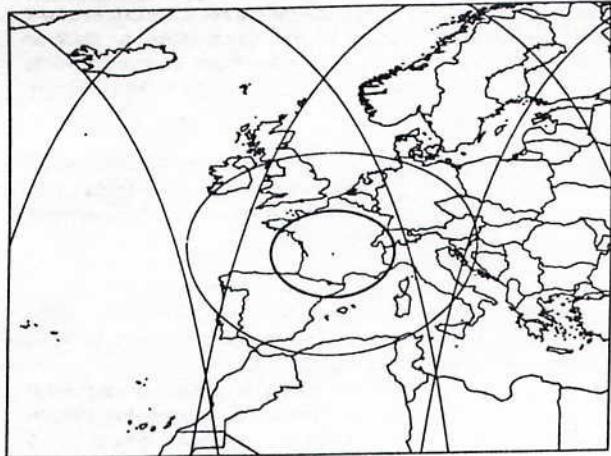


Figure 3: Domaine de détection d'une nappe conique

En outre, il faut noter que le site maximal imposé à la nappe de veille dépend de l'altitude des satellites que l'on souhaite détecter. De façon très simplifiée, il est nécessaire de prévoir un domaine de détection à site d'autant plus faible que les satellites sont bas (de l'ordre 11 degrés pour des satellites à 200 km d'altitude).

Cette contrainte prise en compte avec celle de portée a conduit à proposer dans un premier temps un domaine de veille théorique composé de plusieurs nappes d'axe vertical. En effet, si l'on ne considère qu'une seule nappe mince, il faut l'orienter à site faible pour détecter les satellites bas. Ce faisant, la portée nécessaire est quant à elle imposée par les satellites hauts (1000 km) et doit donc atteindre près de 3000 km.

La solution proposée est constituée de 3 nappes.

- Nappe Numéro 1: site: 11 degrés Portée: 1100 km
- Nappe Numéro 2: site: 25 degrés Portée: 1200 km
- Nappe Numéro 3: site: 35 degrés Portée: 1600 km

Il a été vérifié qu'une telle solution permet à un radar situé en métropole de détecter en moins de 24 heures tous les satellites d'inclinaison suffisante pour être vus depuis la métropole et d'altitude inférieure à 1000 km.

Le paragraphe suivant est consacré à la réalisation pratique d'un système réel de veille.

#### 4. Description du radar GRAVES

##### **4.1 Principe général**

Le principe de détection et les méthodes mises en oeuvre au sein du radar GRAVES reposent pour une grande part sur les réflexions présentées au sein de la communication de M. Appel [1] dans cette même conférence. Nous ne reviendrons donc pas ici sur la justification de ces choix.

Une analyse des techniques d'orbitographie envisageables ayant montré qu'il était possible de déterminer les paramètres d'orbite des satellites détectés à partir de mesures angulaires et Doppler seulement, il a été décidé pour des raisons de simplicité de réaliser un radar à émission continue et détection Doppler.

Il s'agit par conséquent d'un radar bistatique. La distance entre émission et réception doit être de l'ordre de 200 km pour permettre un bon découplage entre les sites tout en assurant des conditions suffisantes pour une visibilité simultanée.

Afin de disposer d'un bilan de liaison favorable, il a été décidé d'opérer à relativement basse fréquence (< 250 MHz). Le choix de la fréquence repose sur des expérimentations préalables réalisées sur des satellites réels. Par ailleurs, il est ainsi possible de disposer d'émetteurs de puissance de coût limité.

Compte tenu de ce choix de fréquence, la précision angulaire requise en site de gisement est obtenue en utilisant un réseau surfacique de grande taille associé à une technique de formation de voies par le calcul.

Les différents éléments constitutifs du radar GRAVES et des traitements associés sont détaillés ci-après.

##### 4.2 Réseau d'émission

Compte tenu des résultats de l'étude théorique concernant le volume de détection requis, la première solution envisagée a consisté à réaliser l'éclairage continu de chaque nappe mince sur 360 degrés en gisement par l'intermédiaire d'antennes réparties sur un réseau linéaire vertical.

Une telle solution présentait cependant un certain nombre d'inconvénients. La majeure partie de ceux-ci provient de la hauteur de mat nécessaire à une telle antenne (30 mètres à 200 MHz): coût de réalisation, modularité, maintenance, couplages inter-émetteurs dans les câbles. Par ailleurs, le problème du pistage des plots détectés semblait relativement délicat. Il faut en effet être capable de relier une mesure réalisée lors de la traversée de la nappe au lever à son homologue réalisée au coucher.

Toutes ces raisons ont conduit à explorer une autre solution (à puissance totale mise en jeu équivalente) basée sur un radar à balayage. La zone scrutée correspond à la zone comprise entre les nappes extrêmes de la solution théorique.

Elle est couverte par un ensemble de 8 faisceaux de 20 degrés d'ouverture en site et 8 degrés en gisement. Chaque faisceau balaye un secteur de 45 degrés en azimuth de façon continue. L'effet global est une rotation continue et à vitesse uniforme des 8 faisceaux. Le nombre de faisceaux ainsi que la vitesse de balayage ont été définis de façon à ce qu'aucun satellite ne puisse traverser cette zone sans passer dans un des faisceaux.

A l'usage, cette méthode présente en outre l'avantage de fournir davantage de mesures et de faciliter le pistage.

Chaque faisceau est généré par un panneau d'antennes alimenté par un nombre égal d'émetteurs de puissance. Chaque antenne est pilotée en phase de façon à focaliser le faisceau et assurer le balayage en gisement. Compte tenu des caractéristiques des faisceaux d'émission la portée maximale nécessaire est de 1700 km.

La figure 4 ci-après permet d'illustrer le principe de fonctionnement du radar GRAVES. Les sites d'émission et de réception sont supposés situés au centre de la France. Pour faciliter la lecture, deux faisceaux d'émission seulement sont représentés ainsi que deux faisceaux de réception.

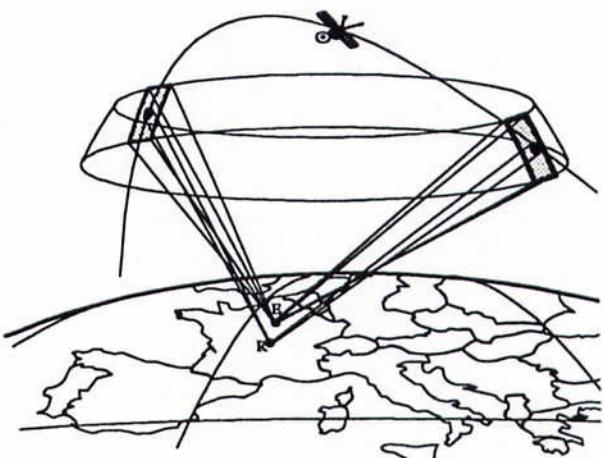


Figure 4: Illustration du fonctionnement du radar GRAVES

### **4.3 Réseau de réception**

Le réseau de réception est constitué d'un réseau plan de contour circulaire comprenant 200 antennes élémentaires. La répartition des antennes au sein de ce réseau est optimisée de façon à minimiser les lobes secondaires.

Chaque antenne élémentaire doit être omnidirectionnelle en gisement et assurer une éclairage en site entre 10 et 50 degrés environ. L'utilisation d'un jeu de phases adéquat permet de former un faisceau de réception fictif dans n'importe quelle direction.

Dans le cadre du projet GRAVES, le nombre de directions à scruter est rendu relativement important (plusieurs centaines) du fait du caractère bistatique du radar.

L'application du jeu de phases en réception étant réalisée par calcul au sein du traitement de signal toutes les directions peuvent être scrutées simultanément.

### **4.4 Traitement de signal et de mesures**

#### **4.4.1 Traitement de signal**

Le signal utile apparaissant en sortie des récepteurs est perturbé par deux signaux parasites inévitables:

- le bruit dans la bande Doppler utile
- le trajet direct correspondant à la récupération du signal émis par les lobes secondaires du panneau d'émission.

Suivant les situations (distance, SER) le rapport du signal au bruit ou au trajet direct peut évoluer dans une large fourchette (de l'ordre de -40 à +20 dB). Le traitement de signal a pour but de détecter le signal utile et de lui associer un ensemble de paramètres caractéristiques des mesures (Doppler et angulaires).

Avec les hypothèses prises en compte, l'extraction du signal du bruit peut être réalisée par un traitement cohérent sur une seconde (si l'on veut disposer dans tous les cas d'un rapport signal à bruit d'au moins 13 dB en sortie de traitement). Il s'avère que cette procédure nécessite un volume de calcul difficilement compatible avec les possibilités ces calculateurs temps réel actuellement disponibles. En conséquence, il a été prévu un traitement cohérent sur 0,2 seconde suivi d'un traitement incohérent sur 3,2 secondes (16 fois 0,2 s). L'ensemble des deux opérations équivaut à un traitement cohérent sur une seconde tout en réduisant le volume de calcul. Le traitement du signal se décompose en 5 grandes parties qui sont détaillées ci-après:

**Formation de voies réception (F.V.R):** Comme il a été indiqué précédemment, il est nécessaire de générer plusieurs centaines de faisceaux de réception pour observer toute la zone utile. La formation d'un faisceau fictif est obtenue en déphasant convenablement chaque sortie de récepteur puis en sommant les 200 signaux ainsi déphasés. En réalisant en parallèle toutes les formations nécessaires, on dispose d'un ensemble de N signaux correspondant chacun à une direction de l'espace.

**Traitement cohérent sur 0,2 s:** Il est obtenu par corrélation des signaux issus de la F.V.R. avec un jeu de rampes de fréquence préenregistrées (répliques). Cette corrélation est réalisée par transposition par la rampe puis en appliquant une F.F.T. sur le résultat obtenu. Le nombre de répliques nécessaires est proportionnel à l'accélération radiale maximale des satellites ainsi qu'au carré du temps d'intégration et inversement proportionnel à la longueur d'onde du signal émis. Dans cette opération, le signal parasite provenant du trajet direct joue un rôle perturbateur en polluant une partie des cases Doppler. Ceci entraîne la nécessité d'un découplage maximal entre les bases et la réjection de ce signal parasite préalablement à tout traitement.

**Traitement incohérent sur 3,2 s:** Il permet d'affiner la connaissance de l'accélération radiale et de remonter effectivement à la mesure de vitesse radiale. Il consiste à associer par 16 puis à sommer les cases résultant de la F.F.T. effectuée lors du traitement cohérent après en avoir calculé les modules.

**Extraction:** Elle permet, en comparant le signal obtenu en sortie de traitement incohérent à un seuil autoadaptatif, d'extraire les plots utiles et les paramètres associés.

**Ecartométrie:** Les résultats issus de l'étage d'extraction ne permettent pas de connaître les paramètres liés à la cible avec une précision suffisante. Il est donc nécessaire de mettre en place un processus d'écartométrie, basé sur la technique de monopulse de phase, qui permet d'améliorer la précision des paramètres Doppler et angulaires.

**4.4.2 traitement de mesures** A l'issue de la phase de traitement de signal les mesures affinées après écartométrie sont traitées pour calculer les paramètres orbitaux du satellite venant d'être détecté. Ce traitement est réalisé en deux phases:

- il faut dans un premier temps réaliser le pistage des mesures, c'est à dire rassembler toutes les mesures issues d'un même satellite. Le logiciel correspondant est en cours d'étude à l'ONERA en collaboration avec Thomson/SDC.
- Une fois les mesures rassemblées en pistes, un algorithme développé par l'ONERA permet d'estimer, en fonction des mesures Doppler bistatique et des mesures angulaires issues de la réception, les paramètres orbitaux du satellite détecté. La matrice de covariance représentative de la précision de cette estimation est simultanément évaluée.

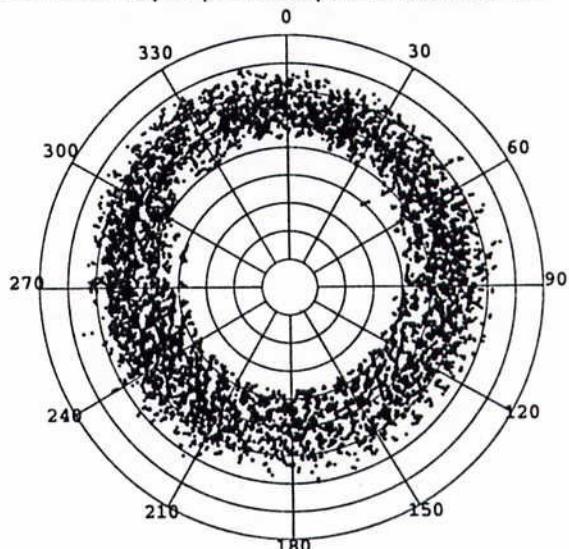
### **4.5 Performances en détection**

Préalablement au développement d'une maquette probatoire du radar GRAVES, une analyse en simulation prenant en compte les principales caractéristiques du radar a été réalisée. Cette simulation permet de prendre en compte:

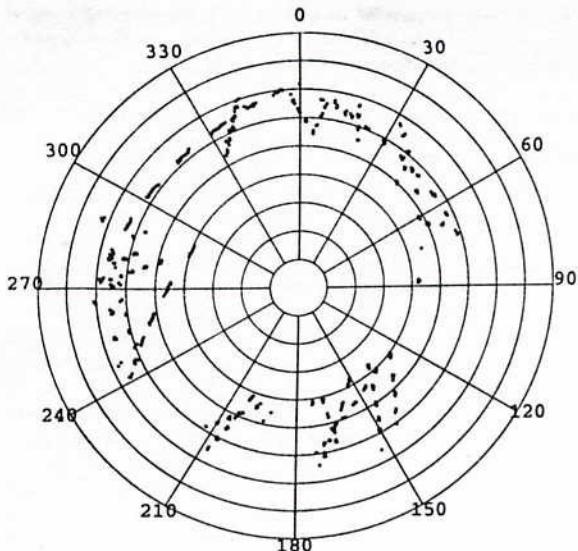
- la dynamique des cibles,
- la modélisation des faisceaux d'émission (lobe, balayage) et de réception
- le bilan de liaison requis.

En sortie, ce simulateur est capable de générer, pour une population de satellites donnée, les pistes de mesures obtenues sur les satellites détectés. La précision des mesures est évaluée en fonction du bilan de liaison et des caractéristiques du réseau de réception.

Les figures 5 et 6 permettent de visualiser le type de pistes qu'aura à traiter le radar GRAVES. Sur la figure 5 sont représentées toutes les mesures angulaires réalisées par GRAVES pendant une heure sur une population réaliste de 5500 satellites. La figure 6 représente quant à elle les pistes issues des satellites en cours de passage. Chaque point est une représentation polaire d'une mesure. Le centre du cercle correspond au zénith, sa circonférence à l'horizon. On observe sur la figure 5 une disparité dans la répartition des mesures. Ce phénomène provient de la disposition Nord-Sud de l'émetteur et du récepteur prise en compte dans cette simulation.



**Figure 5:** Mesures réalisées par GRAVES en une heure  
(Simulation: 5500 satellites, cadence de mesure: 1s)



**Figure 6:** Exemples de pistes obtenues par GRAVES à un instant donné  
(Simulation: 5500 satellites, cadence de mesure: 1s)

En association avec les logiciels de détermination d'orbite, un tel simulateur a permis de valider le concept proposé vis à vis de populations réalistes de satellites. Les principaux paramètres accessibles grâce à ces simulations concernent:

- les délais de détection,
- les durées d'observation,
- le nombre de mesures,
- la précision d'orbitographie.

La figure 7 ci-dessous permet de juger de la performance du radar vis-à-vis d'une population de satellites donnée. Il s'agit d'orbites circulaires dont l'altitude figure en abscisse et l'inclinaison en ordonnée. Les niveaux de gris permettent de représenter le délai maximal de détection obtenu pour de telles orbites pour la configuration nominale du radar. La simulation correspondante a été réalisée sur 50 jours.

#### 5. Développement d'une maquette du radar

La DME a confié à l'ONERA la maîtrise d'oeuvre de la réalisation d'une maquette probatoire du radar GRAVES.

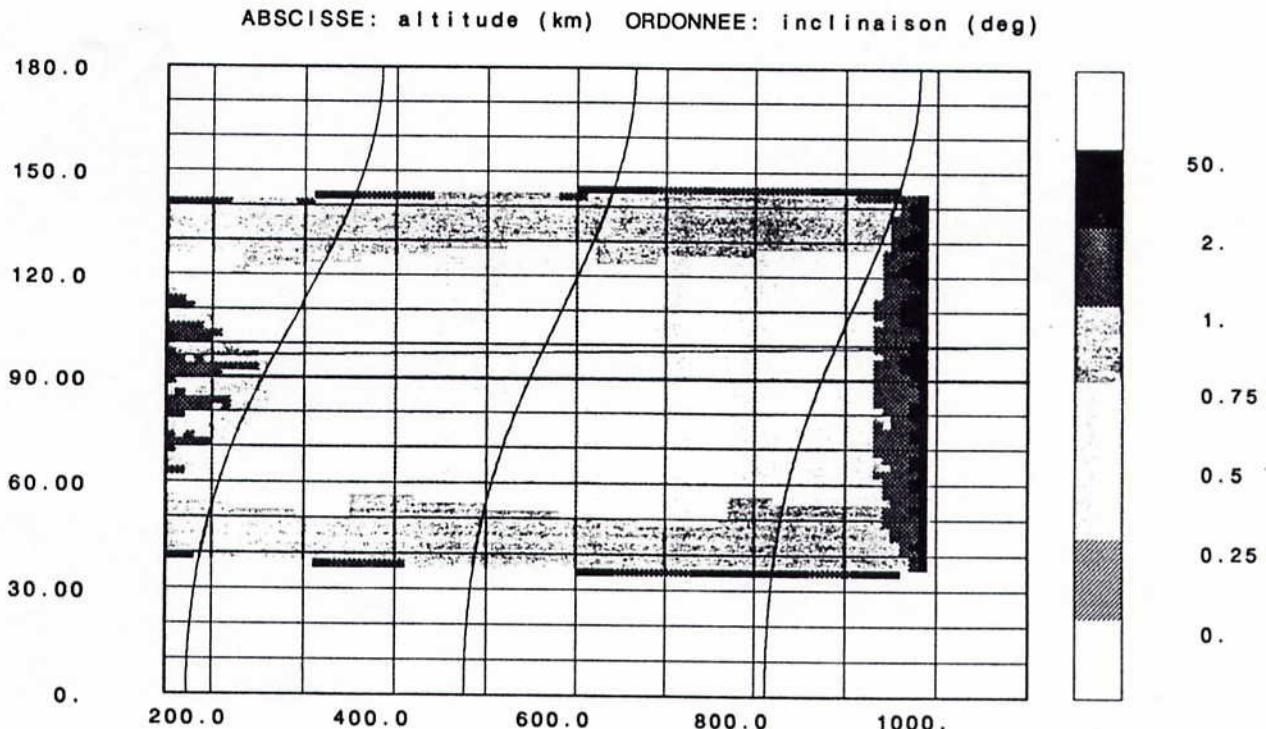
La réalisation visée est une maquette en vraie grandeur permettant de valider expérimentalement les résultats théoriques issus de l'étude de faisabilité.

Pour ce faire, la maquette réalisée par l'ONERA aura les caractéristiques suivantes:

- **Réseau d'émission:** deux panneaux d'émission sur les huit prévus pour le radar définitif seront réalisés.
- **Réseau de réception:** 100 antennes et 100 chaînes de réception seront implantées au lieu des 200 prévues pour le radar.
- **Traitements de signal:** l'ensemble des fonctions prévues pour le radar définitif sera développé sur la maquette. Seule la taille du calculateur sera réduite compte tenu de la réduction du nombre de chaîne de réception et de faisceaux de réception.
- **Traitements de mesures:** l'ensemble des logiciels permettant de traduire les mesures en paramètres orbitaux sera développé et implanté sur la maquette.

La réduction du réseau d'émission aura pour conséquence une diminution de la fréquence des observations ainsi que de la durée moyenne des pistes. Cependant, le fait de disposer de 2 faisceaux d'émission permettra de juger de l'intégralité des capacités de pistage et d'orbitographie pour un nombre limité de passages de satellites relativement favorables.

La réduction du réseau de réception se traduira par une diminution de 3 dB du bilan de liaison et limitera donc la classe de satellites observables (taille plus importante ou altitude plus faible).



**Figure 7:** Délai maximal de détection (jours)  
(Durée de simulation: 50 jours)

En conséquence, on disposera d'un moyen de juger de toutes les capacités annoncées au niveau de l'étude de faisabilité.

En outre, la division Thomson/SDC sera associée au développement et à l'expérimentation de cette maquette de façon à pouvoir déterminer au mieux les spécifications du radar préopérationnel.

La première phase de réalisation sera consacrée à l'approvisionnement des sous-ensembles constitutifs du radar auprès des industriels compétents et à la réalisation des travaux d'infrastructure. Les sous ensembles concernés sont les suivants:

- émetteurs de puissance,
- antennes d'émission,
- antennes de réception,
- récepteurs,
- calculateur de traitement de signal.

Parallèlement à ces fabrications, des études concernant les points suivants seront engagées et les développements correspondants réalisés:

- chaîne de commande de l'émission,
- synchronisation émission,
- calibration émission et réception,
- logiciel de traitement de signal,
- logiciels de traitement de mesures (pistage et orbitographie)

La phase suivante sera dédiée à l'intégration et au test des sous-ensembles.

Enfin, la dernière phase sera consacrée à l'expérimentation d'ensemble de la maquette du radar. Cette phase permettra de valider de concept et d'affiner les performances accessibles avec un tel moyen.

Par ailleurs, une phase d'étude consacrée à la simulation d'ensemble du radar sera menée simultanément au développement de la maquette radar. Cette simulation servira de moyen de comparaison et d'analyse. A l'issue de l'expérimentation, le simulateur développé sera utilisé pour analyser plus finement les performances envisageables pour le radar définitif sur la base des résultats de l'expérimentation.

## 6. Conclusion

La surveillance des activités spatiales depuis le sol apparaît de plus en plus comme une nécessité d'autant plus impérieuse que le nombre et les performances des satellites en orbite croissent de façon sensible. Dans ce contexte, l'ONERA conduit depuis plusieurs années sous l'égide de la DME et en collaboration avec les industriels compétents des études visant à doter la France d'un système permettant un suivi régulier des activités spatiales.

Le radar GRAVES présenté au sein de cette communication est le premier maillon d'un tel système puisqu'il a pour vocation d'assurer la détection et la trajectographie des satellites.

Sa conception est le fruit d'une collaboration étroite entre les équipes spécialisées en techniques radars d'une part et en mécanique spatiale d'autre part. Sa principale originalité provient de ce qu'il a été conçu spécifiquement pour répondre au besoin précis de la détection de satellites.

Plus précisément, ce radar a été dimensionné de façon à détecter tout satellite d'altitude inférieure à 1000 km en moins de 24 heures. En outre son volume de détection a été prévu de façon à fournir suffisamment de mesures pour permettre une détermination d'orbite de tout satellite détecté lors de son premier passage en visibilité.

La technique utilisée (radar bistatique à émission continue, détection Doppler et formation de faisceaux par le calcul) ressort d'une analyse comparative menée par l'ONERA de diverses techniques envisageables [1]. En outre, les simulations réalisées ont permis de prouver qu'il est possible de se dispenser de mesures de distance (plus complexes à obtenir) et de réaliser une orbitographie de bonne qualité à partir de mesures angulaires et Doppler seulement.

La DME a accordé à l'ONERA la maîtrise d'oeuvre pour la réalisation d'une maquette probatoire du radar GRAVES. Cette maquette qui se caractérise par un volume de détection limité et un réseau de réception allégé permettra néanmoins de mettre en évidence les capacités du radar GRAVES. En particulier, les problèmes liés à l'évaluation du bilan de liaison réel, au traitement de signal et à l'orbitographie pourront être analysés en vraie grandeur. En outre, la division SDC de Thomson/CSF est associée au développement de cette maquette pour tirer les enseignements de cette expérimentation et faciliter la transition vers la réalisation d'un moyen opérationnel.

## Références

[1] J. Appel, 'Quel concept pour les radars de veille très longue portée futurs?', dans Actes du colloque international sur le Radar, Paris, 3-6 mai 1994.

[2] T. Michal, 'Traitements orbitographiques pour la surveillance de l'activité spatiale', dans Actes de la journée d'étude SEE "détection et localisation spatiales", Chatillon, 3 février 1993

[http://www.cosis.net/abstracts/COSPAR2006/01801/COSPAR2006-A-01801.pdf?  
PHPSESSID=a7635c3bc61df775d2d7bad5bc53d3ff](http://www.cosis.net/abstracts/COSPAR2006/01801/COSPAR2006-A-01801.pdf?PHPSESSID=a7635c3bc61df775d2d7bad5bc53d3ff)

## Conceptual Design of a European Space Surveillance System

T. Donath (1), T. Michal (1), X. Vanwijck (1), B. Dugrosprez (1), T. Flohrer (2), T. Schildknecht (2)

1. ONERA, Châtillon, France, (2) AIUB, Bern, Switzerland

Space Surveillance denotes the task of systematically surveying and tracking all objects above a certain size and maintaining a catalogue with updated orbital and physical characteristics for these objects. Space Surveillance is gaining increased importance as the operational safety of spacecraft is depending on it. Presently, Europe has no operational capability for Space Surveillance, and is strongly dependant on external information from the USA and Russia.

Two design studies for a European Space Surveillance System (ESSS) were conducted for ESA since 2002. These studies have proposed a system covering the LEO, MEO and GEO orbit regions. This system associates dedicated sensors with the required survey strategies allowing for the autonomous maintenance of an orbital parameters catalogue (including cold start capability).

Concerning the LEO surveillance system, the main findings are the following:

- For the surveillance of objects larger than 10 cm, a survey strategy using a UHF bistatic radar with a large field of view ( $20^\circ$  in elevation and  $180^\circ$  in azimuth) and a long range (1500 km for a 10 cm sphere) is proposed. This proposition is based on the French experience with the GRAVES system development. An interesting European location for this radar would be Spain.
- The optimal frequency for the detection of such objects is around 600 MHz (UHF). This option is very risky from the point of view of frequency allocation, since it is reserved for TV broadcasting. The 435 MHz frequency (UHF also) appears to be a good alternative in terms of implementation risk, detection performance and cost.
- Since this radar is based on a continuous wave transmission, the proposed European surveillance radar is bistatic (one site for transmission and one site for reception). With respect to GRAVES, its design has considerably evolved, decreasing both complexity and cost.
- The LEO surveillance system will be capable of cataloguing 98 % of the LEO objects contained in the US catalogue.

Concerning the GEO surveillance system for objects larger than 1 m, a combined survey and tasking strategy is proposed. Four sites equipped with survey and tasking telescopes are proposed. It is estimated that such a system would be capable of maintaining 95 % of the GEO objects contained in the US catalogue.

Concerning the MEO region that will soon gain more importance for Europe due to the GALILEO system deployment and the surveillance of objects larger than 1 m, the main findings are the following:

- MEO space surveillance shall follow a strategy similar to GEO's, a combined survey and tasking strategy. Two sites (chosen from the four GEO's sites) are necessary for MEO survey, each one equipped with a dedicated MEO survey telescope. MEO tasking observations will be carried out in combination with GEO tasking observations by the previously proposed GEO telescopes.
- Depending on the efficiency of the MEO survey sensors, 89% of the US catalogue can be covered after 2 months using standard detector technology, while 95% can be covered after 1 month using innovative, demanding detector technology.

A development plan for the ESSS is proposed with 3 phases (demonstration for the UHF radar, pre-operational for the LEO and GEO systems and operational). A cost evaluation for the complete system is given.

<http://www.spaceref.com/news/viewsr.html?pid=12607>

France in Space #261

STATUS REPORT

Date Released: Monday, April 19, 2004

Source: France in Space

*[deletia]*

ONERA (French Aerospace Research Center) will develop a new radar system network aimed at space surveillance and that will be able to detect objects 25 cm in size from a distance of 1000 km.  
[La Lettre de l'Expansion 05/04/2004]

<http://www.cdi.org/friendlyversion/printversion.cfm?documentID=2201#8>

CDI Space Security Updates #9.2004 ~ May 6, 2004

#### 8. Europe developing new space surveillance tools

La Lettre de l'Expansion reported April 5 that the French Aerospace Research Center ONERA is expected to develop a new radar system network for space surveillance that will be able to detect objects 25 cm in size from a distance of 1000 km. ONERA's website further stated that this system will be an expansion of the current GRAVES space surveillance radar, and "will enable France to draw up an exhaustive list of all satellites flying over its territory and to track them."

(La Lettre de l'Expansion, April 5; ONERA Annual Report, 2000)

<http://www.isrjournal.com/story.php?F=844993>

## Europe Interested in Its Own Space Surveillance Network

By PETER B. de SELDING, PARIS

May 12, 2005

European governments are showing increased interest in sharpening their space-surveillance capacity by linking existing ground radars and optical telescopes into a network to reduce their current near-total dependence on the United States, government and industry officials said.

These officials said that given the difficulty of rounding up sufficient resources for a dedicated space-surveillance network, a more likely scenario is linking independent systems operating or in development in Germany, Britain, France, Spain and elsewhere.

A recent report to the commission of the 25-nation European Union said stitching together a single network from existing facilities would cost about 300 million euros (\$392 million), with annual operating costs of perhaps 70 million euros.

Officials said securing funding for such a network could be facilitated by selling it as a dual-use system that would track orbital debris and monitor which satellites are passing over European territory. This would make it a more attractive candidate for funding under the European Commission's recently approved program for space and security research. The report, submitted in March to the European Commission and approved by all EU member nations, makes the case for such a program.

Europe currently depends on the U.S. Space Command for information about orbital debris, and government authorities reviewing the data have expressed concern that this dependence will leave them in the dark about the increasing number of classified orbital assets.

"Even with our limited means we have seen things up there that the U.S. apparently doesn't want us to see," said French Air Force Col. Yves Blin, head of the space office at the French Joint Military Staff. "It's not just the big Keyhole [optical reconnaissance] satellites. It's other things as well. The point is we need to understand what's going on over our heads."

Luca Del Monte, security policy officer at the European Space Agency, said the agency is considering how best to erect a kind of "space fence" that would capture, in images, all objects flying over Europe.

"We fully support the need for this," Del Monte said here April 27 during the "Military Space: Questions in Europe" conference organized by the French Aeronautical and Astronautic Federation. "The question is: How do we implement it? Ground-based sensors could get 96 or 97 percent of the catalog of space objects by improving our existing radars and upgrading them. For the remaining 3 percent, maybe you need a space-based sensor."

Several officials said backers of a space-surveillance system will need to finesse the likely criticism that such a network is a backdoor way of building a space-based missile-defense system, which the EU member nations are not ready to support.

Ralf Klaedtke of EADS Space Transportation in Germany, said Europe's current ground-based observation systems are capable of monitoring space only for brief moments. He said this is sufficient for tracking large, passive objects in low-Earth orbit, but of little use in following what is happening in the higher geostationary orbit, or in monitoring any vehicle that maneuvers.

"Geostationary orbit is where you find the sensitive communications satellites and other ISR [intelligence, surveillance, reconnaissance] capabilities," Klaedtke said. "If there is some anti-satellite weapon in space, or if arms proliferation is occurring in space, you want to know."

Klaedtke said that in addition to assembling the French land-based Graves and shipborne Monge systems together with the German FGAN Tracking and Imaging Radar and other existing European sensors, the European Automated Transfer Vehicle (ATV) could be fitted with a camera for space-based surveillance.

The ATV is an unmanned space tug designed to carry supplies to the international space station every 18 months or so. Once unloaded, it is separated from the station and then destroyed upon atmospheric re-entry. Instead of being immediately disposed of, Klaedtke said, the ATV could be fitted with an imager and kept in low-Earth orbit for up to two years to track space objects and debris.

<http://www.isrjournal.com/story.php?F=1646625>

ESA Places Priority on Space Surveillance  
By PETER B. De SELDING, BRUSSELS  
March 27, 2006

Space surveillance, harmonized national Earth observation ground networks and data-relay satellites are the three priority research areas for the European Space Agency (ESA) in the field of security-related work, according to Luca Del Monte, policy officer of the agency's security policy office.

Del Monte said ESA is positioning itself to invest in several research areas that are inherently dual-use as it seeks an admittedly back-stage role in Europe's emerging security and defense policy.

Addressing the Milspace 2006 conference organized by the SMi Group here March 8-9, Del Monte said ESA believes that space situation awareness — knowing what satellites are flying over European territory — is becoming of concern to several European governments.

Ground-based sensors already are operational or planned in France and Germany, but to date there has been no coordinated European program to survey the space environment.

"What we are looking at is a global situation awareness," Del Monte said. "Because we are ESA, it has to be dual-use from the outset. There would be multiple users."

ESA and the European Commission, which is the executive arm of the 25-nation European Union, are working to coordinate their investment in space development, and space-based security research is one of the priority areas expected to receive substantial funding in the European Union's next multiyear research program.

*[deletia]*

# Les perspectives d'avenir pour les équipements au sol

Thierry MICHAL

ONERA

thierry.michal@onera.fr

## 1. Mission et organisation d'un système de surveillance de l'espace

### 1.1. Principales fonctions

Les besoins en terme de moyens sols sont déduits d'une analyse préalable des principales fonctions assurée par un système de surveillance de l'espace. Il est clair qu'un tel système doit permettre :

- ✓ de détecter, puis de suivre régulièrement les objets en orbite (paramètres orbitaux),
- ✓ d'identifier l'origine de ces objets (site de lancement, propriétaire),
- ✓ d'en fournir les caractéristiques techniques minimales (taille, masse, etc.).

La constitution d'une base de données constamment remise à jour de ces principales données permet en effet de répondre aux interrogations premières des utilisateurs d'un tel système.

### 1.2. Quelle zone de surveillance (altitude, inclinaison) ?

La définition des besoins en terme de capteurs pour la surveillance de l'espace nécessite de définir la zone de l'espace que l'on souhaite observer de façon prioritaire. En effet, cette zone définit un volume à surveiller dont les caractéristiques en terme d'angle solide et d'altitude maximale influencent très fortement sur les performances des capteurs nécessaires. La figure ci-dessous (Fig. 1) permet d'observer la répartition actuelle des objets (satellites et débris) en orbite d'une taille suffisante (plus de 10 à 30 cm de taille caractéristique) pour faire l'objet d'un suivi régulier. On observe une très forte proportion d'objets situés en orbite basse ainsi qu'une concentration d'objets situés sur des orbites quasi-géostationnaires. Plus précisément, 84% des objets ont une altitude de périgée inférieure à 2000 km et 70% ont une altitude d'apogée inférieure à 2000 km.

On voit clairement deux zones d'intérêt se dessiner : la première relative aux orbites basses (< 2000 km) et la seconde relative à l'arc géostationnaire.

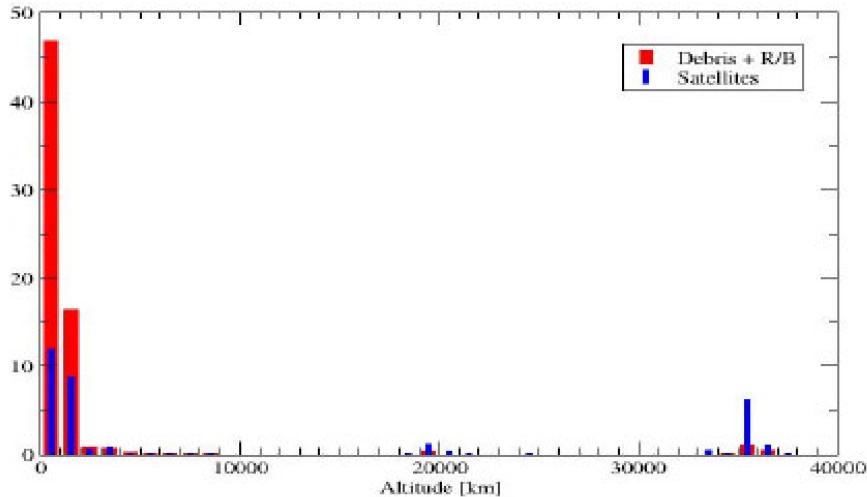


Fig. 1 Histogramme de répartition des objets en orbite en fonction de leur altitude de périgée  
(Source Satellite Situation Report)

Dans le cadre de cette courte présentation on se focalisera essentiellement sur la problématique du suivi des objets en orbite « basse » (moins de 2000 km d'altitude) qui constituent la grande majorité de la population. La surveillance de l'arc géostationnaire n'en constitue pas moins un objectif important compte tenu de son intérêt stratégique. Cependant elle fait d'ores et déjà l'objet de nombreuses expérimentations en Europe, que ce soit sous l'égide de l'ESA ou du CNES. Ces expériences ont démontré que la mise en œuvre de télescopes optiques permet d'assurer la détection et le suivi des objets situés sur des orbites géostationnaires ou quasi géostationnaires.

### 1.3. Taille des objets

Outre la distance d'observation évoquée précédemment, la taille des objets qu'il s'agit de suivre constitue également un élément fort de dimensionnement des capteurs sols, quelle que soit leur mission.

La figure ci-après (Fig. 2) présente la répartition en terme de surface équivalente radar des objets régulièrement suivis par le système de surveillance américain.

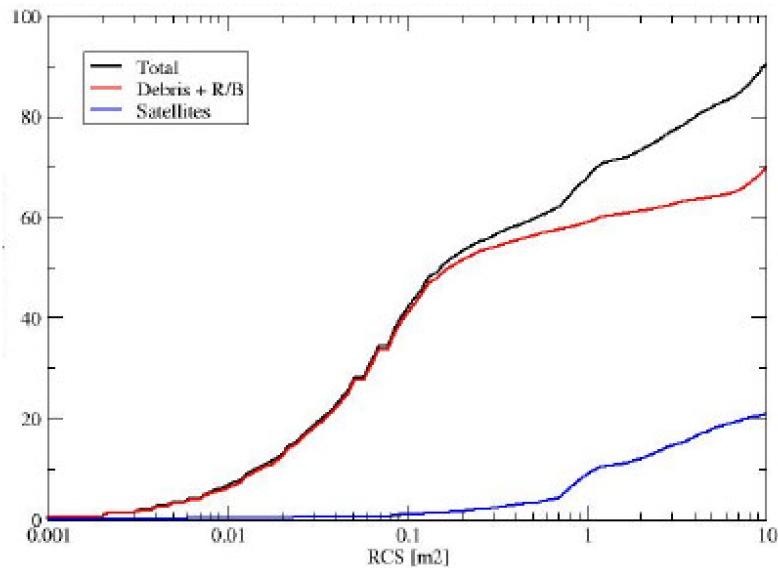


Fig. 2 Histogramme de répartition des objets en orbite en fonction de leur SER  
(Source Satellite Situation Report - RCS)

Il est clair qu'un tel schéma ne saurait donner la répartition réelle des objets en orbite dans la mesure où il est limité de fait aux objets dont la taille est suffisante pour être suivis par le système américain. Néanmoins, il est intéressant de noter que près de 40% des objets ont une SER inférieure à 0.1 m<sup>2</sup>. Par ailleurs, il est également connu que des objets d'une taille caractéristique de l'ordre du centimètre peuvent causer des dégâts importants en cas de collision avec un satellite actif compte tenu des vitesses relatives très élevées. Il est donc évident que l'objectif d'un futur système de surveillance sera de détecter, dans un premier temps, des objets de taille caractéristique inférieure à 10 cm et viser à terme la détection d'objets de l'ordre du centimètre.

## 2. Capteurs requis

### 2.1. Capteurs de veille

Comme indiqué précédemment, la mise en place d'un système de surveillance requiert de disposer de capteurs de veille dédiés susceptibles de détecter les objets sans aucune information a priori. Cette tâche est certainement la plus complexe à assurer car elle nécessite des capteurs dotés d'un très large volume de détection. On se propose dans un premier temps de faire un point sur les capteurs existants ou en cours de développement en Europe. Puis on indiquera les efforts supplémentaires qu'il convient de réaliser pour disposer d'un système réellement en adéquation avec les besoins de la surveillance de l'activité spatiale.

Deux types de capteurs sont envisageables pour assurer la veille spatiale : d'une part des capteurs électromagnétiques, d'autre part des capteurs optiques.

### 2.1.1. Capteurs de veille radar

À l'heure actuelle, il n'existe pas en Europe de capteur de veille spatiale opérationnel. Par contre, une maquette probatoire d'un tel capteur a été réalisée en France

Le radar GRAVES (Fig. 3), réalisé sous contrat de la DGA, est un radar spécifiquement dédié à la surveillance de l'espace. Il a été conçu pour assurer la détection et le suivi des satellites en orbite jusqu'à 1000 km d'altitude.

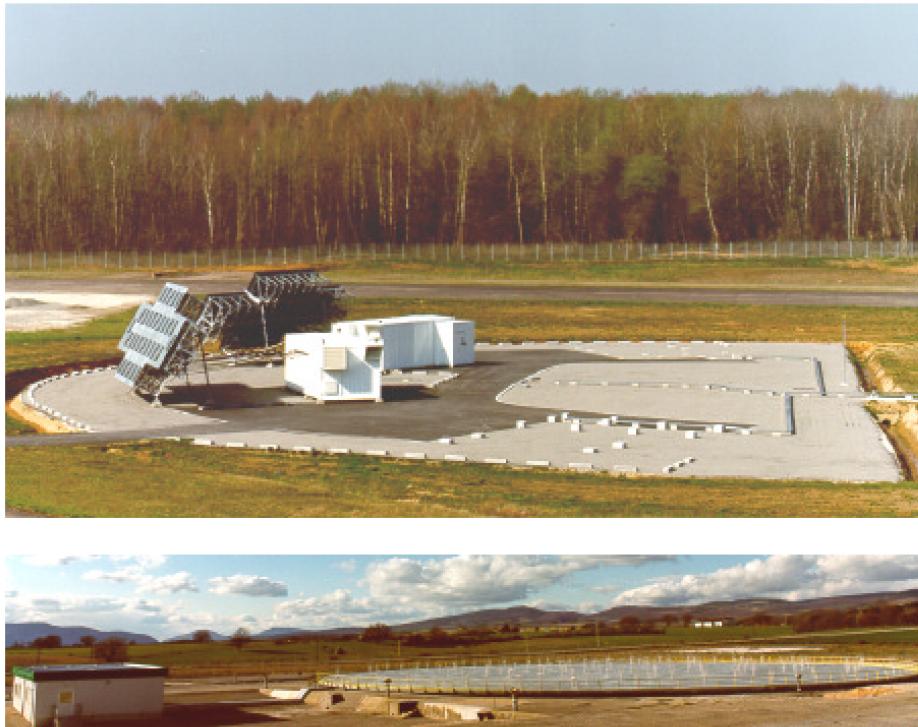


Fig. 3 Vue des sites d'émission et de réception du radar GRAVES

Le radar GRAVES est un radar à émission continue et à détection Doppler fonctionnant en bande VHF. L'utilisation d'une émission continue conduit à un radar bistatique (émission et réception sur des sites distincts).

L'émission est assurée par réseau phasé et la réception par une technique de formation de faisceau par le calcul. La maquette probatoire développée par l'ONERA comprend deux panneaux d'antennes d'émissions dont chacun permet de couvrir  $45^\circ$  en azimut par balayage en une vingtaine de secondes d'un faisceau de  $8^\circ$  d'ouverture en azimut et  $20^\circ$  d'ouverture en site. La zone couverte s'étend donc sur  $90^\circ$  en azimut. La taille des faisceaux et la vitesse de balayage ont été dimensionnées pour assurer la détection de tous les satellites traversant le faisceau d'émission

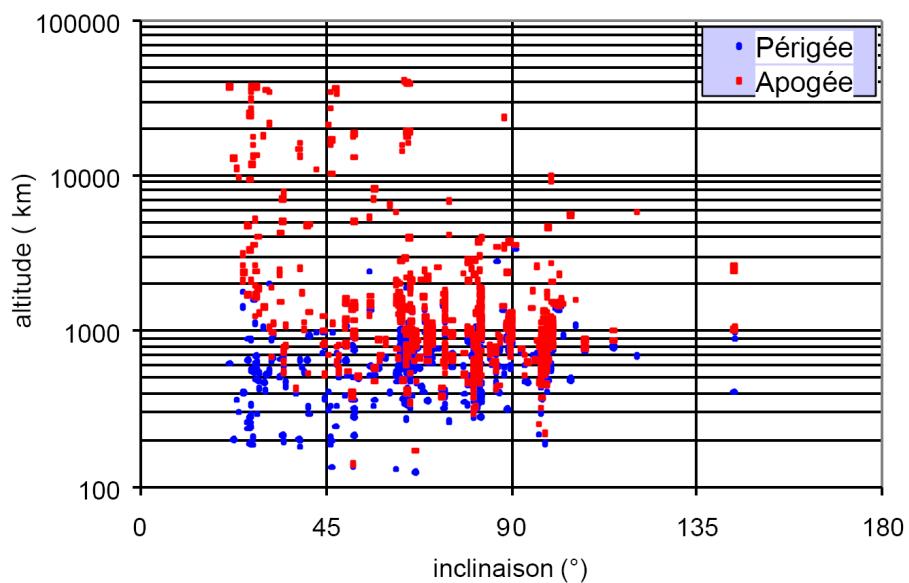
Le réseau de réception est constitué d'un ensemble de 100 antennes réparties sur un disque métallique formant plan de sol. Chaque antenne est reliée à un récepteur individuel dont les signaux sont ensuite numérisés. L'addition, en phase, de tous les signaux issus des antennes de réception conduit à la création d'un faisceau de réception vertical équivalent à celui qui serait créé par une antenne unique de taille égale au disque sur lequel sont réparties les antennes (soit une ouverture de l'ordre de  $2^\circ$ ).

Cependant, les signaux issus de chaque antenne étant numérisés, il est possible d'affecter au signal issu de chaque antenne un déphasage spécifique. Le choix d'un jeu de phase adapté permet alors de créer un faisceau orienté selon n'importe quelle direction (et non plus seulement à la verticale). Cette technique de formation de faisceau par le calcul (FFC) permet, sous réserve de disposer d'un calculateur en temps réel suffisamment puissant, d'observer simultanément l'ensemble des directions potentiellement éclairées par l'émission.

La détection des satellites est ensuite assurée par une technique de détection Doppler en procédant à la transformée de Fourier du signal issu de la FFC après corrélation avec une réplique préenregistrée destinée à corriger la variation de Doppler durant le temps d'intégration.

Vis-à-vis des besoins évoqués précédemment (suivi jusqu'à 2000 km d'altitude d'objets dont la taille caractéristique est inférieure à 10, voire à 5 cm), il est clair que ce capteur, dédié au suivi des satellites, ne peut faire face qu'à une partie seulement des besoins exprimés. On peut néanmoins observer ci-dessous, (Fig. 4) qu'il permet de disposer d'une capacité réelle de veille puisque la campagne d'octobre 2002 a permis de détecter plus de 2235 objets qui se répartissent (selon la corrélation réalisée avec les données de la NASA) de la manière suivante :

- ✓ 1139 satellites,
- ✓ 756 étages de lanceurs,
- ✓ 340 débris.



*Fig. 4 Répartition des objets détectés par GRAVES  
(campagne de mesure octobre 2001)*

À l'heure actuelle, le système GRAVES est en cours d'extension avec un objectif de mise en service opérationnelle courant 2005. Cette extension comprend :

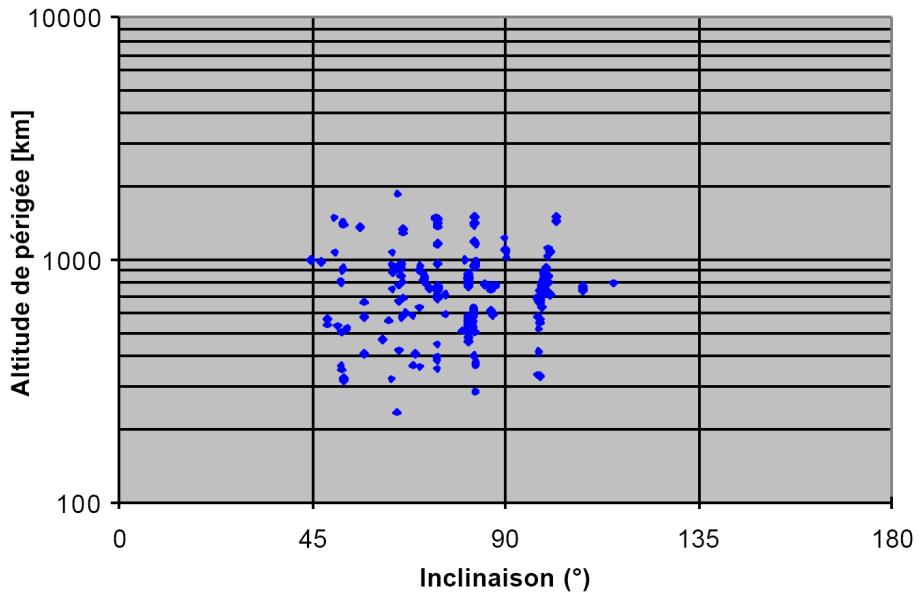
- le doublement du système d'émission : la mise en place de deux antennes d'émission supplémentaires permettra de couvrir 180 degrés en azimut et assurer ainsi une périodicité d'observation de moins de 24 heures pour l'ensemble des satellites suivis ;
- le remplacement du calculateur de traitement de signal pour assurer la création du nombre de faisceaux de réception requis suite à l'augmentation du volume éclairé par l'émission ;
- le développement des outils de traitement orbitographiques permettant d'assurer la création et le maintien à jour d'un catalogue des paramètres orbitaux des satellites détectés (voir paragraphe 3.1).

### 2.1.2. Capteurs de veille optique

Le système SPOC (Système probatoire d'observation du ciel) développé par la société Matra Cap Systèmes pour le compte de la DGA est un système optique passif qui permet de détecter les satellites éclairés par le soleil, alors que la station d'observation se situe dans la pénombre. Deux stations prototypes, développées au début des années 1990, ont été mises en place à Odeillo (dans les Pyrénées) et à Toulon. Chaque station (Fig. 5) comprend 4 caméras dont chacune couvre un champ de l'ordre de  $40^\circ \times 40^\circ$ .



*Fig. 5 Vue d'une station de veille optique expérimentale SPOC*



*Fig. 6 Répartition des objets détectés par SPOC  
(Résultats sur 3 nuits de fonctionnement)*

La figure précédente (Fig. 6) présente les résultats obtenus (en termes de satellites détectés) sur une période d'observation de trois jours. Par rapport à GRAVES, la principale différence porte sur l'inclinaison minimale des orbites détectées, qui reste supérieure à  $45^\circ$ . Cette situation s'explique par l'absence de caméra orientée vers le sud, direction au demeurant peu propice pour l'observation optique.

On notera que les deux capteurs GRAVES et SPOC permettent non seulement de détecter les satellites, mais également d'obtenir un nombre de mesures suffisant pour calculer une première orbite. Ils constituent donc de fait des capteurs de veille et de trajectographie.

### 2.1.3. Gain requis en performances et potentiel d'évolution

Les capteurs présentés sont spécifiquement dédiés à l'observation des satellites. Ils s'avèrent de fait relativement limités vis-à-vis de la détection des débris de très petite taille. Un gain de l'ordre de 20 dB pour compenser la diminution des SER des cibles doit être envisagé. De même, le système GRAVES est conçu pour observer des satellites jusqu'à 1000 km d'altitude ; si l'on souhaite détecter jusqu'à 2000 km, le gain minimum en bilan de liaison est de l'ordre d'un facteur 16, soit 12 dB. La définition d'un capteur de veille adapté au suivi des débris spatiaux implique un gain en bilan de liaison d'au moins 30 dB par rapport aux systèmes actuellement existants.

En terme de concept radar rien ne permet néanmoins de remettre en cause le principe utilisé dans le cadre de GRAVES :

- le principe de radar à faisceau large à l'émission et formation de calcul à la réception mis en œuvre dans le cadre du radar GRAVES apparaît être comme le concept le mieux adapté à la surveillance spatiale [1] ;
- le potentiel d'évolution d'un tel radar, lié étroitement aux capacités du calculateur de traitement de signal, ne pourra que croître dans les années à venir ;
- le choix d'une fréquence de travail plus élevée, mieux adaptée à la taille minimale des cibles que l'on cherche à détecter (pour des objets d'une taille de l'ordre de 10 cm, une fréquence supérieure à 500 MHz semble souhaitable) est envisageable. L'obtention du bilan requis à cette fréquence constitue néanmoins un challenge non négligeable.

De même, existe pour les stations SPOC une très grande marge de progression, en particulier au niveau de la sensibilité des capteurs CCD (les stations SPOC utilisent des CCD intensifiés). Par ailleurs, une analyse doit être menée pour optimiser le champ et le nombre de caméras par station. Une diminution du champ unitaire et corrélativement une augmentation du nombre de caméras est certainement à préconiser. Enfin, il faut viser un coût unitaire de station faible de façon à pouvoir aisément déployer un réseau conséquent pour limiter les contraintes météorologiques.

Compte tenu des caractéristiques des deux types de capteurs, il y a certainement lieu de proposer un système mettant en œuvre les deux filières :

- les capteurs radars sont bien adaptés pour les orbites les plus basses mais sont rapidement limités car leur bilan de liaison dépend de la puissance quatrième de la distance ;
- les capteurs optiques sont mal adaptés pour l'observation des objets à basse altitude car les conditions d'observation qui impliquent que le capteur soit dans l'ombre alors que le satellite est éclairé sont très rarement remplies. Par contre, ils peuvent s'avérer plus efficaces pour les altitudes plus élevées.

## 2.2. Capteurs de trajectographie

Les capteurs de trajectographie spécifiques doivent être considérés comme complémentaires des capteurs de veille. En effet, on a vu précédemment qu'il est possible de définir des capteurs de veille qui soient en fait des capteurs de veille et de trajectographie. Cette complémentarité peut s'exprimer à deux niveaux suivant la performance du moyen de veille.

- Si le moyen de veille développé permet uniquement de détecter les objets en orbite mais pas de les suivre suffisamment longtemps pour collecter le nombre minimal de mesures requis au calcul d'orbite, il est nécessaire de disposer de moyens de trajectographie performants susceptibles d'être désignés en temps réel et capables de faire face à la charge de travail en résultant.
- Au contraire, si le moyen de veille dispose déjà en propre de moyens de capacités de trajectographie, un capteur spécifique de trajectographie pourra être utilisé pour affiner la trajectoire de certains objets pour lesquels on souhaite accéder à une précision d'orbite supérieure (situation actuelle avec les capteurs de veille GRAVES et SPOC).

Il n'existe pas au niveau européen de capteurs spécifiquement dédiés à la trajectographie de satellites non coopératifs. Il existe cependant un certain nombre de moyens susceptibles d'être utilisés à cette fin et dont les performances en termes de portée sur SER sont d'ores et déjà largement compatibles avec celles des capteurs de veille, qui pourraient être développés dans les années à venir. Parmi ceux-ci figurent les radars Armor du bâtiment français Monge mis en œuvre par la Direction des centres d'expertise et d'essais (DCE) utilisés en mission secondaire pour la trajectographie de satellites et de débris spatiaux (Fig. 7). On notera également que le radar TIRA développé par le FGAN à des fins de recherche scientifique dispose de performances lui permettant d'assurer la trajectographie de satellites [2]. Ces deux exemples montrent que la technologie requise pour le développement de capteurs spécifiques de trajectographie est d'ores et déjà disponible et que leur développement ne posera pas de problèmes majeurs.



Fig. 7 Vue du Bâtiment d'Essais et de mesure MONGE et de ses deux radars ARMOR

### 2.3. Capteurs d'analyse

Le besoin en capteurs d'analyse provient de la nécessité de pouvoir identifier et décrire le plus précisément possible les objets en orbite. Cette identification peut s'avérer utile pour confirmer la nature et la mission de l'objet détecté. La mise en œuvre de capteurs d'analyse peut en outre s'avérer utile pour évaluer l'état de satellites suite à des dysfonctionnements (non-déploiement de panneaux solaires par exemple). Les capteurs d'analyse envisageables sont de deux types : d'une part les capteurs optiques, d'autre part les capteurs radars.

#### 2.3.1. Imagerie optique

D'un point de vue théorique, la résolution que l'on peut atteindre en utilisant un télescope d'imagerie est directement liée au diamètre du télescope (dans le domaine visible, un télescope de 4 mètres de diamètre permet de réaliser des images de 15 cm de résolution à 1000 km de distance). Malheureusement, cette résolution théorique est limitée par les effets de la turbulence atmosphérique qui dégradent fortement la qualité des images. Le principe de la technique dite « d'optique adaptative », permettant de corriger la turbulence est le suivant :

- un analyseur de surface d'onde constitué d'un réseau de micro lentilles est utilisé pour évaluer la déformation du front d'onde consécutive à la traversée de l'atmosphère ;
- l'information de déformation ainsi obtenue est utilisée pour piloter en temps réel un miroir déformable qui permet de corriger l'image.

Cette technique a été étudiée et testée par l'ONERA à la fin des années 1990 pour l'observation des satellites. Des tests limités ont été réalisés sur un télescope d'un mètre de diamètre et des simulations très significatives ont été réalisées en laboratoire. Cette même technique a été mise en œuvre pour des applications astronomiques. L'ONERA est maître d'œuvre du système d'optique adaptative NAOS implanté sur le télescope de l'ESO au Chili.

La réalisation d'un système européen d'observation permettant l'imagerie optique des satellites est donc tout à fait accessible à court terme si l'on souhaite obtenir des images dont la résolution est de l'ordre de 15 à 30 cm. L'obtention d'une meilleure résolution et l'observation d'objets de taille plus faible poseront cependant des problèmes plus importants :

- une meilleure résolution implique l'emploi de télescopes de beaucoup plus grand diamètre qui devront en outre être dotés d'une mécanique leur permettant de suivre le défilement rapide des satellites bas ;
- l'observation d'objets de très faible taille posera le problème du flux disponible pour que le dispositif d'optique adaptative puisse être mis en œuvre.

### 2.3.2. Imagerie radar

L'observation de satellites défilants en orbite basse est également possible en utilisant la technique ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) qui exploite le mouvement angulaire des objets observés pour en extraire une image Doppler-distance. Des expérimentations ont d'ores et déjà été réalisées en Europe en particulier avec le radar de recherche TIRA du FGAN qui permet d'obtenir une résolution de l'ordre de 25 cm [2]. Comme pour l'imagerie optique, la réalisation d'un système européen d'observation permettant l'imagerie radar des satellites est donc tout à fait accessible à court terme, pour des résolutions équivalentes à celles obtenues avec des moyens optiques.

Il est également intéressant de noter que les imageries optiques et radars s'avèrent tout à fait complémentaires puisque les images optiques correspondent à une projection de l'objet sur un plan perpendiculaire à la direction d'observation alors que l'imagerie radar correspond à une projection suivant un plan perpendiculaire à la vitesse transverse de l'objet.

## 3. Moyens de traitement

Dans l'analyse des moyens à mettre en place pour assurer la surveillance de l'activité spatiale, il convient de ne pas négliger l'ensemble des moyens de traitement associés à l'exploitation des données issues des capteurs.

La figure ci-après (Fig. 8) permet d'illustrer l'organisation d'ensemble d'un système de surveillance de l'espace. La partie gauche du schéma concerne les capteurs destinés à acquérir les informations, la partie droite est relative à l'exploitation de ces informations. On constate que le système s'articule autour d'une base de données rassemblant ces informations. Parmi celles-ci, les données orbitales des satellites constituent la partie cruciale du système car :

- elles sont essentielles pour la mise en œuvre des capteurs d'analyse et de trajectographie qui nécessitent un pointage précis ;
- elles sont à la base de la majeure partie des exploitations relatives au suivi de l'activité spatiale ;
- elles doivent être constamment remises à jour compte tenu de la méconnaissance affectant les modèles dynamiques des satellites ainsi que de l'occurrence éventuelle de manœuvres.

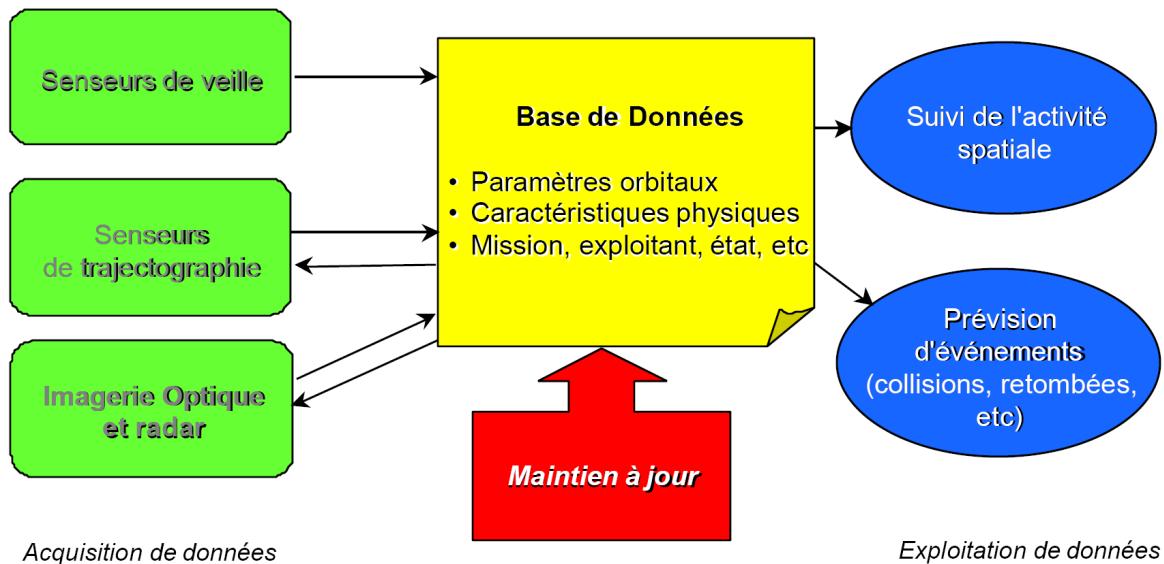


Fig. 8 Organisation générale d'un système de surveillance de l'espace

### 3.1. Gestion d'un catalogue d'éphémérides

Lorsqu'il s'agit de satellites coopératifs, les traitements orbitographiques permettant de transformer des mesures de capteurs en paramètres orbitaux sont classiques et il existe une très grande diversité de logiciels de traitement. Dans le cadre de la surveillance de l'espace les problèmes posés sont d'une autre nature :

- les mesures des capteurs de veille ne sont pas «signées» : on ne sait pas, *a priori*, à quel satellite appartiennent les pistes de mesures fournies ;

- le volume de données à traiter est considérable et requiert de mettre en œuvre des modèles orbitaux rapides (analytiques ou analytico-numériques) de précision forcément limitée ;
- les mesures fournies lors du premier passage d'un satellite constituent une information très pauvre et conduisent à une première détermination d'orbite de très mauvaise qualité. Cette situation met en évidence les difficultés liées aux non-linéarités inhérentes à tout problème d'estimation d'orbite ;
- la fréquence d'observation des satellites est forcément limitée compte tenu des performances des capteurs de veille et la reconnaissance d'un satellite lors de ses passages successifs est d'autant plus délicate.

En résumé, le problème le plus important dans le processus de création d'une base de données orbitales est de rassembler toutes les pistes de mesures successives issues d'un même satellite. En effet, une fois cette tâche réalisée, on peut se contenter de mettre en œuvre des techniques « classiques » de détermination d'orbite. Pour donner une idée de la tâche à réaliser, on notera qu'un mois de fonctionnement du capteur GRAVES conduit à devoir traiter plus de 1,6 million de mesures réparties en plus des 760000 pistes.

À notre connaissance, il n'existe actuellement qu'un seul outil expérimental susceptible de réaliser cette tâche : il s'agit du logiciel S3 développé par l'ONERA et mis en œuvre pour exploiter des données issues du radar GRAVES et des stations SPOC [3]. Il a pu démontrer sa capacité à maintenir un catalogue de données orbitales sur un échantillon réduit de 700 satellites lors des expérimentations de 2001. Une version opérationnelle de ce logiciel est en cours de développement et devrait être mise en service en 2005.

L'initialisation de la base de données constitue la période la plus délicate et concentre la majeure partie des problèmes de confusion entre objets. Cependant, la phase de « routine » nécessite également de mettre en œuvre des processus spécifiques pour prendre en compte :

- les lancements qui conduisent à l'arrivée d'objets nouveaux ;
- les manœuvres qui peuvent conduire à ne pas « reconnaître » un satellite à l'issue de sa modification d'orbite ;
- les explosions en orbite qui conduisent à la création simultanée d'un grand nombre d'objets qu'il conviendra de « rattacher » à l'objet d'origine.

Ces différentes situations ont d'ores et déjà été testées dans le cadre des études réalisées à l'ONERA et des processus de traitement spécifiques ont été évalués et seront implémentés au sein de la version opérationnelle.

### 3.2. Exploitation d'un catalogue

On notera, dans le schéma d'exploitation d'un catalogue de données orbitales (Fig. 9) que la tâche principale de la gestion de catalogue consiste à identifier le satellite à l'origine des pistes de mesures. Ce faisant, il est ensuite possible, si nécessaire, de procéder à une détermination d'orbite mettant en jeu des modèles précis de façon à disposer de la précision suffisante pour procéder aux analyses souhaitées. On retiendra en particulier les analyses relatives à l'évaluation des collisions en orbite qui requièrent la plus grande précision.

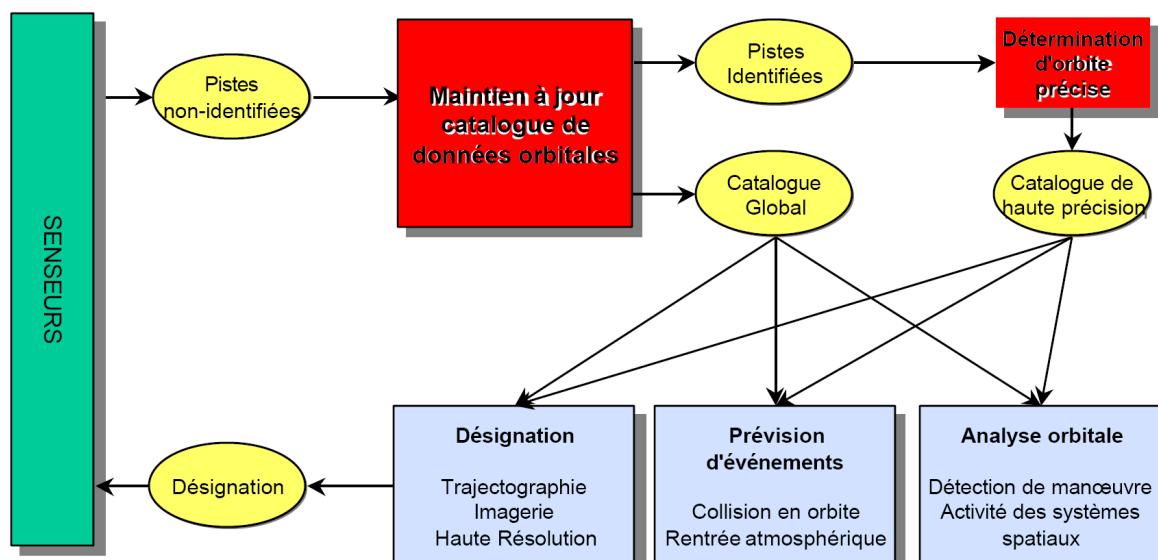


Fig. 9 Processus d'exploitation d'un système de surveillance

Pour la plupart, ces outils d'exploitation existent au niveau européen à un stade plus ou moins opérationnel. Ils se contentent pour l'instant d'exploiter les bases de données internationales. La mise en place d'un système de veille spatiale européen permettrait néanmoins de crédibiliser ces analyses en les faisant reposer sur des données fiables, vérifiables et dont le processus de génération est parfaitement connu des utilisateurs.

#### **4. Références bibliographiques :**

- [1] Jean Appel. *Quel concept pour les radars de veille très longue portée futurs ?* - Actes du colloque international sur le Radar, Paris, 3-6 mai 1994.
- [2] D. Mehrholz, L. Leuschake (FGAN), W. Flury, R. Jehn, H. Klinkrad, M. Landgraf (ESOC) *Detecting, Tracking and imaging Space Debris*. ESA bulletin 109 - February 2002
- [3] J. Bouchard - *Traitements orbitographiques des mesures GRAVES de l'expérimentation 2001* - Rapport ONERA n° 2/05346/DPRS du 19 décembre 2001

# GRAVES: The new French System for Space Surveillance

Michal Th. <sup>(1)</sup>, Eglizeaud J.P. <sup>(2)</sup>, Bouchard J.<sup>(3)</sup>

- (1) ONERA - Centre de Chatillon - BP 72 - 92322 Chatillon Cedex (F) - [thierry.michal@onera.fr](mailto:thierry.michal@onera.fr)  
(2) ONERA - Centre de Palaiseau - BP 72 - 92322 Chatillon Cedex (F) - [jean-pierre.eglizeaud@onera.fr](mailto:jean-pierre.eglizeaud@onera.fr)  
(3) ONERA - Centre de Chatillon - BP 72 - 92322 Chatillon Cedex (F) - [jacques.bouchard@onera.fr](mailto:jacques.bouchard@onera.fr)

## ABSTRACT

The GRAVES system is a space surveillance system developed by the French Aerospace Research establishment (ONERA) under contract from the French MoD. It consists of a specific radar sensor associated with automatic data processing software which creates and maintains a catalogue of the orbital parameters of the detected satellites.

The key driver for the development was to produce a low cost system in terms of development and maintenance. It led to an original concept of a full electronic scanning bistatic CW sensor, operating in VHF, using Doppler detection and digital beam forming reception technique.

On the other hand, great effort has been devoted to the development of the software that converts the raw measurements of the sensor into an orbital parameter catalogue. This was a very demanding challenge because this software has to deal with rather "poor" measurements which came from a unique radar sensor.

## 1. ACRONYMS

COTS: Commercial Off The Shelf

DMS: Data Management System

ESO: European South Observatory

GEO: Geostationary Earth Orbit

GRAVES: Grand Réseau pour la VEille Spatiale (French Acronym - Large Array for Space Surveillance)

GTO: Geostationary Transfer Orbit

LEO: Low Earth Orbit

MEO: Medium Earth Orbit

R/B: Rocket Body

RCS: Radar Cross Section

S3: Space Surveillance System

VHF: Very High Frequency

## 2. SPACE SURVEILLANCE SYSTEM ARCHITECTURE

« Space surveillance » is a general term meaning all resources and procedures aimed at procuring the most precise knowledge possible about the 'object population' in orbit around the Earth. It's a well known fact that, since the beginning of the space age, the number of orbiting objects has increased continually.

The need to know the state of this 'space population' is becoming more obvious for all nations involved in space activities.

For these nations, knowledge of the space population is essential in order to be able to:

- Evaluate the status of the space activity worldwide (including military and civilian applications)
- Predict the risk of collision. Several collisions in orbit have already taken place
- Evaluate the encumbrance of « strategic » orbits (geostationary orbits in particular)
- Predict the atmospheric re-entry of objects which may cause damage on the ground.

### 2.1 Functions of a surveillance system

In order to respond to the issues raised above, a space surveillance system must provide the following capabilities:

- ✓ the detection and subsequent regular monitoring of orbiting objects (orbital parameters),
- ✓ the identification of the origin of these objects (launch site, owner),
- ✓ the provision of a minimum of intelligence on their technical characteristics (size, mass, etc..).

The creation of a database, continually updated with this essential data, would then provide responses to the initial queries of the users of such a system.

The figure below (Fig : 1) illustrates the overall organisation of a space surveillance system. The left-hand part of the diagram deals with the sensors which collect the information, the right-hand part shows the utilisation of this information. The system clearly pivots around a database of this information, especially the satellites' orbital data which constitutes the crucial part of the system because:

- It is essential for the use of tracking and analysis sensors which require precise targeting,
- It forms the basis of the majority of uses relative to the monitoring of activity in space,
- It has to be continually updated taking into account the imperfection of dynamic satellite models as well as the possible occurrence of manoeuvres.

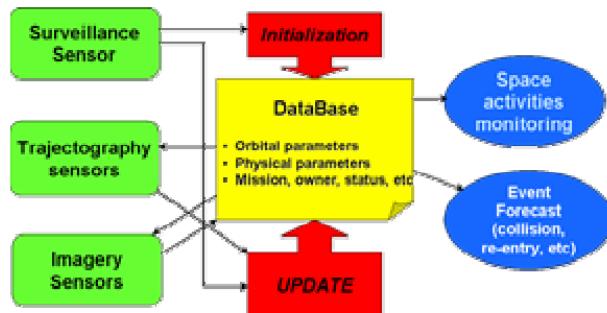


Fig 1. Organisation of a space activity surveillance system

### 3. GRAVES SYSTEM SPECIFICATIONS

Intended for military use, the GRAVES system, designed for the DGA (French armament procurement agency), concerns itself with active satellites as a priority. The final specifications for this radar are given below:

- Installation in Metropolitan France  
*This specification which simplifies the installation conditions of the sensor has little negative impact on its potential performance taking into account the actual distribution of satellites in orbit*
- Detection of all satellites up to an altitude of 1000 km
- Delay in the detection of any satellite less than 24 hours  
*This specification arises essentially from the desire of future users of the system to be able to quickly detect new satellites. It also limits the average period between two observations to less than 24 hours.*
- Determination of an orbit based on a single pass  
*This is a tight constraint since it has an impact on the volume of the surveillance zone. In effect, the determination of an orbit requires a minimum number of measurements, if possible separated in time. This specification would necessitate a « self-sufficient » sensor and the system would no longer rely on a hypothetical tracking radar which would be required to refine the trajectory of the objects detected by the surveillance radar.*

### 4. DESCRIPTION OF THE GRAVES CONCEPT

In order to respect the specifications described above, ONERA's approach has been to propose a simple and inexpensive concept specifically adapted to this mission. Three fundamental questions have to be answered to be able to define a radar surveillance system:

- What is the volume of detection?
- What is the working frequency?
- Nature and quality of the measurements (waveform, signal processing, extracted measurements)?

#### *Detection volume:*

The choice of the detection volume must be made under two opposing constraints: on the one hand, it is desirable to maximise the volume in order to increase the probability of satellite detection; but at the same time, minimising the emitted power of a system makes its development more feasible. The optimal solution results in a detection volume corresponding to the surface of a cone with a vertical axis. With this set-up, every satellite crosses this « thin envelope » at least in two points. With a three-dimensional measurement vector (angular and range or Doppler measurements), it is then possible to calculate a first orbit for the detected satellite.

For a given envelope, two parameters must be defined:

- The range of the envelope
- The angle of elevation of the envelope

To choose these two parameters, two contradictory constraints need to be taken into account: to minimise the emitted power it is appropriate to observe at a high angle of elevation. However, to be sure of observations at an acceptable frequency, it is advisable to observe at a low elevation (just above the horizon) with, as a consequence, longer observation distances.

A precise analysis has shown that the dimensioning orbits for this choice are geosynchronous (16, 15 and 14 orbits per day). The analysis of these orbits has resulted in a theoretical concept of 3 envelope radar within which the useable power is distributed according to the table below. A transmission elevation of 11,3° corresponds to the maximal elevation to which the envelope can be oriented to ensure the daily detection of the geosynchronous orbits of 16 passes per day. If a greater elevation is chosen, some orbits may never be detected if they are out of phase.

The advantage of the 3 envelope configuration is to minimise the power emitted compared with that of a one envelope solution. The power emitted has to reach satellites at up to 1000 km in altitude (equivalent to a range of more than 2500 km). If several envelopes are set up, the envelope at 11,3° is only used to detect the orbits of 16 orbits per day and needs a range of only approximately 1000 km. The envelopes at 24,7 and 34,7 degrees are adapted to the orbits of 15 and 14 orbits per day.

	Emission elevation (°)	Range (km)	Maximum altitude (km)	Relative power by envelope (%)
One envelope	11.3	2664	1000	reference
Three envelopes	11.3	1133	315	3.3
	24.7	1194	584	4.2
	34.7	1559	1000	11.6

Fig : 2. Configuration of 1 and 3 envelope radar.

#### Working Frequency:

The same sort of compromise operates with the choice of frequency. From the point of view of the radar evaluation and of the cost of emitted Kw, the lowest possible frequency would be chosen. On the other hand, in order not to degrade the RCS (Radar cross-section) of the detected objects too much, it is advisable to maintain a wavelength commensurable with the characteristic size of the observed objects. Moreover, the choice of a very low frequency raises the problem, if we wish to maintain an acceptable angular precision, of the influence of the effect of the ionosphere and of the size of the antennas.

In these circumstances and taking account the objective of GRAVES which has to detect satellites and not debris, the VHF wavelength seems to be the optimal choice.

#### Nature and quality of the measurements:

The GRAVES system being specifically dedicated to space surveillance, it quickly became apparent that it isn't absolutely necessary to be able to measure range and that a measurement of radial velocity (using the Doppler effect), associated with angular measurements is wholly adequate for determining an orbit, provided that two points of measurement are possible. Such a choice is particularly advantageous in terms of the bandwidth required and the waveform since it is possible to transmit a pure frequency. On the other hand, it is necessary to well separate the emission sites and the reception sites to ensure a good decoupling and to avoid saturating the reception stages with the direct path.

The final design for the proposed surveillance radar represents a compromise between:

- On the one hand, the optimal transmission diagram minimising the emitted power to that defined above and,
- On the other hand, the problems of technical feasibility, of ease of implementation and maintenance.

Practically, the generation of a thin envelope requires the implementation of a vertical linear array comprising

omni directional elementary azimuth antennas. The choice of the low frequency bandwidth (VHF), for reasons of cost and link budget, would need a mast of more than 30 metres on which would be distributed the elementary antennas.

The compromise which has been worked out involves, covering a « volume » which includes these different envelopes, rather than creating very thin « envelopes » distributed according to the optimal observation elevations.

In order to compensate the increase of power necessary, it has been decided not to install a permanent illumination but, instead, azimuths sweep with a beam which is wide in elevation and relatively narrow in azimuth.

This principle is illustrated in the following figure:

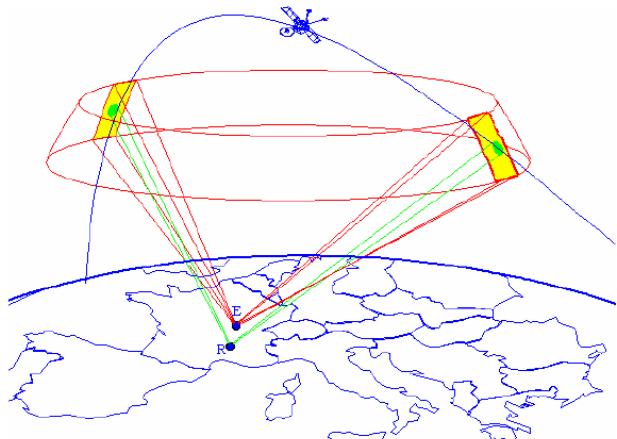


Fig : 3. Illustration of the principle of the GRAVES radar

The GRAVES radar is therefore a continuous emission / Doppler detection radar operating in the VHF bandwidth. The use of continuous emission results in a bistatic radar (transmission and reception at distinct sites).

The transmission is implemented using a phased array and the reception by a technique of digital beam forming.

The system developed by ONERA comprises four panels of transmission antennas, each covering 45° azimuth in approximately 20 seconds with a beam of aperture 8° in azimuth and 20° in elevation. The zone covered extends over 180° azimuth. Strictly, the coverage should be 360 degrees; however, it has been shown in simulation that a coverage 180 degrees azimuth allows the detection of each satellite at least once every 24 hours.



Fig : 4. View of the 4 transmitting antennas

The choice of a frequency in the VHF bandwidth associated with the utilisation of a single frequency has led to the use of transmitters based on a widely available commercial product used in broadcasting. This choice has significantly diminished the cost while benefiting from the reliability of a tried and tested component.

The reception array comprises 100 antennas distributed over a metallic disc forming a ground level surface. Each antenna is linked to an individual receiver whose signals are then digitised. The addition, in phase, of all the signals issuing from the reception antennas results in the creation of a vertical reception beam equivalent to that which would be created by a single antenna of the same size as the disc carrying the antennas (an aperture of the order of  $2^\circ$ ).



Fig : 5. Aerial View of the reception site

## 5. DATA PROCESSING DESCRIPTION

However, we need to be able to observe in all directions illuminated by the transmission. The signals issuing from each antenna being digitised, it is possible to assign to the signal from each antenna a specific phase shift. The choice of an adapted phase set allows the creation of a beam orientated in any direction, not simply the vertical. This technique of digital beam forming (FFC) allows, given a real-time calculator of sufficient power, simultaneous observation in all directions potentially illuminated by the transmission.



Fig : 6. Reception Antennas

The detection of the satellites is then made possible with a Doppler technique by proceeding to the Fourier transformation of the FFC signal.

A preliminary trial model of only two transmission panels was built between 1997 et 2001. The transmission site is situated close to Dijon and the reception site is in Provence. The extension of this system has been ongoing since 2002 and will conclude with the delivery of an operational system to the French Air Force Staff at the end of 2005.

## 6. CATALOGUE MAINTENANCE PROCESS

As we have just seen, GRAVES relies on a single sensor providing measurements, which precision is necessarily limited since the sensor is a surveillance sensor and not a tracking sensor. Now the objective of this system is to provide a catalogue of orbit parameters for the orbiting objects.

For co-operative satellites, the orbitographical processing which transforms the sensor measurements into orbital parameters is conventional and there is a wide range of processing software. In the context of space surveillance the problems raised are of a different nature:

- The measurements made with the surveillance sensors are not « signed »: we don't know, *a priori*, which tracks of obtained measurements belong to which satellite,

- The volume of data to process is considerable and requires the use of rapid orbital models (analytical or analytical-numerical) with a precision which is necessarily limited,
- The measurements obtained during the first pass of a satellite are very un-accurate and result in a first orbit determination of very poor quality. This situation highlights the difficulties linked to the non-linearity inherent in any orbit estimation. This problem is made even more difficult by the absence of any measurement of distance, as in the case of GRAVES.
- The observation frequency of the satellites is necessarily limited taking into account the performance of surveillance sensors and the recognition of a satellite during its successive passes is especially tricky.

In summary, the most important problem in the creation of a database of orbital data is to collect together all the successive tracks of measurements for the same satellite. Once this has been achieved, we may simply use the « classical » orbit determination techniques. To give an idea of the task to accomplish, 10 days of GRAVES sensor data results in more than 1.700.000 measurements distributed over more than 55.000 tracks, which must all be processed.

Four modules (one optional) carry out the orbitographical processing:

Short term tracking: This module is designed to group together on the same track all the measurements carried out for the same satellite during one of its visible passes. Taking into account the short duration, a keplerian orbital model is used. The technique involves the collection of measurements with which a viable orbit may be aligned.

Long term tracking: This module is designed to group together the tracks, output by the module described above, for the same satellite. A technique equivalent to the short term tracking is used but, the interval between two tracks being of the order of a day; a more precise analytical orbital model is used.

Final tracking: Long term tracking is appropriate when the satellites are in a natural orbital movement. However, if manoeuvres take place, this module can only associate the tracks obtained before and after the manoeuvre. In this case, long term tracking gives rise to the creation of a new object; the catalogue remains coherent but the identity of the manoeuvring satellite is lost. The objective of final tracking is to deal with this problem. It permits the correlation of orbits which may be linked by posing the hypothesis of an orbital manoeuvre of reasonable amplitude.

External identification (optional module): the processing of GRAVES is designed to function autonomously (without external information). However, it was judged useful to be able to compare the orbits obtained by GRAVES with those issued by the US Space Command in the form of Two-Lines data. The external identification module allows this correlation to be made.

## 7. SOME RESULTS

GRAVES has already been the subject of several experimental programmes which have verified its potentialities in terms of:

- Population of detected satellites
- Capability of creating ex-nihilo a catalogue of detected objects

### Detected objects:

The figures presented below are the outcome of experiment carried out at the end of 2004. During this period, based on the identifications compared with the data of the US Space Command, more than 2300 different objects could be observed.

In this population, only a small proportion of debris is detected. This result is coherent with the specifications for GRAVES which aims at the detection of satellites. The choice of a working frequency in the VHF bandwidth proves to be unsuitable for the detection of objects whose characteristic size is much lower than the wavelength.

The figure below presents the distribution of the satellites detected. The altitudes of apogee and of perigee are plotted as a function of the inclination of orbit.

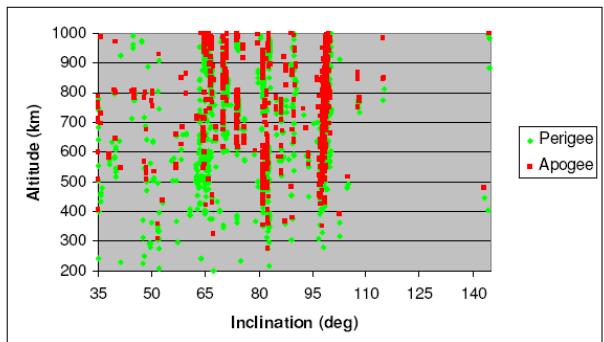


Fig : 7. Orbital distribution of the detected objects

### Creation of a catalogue of detected orbits:

The orbital processing modules described in paragraph 6 have been tested during this programme of measurements in real conditions. That is to say, in making the hypothesis of a catalogue which is initially empty and building and refining it according to the observations of the satellites.

The utilisation of the three tracking modules described in paragraph 4 has resulted in the creation of a catalogue of

the detected objects for which the detection frequency was high enough. For the objects which figure in the database published by the US Space Command, the coherence between the orbits recorded in the two catalogues has been successfully verified.

The fine adjustments to the algorithms as well as the evaluation of the final performance will require, of course, new programmes of measurements and the objective is to carry out, in the very short term, a programme of at least one month in order to have available an adequate test database. This programme will allow, moreover, the validation of the complete radar system.

## **8. CONCLUSION AND PERSPECTIVES**

GRAVES is an original space surveillance system which has been specifically developed for this mission. It has been successfully tested during several different experimental programmes. A particular effort has been made to ensure, on the basis of the trial model developed between 1997 and 2000, the construction of an operational system which may be used by the French Air Force. With this aim in mind, work has been carried out to enhance its reliability as well as its extensibility. The latter allows remote operation, without any human presence at the transmission and reception sites. Similarly, the orbitographical processing software has been designed to minimise human intervention.

As a result, the system is now ready to be delivered to the French Air Force Staff at the end of 2005 thus equipping France with a first capability in space surveillance.

As has been indicated at the beginning of this article, a surveillance system constitutes only the first stone in the construction of a system of space surveillance. Following this commissioning of GRAVES, the accent will be now be put on the development of sensors and tools which will be used « upstream» of GRAVES for, in particular, the task of identification. ONERA is well placed to take part in these developments bearing in mind the capacities already demonstrated in the field of ISAR radar imaging and of high resolution optical imaging. It should also be remembered that ONERA is the prime contractor of the NAOS adaptive optics system installed on the ESO telescopes in Chile.

Moreover, the experience acquired by ONERA during the development of GRAVES positions it as an essential player in the development of a future European space surveillance system. ONERA is also leading, for the European Space Agency, the feasibility study of such a system which is the subject of an invited presentation, as part of this conference.

## **9. ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors would like to thank the Délégation Générale pour l'Armement which has financed GRAVES and in particular M. Ronan Moulinet, the DGA's representative on this project, as well as the Etat Major de l'Armée de l'Air (French Air Force Staff) for its support of space surveillance activities and in particular the LCL Schrottenloher which will have the responsibility of running the operational system.

