



Huit mois ont passé depuis la sortie de la première lettre d'informations qui donnait une description générale du système, ses finalités et ses premiers résultats.

Moins riche en événements spectaculaires que celle des dix premiers mois de fonctionnement, cette période a néanmoins été marquée par le grand succès de la journée "DORIS DAY" au cours de laquelle les performances déjà atteintes ont été présentées, discutées et confrontées au besoin des utilisateurs.

Nous sommes maintenant entrés dans une phase de consolidation et d'amélioration des résultats mais aussi de préparation du futur. Au cours de cette période, l'instrument DORIS, passager de SPOT 2, a continué de fonctionner nominalement, le réseau de balises a été complété et les efforts de toute l'équipe DORIS impliquée dans la conception, les opérations et le traitement se sont poursuivis. Les derniers résultats obtenus ont été comparés avec ceux que fournissent des systèmes similaires.

D'ores et déjà, des propositions sont à l'étude pour mettre en œuvre le système à des fins auxquelles DORIS est bien adapté : la surveillance de mouvements lents de la croûte terrestre. Parallèlement, des réflexions sont en cours sur les DORIS de future génération.

Cette lettre continuera de vous tenir informé de manière régulière, ce numéro et les suivants comportant trois catégories d'informations :

- Des informations sur le fonctionnement du système, l'état du réseau de balises d'orbitographie, les derniers résultats obtenus en détermination d'orbite et en positionnement, les avant-projets à l'étude, les matériels en développement (intégration et essais des récepteurs DORIS sur les prochains satellites, amélioration des balises...).
- Une rubrique "applications", traitant d'exemples de mise en œuvre du système : soit pour le calcul d'orbite précise (projet TOPEX-POSEIDON), soit pour la localisation (établissement de systèmes de référence pour la géodésie, tectonique, volcanologie, géotechnique...), soit pour l'amélioration des modèles de force et de propagation (potentiel terrestre, ionosphère...). Elle fournira éventuellement des informations relatives aux campagnes en cours ou en préparation.
- Une rubrique plus technologique consacrée à la description détaillée d'un des maillons du système appartenant à l'instrumentation (balises, récepteur, oscillateurs, antennes,...) ou au traitement des données (centre de contrôle, calcul d'orbite...).

Ce numéro 2 est consacré au rappel des résultats de la journée du 18 décembre dernier, à un panorama des performances aujourd'hui atteintes en positionnement précis, illustré notamment par l'expérience en cours à Djibouti et à une description du "cœur" du système : les oscillateurs ultrastables. Nous espérons que comme pour le premier numéro, nombreuses seront vos correspondances auxquelles nous nous ferons un plaisir de répondre.

Jean-Pierre Chassaing - CLS.
Michel Dorrer - CNES.



It's been eight months since our first Newsletter describing DORIS and its aims and achievements. Things aren't as spectacular as during the first ten months of operation, but our DORIS Day workshop on 18 December 1990 was a great success. Users and potential users saw what has been achieved and how DORIS shapes up to their needs. Which brings us to what we're doing right now : consolidating and enhancing the results, and preparing for the future.

In the last eight months the DORIS payload has continued to operate nominally on board SPOT-2, the beacon network has been extended, and of course the DORIS team have kept up their efforts in design, operations and processing. The latest results have now been compared with those from similar systems.

We are currently studying ways of using the DORIS system in an application for which it is ideally suited : monitoring slow movements of the Earth's crust. At the same time, thought is being given to future generations of DORIS.



Balise d'Huahiné (Polynésie Française) - Huahiné beacon (French Polynesia)

1

The DORIS Newsletter keeps you up to date in three important areas :

- System operation, status of the orbit determination beacon (ODB) network, latest orbit determination and ground location results, future research projects, and hardware development (such as the integration and testing of DORIS receivers for future satellites, and beacon enhancements).
- Applications, such as precise orbit determination (the TOPEX-POSEIDON project), ground location (geodetic reference systems, tectonics, volcanology, applied geodesy), and improvement of force and propagation models, (terrestrial potential and ionosphere). There is also the latest news on field activities.

• More technical information about links in the system chain, i.e. instrumentation (beacons, receiver, oscillators, antennas) and data processing (the control centre and orbit determination)

Here in issue number 2 you will find a report on the DORIS DAY, overview of the Djibouti experiment and other accurate location results to date, and a description of the ultrastable oscillators, the "heart" of the DORIS system.

We were delighted to receive and answer so many letters following our first issue - do keep sending them in!

LA JOURNEE DORIS

Le 18 décembre 1990, une session d'une journée "DORIS DAY" s'est tenue au siège du CNES à Paris. Elle était présidée par Jacques-Louis Lions, Président du CNES. 160 auditeurs ont participé à cette journée et aux débats qui l'ont clôturée.



Cette journée avait un double objectif :

- Présenter le système DORIS et ses performances après neuf mois de fonctionnement,
- Ecouter les utilisateurs potentiels du système, les laisser exprimer dans leur domaine et de manière quantitative leurs besoins spécifiques en localisation précise tant en ce qui concerne les projets scientifiques que ceux à vocation plus appliquée.

L'éventail des applications présentées allait de l'apport à l'établissement et au maintien de réseaux géodésiques, à la cartographie marine jusqu'à la surveillance des glissements de terrain et plus généralement à la géotechnique, à la contribution aux modèles d'ionosphère, à l'orbitographie de satellites en temps réel.

L'aide potentielle à l'imagerie (visible ou radar) a été également évoquée.

Les thèmes scientifiques concernaient l'amélioration du champ de gravité et du géoïde, la tectonique globale et les déformations régionales liées aux phénomènes géologiques, avec une étude de cas particulièrement intéressante sur le volcanisme.

Bien entendu, on a insisté sur la détermination des surfaces océaniques et les variations du niveau de la mer par altimétrie et marégraphie, objectifs pour lesquels le système a été conçu.

Sans tirer de conclusions définitives, il est clairement apparu au cours des discussions :

- que les objectifs liés à l'utilisation du réseau de base étaient déjà atteints de manière optimale et que les précisions de mesure et couverture globale étaient conformes aux prévisions,
- que le système répondait bien aux utilisations liées à une surveillance

permanente (exemple : tectonique et volcanique) requis par les phénomènes à variations discontinues. Les utilisateurs ont de plus apprécié plusieurs aspects moins familiers :

- la localisation précise d'un point isolé en relatif ou en absolu ne nécessite qu'une quinzaine de jours de mesures. Ceci pallie largement les inconvénients liés à la saturation du système, dans le cas improbable où plus de 40 balises seraient dans la même zone de visibilité,

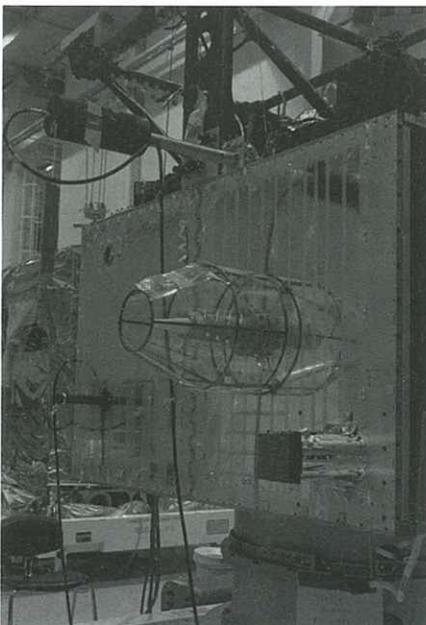
- la pérennité du système est garantie pour au moins 10 ans. Elle permet de planifier de véritables projets, au-delà des expériences de démonstration.

- les mesures et les données auxiliaires sont accessibles et peuvent donc être l'objet de validation en parallèle. Il ne s'agit pas comme certains utilisateurs le craignaient d'une "boîte noire",

- la performance du système n'est pas actuellement limitée par la précision de mesure mais par celle des modélisations : forces, corrections de propagation...

Cette première prise de contact est prometteuse. Les parties prenantes (CNES, IGN, CLS, GRGS), pour leur part respective, ont pu mieux apprécier les points forts du système mais aussi ceux qui pouvaient être améliorés.

*Michel Lefebvre - CNES
Jean-Pierre Chassaing - CLS.*



L'antenne DORIS sur SPOT3 en cours d'intégration.
DORIS and SPOT-3 during integration.

2

DORIS DAY WORKSHOP

The first DORIS DAY workshop was held at CNES head office in Paris on 18 December 1990. It was presided over by CNES chairman Jacques-Louis Lions, and attended by 160 people.



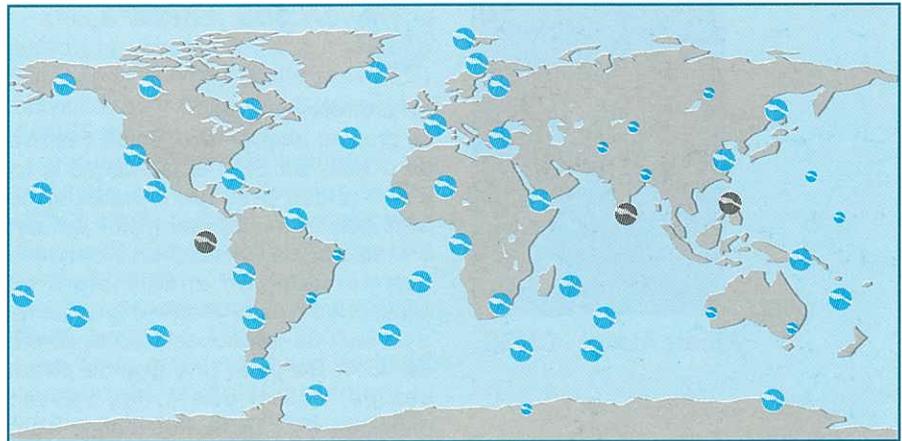
The purpose of DORIS DAY was twofold :

- present the DORIS system and its performance after nine months in operation,
- listen to potential users quantify their needs in accurate location, whether for scientific or applied fields.

The broad range of applications stretched from establishing and maintaining geodetic networks to marine mapping, monitoring ground slippage, and more generally to applied geodesy, ionospheric modelling and realtime satellite orbitography. The potential contribution to visible and radar imagery was also touched on. The scientific subjects concerned enhancing gravity field and geoid data, global tectonics and regional deformations related to geologic phenomena. There was a particularly interesting case study on volcanism. Naturally, considerable attention was paid to determining ocean surfaces and sea level variations by altimetry and tide-gauging, the applications for which DORIS was originally designed.

Although it is too early to draw definite conclusions, we can already be sure that:

- the objectives concerning the base network have been fully achieved, and the accuracy of the measurements and global coverage match the forecasts,
- DORIS is suitable for permanent monitoring of discontinuously-varying phenomena, e.g. in tectonics and volcanism.



**BALISES D'ORBITOGRAPHIE DORIS (Juillet 1991).
DORIS ORBIT DETERMINATION BEACONS (July 1991).**

 Installées.
Installed.
  En projet.
Planned.
  Balises récemment Installées.
Recently installed Doris beacons.

Many users were also pleased to learn that :

- isolated points can be located from just two weeks of differential or absolute measurements. This largely overcomes the system saturation problem, in the unlikely event of more than 40 beacons being in simultaneous visibility,
- system continuity is guaranteed for at least ten years. This means that DORIS applications are not confined to short demonstrations and short-term projects,
- the measurements and auxiliary data are available and can be validated in parallel. Contrary to a few users' fears, DORIS is not just a "black box",
- system performance is not currently constrained by measurement accuracy but by modelling of forces, propagation errors, etc.

This first meeting was extremely promising. Everyone came away with something new, and the main groups involved - CNES, IGN, CLS and the GRGS - drew insights not only into the system's strong points but also into what needs improving.

Michel Lefebvre - CNES
Jean-Pierre Chassaing - CLS.



NOUVELLES DE DORIS



Albert Auriol - CNES.



DORIS / SPOT2

La première bougie.

Le premier anniversaire, étape décisive de DORIS sur SPOT2, a marqué la fin d'une phase probatoire concluante. Son bon fonctionnement lui permet d'entamer désormais une carrière commerciale. En effet, malgré un concept de type probatoire, le système a un taux de fonctionnement de l'ordre de 95%. De plus, une grande partie des pertes est due à des causes externes à DORIS. Les délais sont raisonnables : orbite calculée dans un délai de 10 à 15 jours et résultats de localisation disponibles en moins d'un mois. Ces délais seront notablement raccourcis avec la mise en service du nouveau segment sol à la mi-92.

DORIS / SPOT2 en chiffres.

Aujourd'hui :

- plus de 1 900 000 mesures effectuées,
- une couverture réelle et homogène du globe à plus de 60%,
- 40 sites équipés de balises d'orbitographie,
- une orbite calculée pour 94% des jours depuis la mise en service,
- dans le pire des cas, le centre de gravité de SPOT2 est restitué par l'orbite DORIS dans un volume de 1m x 1m x 3 m,
- 20 cm d'erreur en moyenne sur la composante radiale,
- une orbite de cette précision est disponible sous 10 à 15 jours.

Le réseau d'orbitographie se complète.

Depuis peu 3 nouvelles balises ont été installées (fig. 3) :

- Manille (Philippines),
- Colombo (Sri-Lanka),
- Ile San Cristobal (Galapagos, Equateur).

Deux autres installations sont prévues très prochainement en Union Soviétique sur les sites de Kitab et du lac Baïkal.

Campagnes d'expérimentation et premières campagnes commerciales.

• Une balise DORIS a été installée à Grasse (en France à 440 km à l'est de Toulouse) en mars 1991. Cette expérience avait un double objectif :

- vérifier la précision de la localisation relative et absolue faite par DORIS en la comparant aux résultats des campagnes précédentes utilisant d'autres moyens (campagne EUREF 89)

- valider la restitution de fréquence faite par le calcul de l'orbite DORIS en la comparant avec la mesure de fréquence faite sur la balise en utilisant un étalon maser à hydrogène.

Pour le volet "restitution de fréquence", le dépouillement est en cours.

Pour le volet "localisation", les mesures ont été traitées et une première comparaison montre une concordance de quelques centimètres avec la mesure classique donnée à 40 cm près. Pour avoir un autre point de comparaison, il faut maintenant attendre les résultats de la campagne GPS. Les résultats complets seront publiés ultérieurement.

• Les premières expériences de localisation à caractère promotionnel se précisent et vont débiter :

- en août à Brest (France) pour le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (localisation absolue et relative)

- en novembre dans la Drôme (France) pour le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (glissement de terrain)

• A plus long terme, deux autres expériences sont en préparation :

- surveillance d'activité pré-séismique au Chili à partir de 1992,
- en Grèce à partir de mi-92.

Les premières expériences de localisation à caractère promotionnel se précisent et vont débiter...



DORIS ON SPOT-2

One year old !

DORIS's first birthday was a milestone in the life of the system on SPOT-2 and marked the end of a conclusive trial period. The excellent operational performance means that DORIS can now embark on a commercial career. Despite the trial design, the system calculated orbits nominally for around 95% of the time. We also know that many of the losses were caused externally. Throughput times are reasonable : orbits were calculated within 10 to 15 days, and location results available in under a month. These times will decrease significantly when the new ground segment goes into operation in mid-1992.

DORIS/SPOT-2 in figures.

Over 1 900 000 measurements made

- True homogeneous coverage of more than 60% of globe,
- 40 ODB sites,
- Orbits calculated for 94% of days since start of operations,
- Worst-case accuracy for calculating SPOT-2 centre of mass maps it into a 1 m x 1 m x 3 m box,
- Orbits with 20-cm accuracy on radial component available within 10 to 15 days.

Orbitography network extended.

Three new ODBs have recently been set up (fig. 3) :

- Manilla (Philippines),
- Colombo (Sri Lanka),
- San Cristobal island (Galapagos islands, off Ecuador)

Two more sites are planned in the Soviet Union : Kitab and Lake Baikal.

Experiments and first commercial exercises.

- A DORIS beacon was set up at Grasse (near Nice, France) in March 1991. The objectives were to :

- check DORIS differential and absolute location accuracy by comparing it with results previously obtained using other technologies (e.g. EUREF 89 exercise),

- validate the technology for reconstructing frequencies in the DORIS orbital calculation by comparing them with hydrogen maser reference measurements.

The frequency results are currently being analysed. The location results have been processed, and an initial comparison reveals agreement to within a few centimetres with the conventional 40-cm-accuracy measurements. For further comparisons, we are awaiting the results of the GPS exercise. Full results will be published later.

- The first set of promotional experiments are being defined. They will start as follows :

- in August 1991 in Brest (France) for the *Service Hydrographique et Océanographique de la Marine* : absolute and differential location,
- in November 1991 in the Drôme (France) for the *Bureau de Recherches Géologiques et Minières* : study of ground slippage.

- In the longer term, two more experiments are planned :

- monitoring pre-seismic activity in Chile, starting in 1992,
- in Greece, starting in mid-1992.

Who's jamming DORIS ?

The DORIS onboard instrument has a jamming measurement mode which operates as a spectrum analyser and records signal strengths and frequencies in the operating bandwidth. DORIS/SPOT-2 operated in this mode in June and July 1990.

Analysis of the measurements has shown surprising results on the 400-MHz channel: while the noise level barely exceeds the -145 dBm receive threshold in most of the world, it

The first set of promotional experiments are being defined.

Qui brouille l'écoute de DORIS ?

L'instrument DORIS possède un mode de mesure "brouillage". Dans ce mode, il se comporte comme un analyseur de spectre qui enregistre les niveaux et les fréquences des signaux reçus dans sa bande de fonctionnement. DORIS/SPOT2 a fonctionné dans ce mode en juin et en juillet 1990.

L'exploitation de ces mesures vient de révéler des résultats surprenants sur la voie 400 MHz : alors que pour l'ensemble du monde le niveau de bruit ne dépasse guère le seuil de réception (-145 dBm), il remonte de plus de 50 dB sur l'Europe de l'Ouest et sur l'Asie du Sud-Est. Toutefois, ces niveaux élevés ne perturbent pas le fonctionnement du système DORIS.

Le premier ion lourd.

DORIS s'est tu brusquement le 3 décembre 1990 à 16 h en survolant la Floride : plus de "blocs mesure", pas davantage de blocs de surveillance, même le "chien de garde" du logiciel de vol était resté paralysé. Cette anomalie n'a pu être expliquée autrement que par la rencontre d'un "ion lourd". Ce type d'incident qui cause un changement d'état intempestif dans une case mémoire n'a qu'une conséquence opérationnelle sans gravité dans la mesure où il n'est pas trop fréquent (une fois en un an est largement acceptable). L'instrument a été remis dans sa configuration nominale de fonctionnement dès le lendemain après vérification du logiciel de vol.



AUX SUIVANTS

DORIS / SPOT3.

Le passager DORIS a été intégré sur SPOT3 dans le courant de l'été 90. Le récepteur, construit par Dassault Electronique, est le frère jumeau de celui qui équipe SPOT2 mais l'oscillateur ultra-stable et l'antenne ont été changés.

L'OUS embarqué sur SPOT3, développé par la société CEPE (Compagnie d'Electronique et de Piézo-Electricité) est moins sensible aux champs magnétiques et délivre directement au récepteur la fréquence

de référence de 10 MHz.

La nouvelle antenne conçue par la société STAREC, bien que plus compacte, tient les spécifications sévères imposées par la performance demandée à l'instrumentation DORIS. Sa conception radio-fréquence a été facilitée par l'utilisation d'un outil de modélisation numérique de ce type d'antenne mis au point par la société MOTHEMIM et le CNES.

DORIS intégré sur SPOT3 a subi avec succès les essais d'environnement et de compatibilité électro-magnétique. A noter en particulier un bon comportement de l'OUS CEPE en palier chaud à plus de 55° donc bien au-delà de la gamme de température qu'il subira dans sa vie orbitale et dans laquelle ses performances sont garanties.

DORIS / SPOT4.

Son développement a déjà commencé et il devrait être prêt pour une intégration en mars 1993. Un modèle de masse dont la réalisation est également en cours sera livré en septembre 1991 pour les essais de structure et d'environnement thermique de la "plate-forme".

DORIS / SPOT4 assurera la suite du service Localisation après DORIS / SPOT2 et DORIS / SPOT3.

Une option est à l'étude : l'orbite temps réel à bord. Cette orbite, bien évidemment moins précise que l'orbite DORIS calculée au sol, permettrait d'améliorer le produit image SPOT4. Ainsi, l'utilisateur disposera, en temps réel dans la télémessure image, de coordonnées du satellite l'affranchissant des erreurs d'extrapolation.

DORIS / TOPEX-POSEIDON.

L'instrument DORIS est en double sur TOPEX/POSEIDON car il est indispensable à la mission d'altimétrie. Il se compose d'une antenne STAREC, de deux OUS CEPE et de deux récepteurs améliorés par rapport aux modèles placés sur SPOT2 et SPOT3 : les modules récepteurs et boucles de phase sont plus performants et le logiciel de vol est entièrement intégré, ce qui facilite la mise en œuvre opérationnelle de l'instrument. L'ensemble, livré fin 90, est en cours

d'intégration ainsi que l'altimètre POSEIDON.

Les premiers essais d'intégration sont satisfaisants.



LE SEGMENT SOL DE CONTROLE ET DE TRAITEMENT

DORIS-POSEIDON

Le nouveau segment sol regroupera les fonctions de contrôle, de traitement et de stockage des mesures des instruments DORIS et POSEIDON ce qui permettra de raccourcir les délais de mise à disposition des données. Par exemple, l'orbite DORIS sera disponible sous 48 heures et les résultats de localisation sous 3 à 4 jours.

Par ailleurs une deuxième Balise Maîtresse sera implantée à Kourou (Guyane) et un deuxième Boîtier d'Acquisition de la Télémessure DORIS sera installé à Kiruna (Suède). Au plan système, ces deux améliorations pallient les points sensibles que sont la réception de la télémessure DORIS/SPOT et l'émission par la balise maîtresse de Toulouse. Le caractère opérationnel de DORIS s'en trouvera donc renforcé.

Une revue système du Segment Sol s'est tenue le 14 mars et le Centre de Contrôle et de Traitement DORIS-POSEIDON a bien entamé la phase de codage et de tests. Il sera prêt à temps pour le lancement de TOPEX-POSEIDON mi-92.

Albert Auriol - CNES.

exceeds 50 dB over Western Europe and south-east Asia. However, these levels are not disturbing operation of the DORIS system.

First heavy ion.

While overflying Florida at 16:00 on 3 December 1990, DORIS suddenly went quiet. There were no more measurement data blocks or housekeeping data blocks in the telemetry, and even the onboard software's "watchdog" hung. The only reasonable explanation we have is an encounter with a heavy ion. This type of incident, which causes single-event upsets (SEUs) on memory cells, has very slight operational impact, providing it does not occur too often - once a year is acceptable. The instrument was put back into its nominal operational configuration the next day, once the onboard software had been checked.



MORE ON THEIR WAY.

DORIS/SPOT-3.

The DORIS passenger payload was integrated on SPOT-3 in summer 1990. The receiver, built by Dassault Electronique, is a carbon copy of the one on SPOT-2, but the USO and antenna have been improved.

The onboard USO on SPOT-3, developed by CEPE (*Compagnie d'Electronique et de Piézo-Electricité*) is less sensitive to magnetic fields and delivers the 10-MHz reference frequency direct to the receiver.

The new antenna, designed by Starec, is much more compact and meets the stringent specs which the DORIS instrument must meet to provide such high performance. The RF stage was designed with the aid of a new digital tool, developed by MOTHESIM and CNES for antenna modelling.

The DORIS instrument on SPOT-3 successfully underwent environmental and electromagnetic compatibility (EMC) testing. Of particular note was the CEPE USO's good performance at a steady temperature of over 55°, i.e well above the temperature range which it will experience in orbit and in which performance is guaranteed.

DORIS/SPOT-4.

Development has started, and the instrument should be ready for integration in March 1993. A mass model, also being developed, will be delivered in September 1991 for structural and thermal environment testing of the bus. DORIS/SPOT-4 will take over Location service from DORIS/SPOT-2 and DORIS/SPOT-3.

A new option is currently being investigated : realtime orbital calculations on board the satellite. Although this would be less accurate than ground-based calculations, it would enhance SPOT-4 imaging. Users would have the satellite coordinates in real time with the image telemetry, with no extrapolation errors.

DORIS/TOPEX-POSEIDON.

DORIS is so vital to the TOPEX-POSEIDON mission that the satellite will carry two DORIS instruments. They comprise a STAREC antenna, two CEPE USOs, and two receivers with higher performance than those on SPOT-2 and -3. The receiver and phase lock loop (PLL) modules will also offer higher performance, and the onboard software is fully integrated to make operational use of the instrument easier. The complete equipment, delivered at the end of 1990, is now being integrated, as is the POSEIDON altimeter. The initial integration test results are satisfactory.



ENHANCED DORIS-POSEIDON GROUND SEGMENT.

The new DORIS-POSEIDON control and processing centre will provide monitoring, processing and storage capabilities for DORIS and POSEIDON data at a single site. It is scheduled to go operational in the first half of 1992, and will reduce data throughput times considerably. For example, the DORIS orbit will be available within 48 hours, and the location results in three to four days.

A Master Beacon (MB) will be set up at Kourou in French Guiana, and a second DORIS telemetry acquisition unit installed in Kiruna (Sweden). These two enhancements overcome problems in some sensitive areas of system operation, namely reception of the DORIS/SPOT-2 telemetry and transmissions by the Toulouse MB. DORIS' operational capabilities will be strengthened.

A ground segment system review was held on 14 March 1991 and the centre went into the encoding and test phase. We'll be ready and waiting for the TOPEX-POSEIDON launch in mid-1992 !

Albert Auriol - CNES.



Vérification des récepteurs DORIS pour TOPEX-POSEIDON.
Checking out DORIS receivers for TOPEX-POSEIDON.

PERFORMANCES DE LOCALISATION DU SYSTEME DORIS

Evolution des résultats après un an de données et perspectives de développement.



Le système DORIS, en tant que système de poursuite radioélectrique de satellites bas, a tout naturellement une fonction de localisation précise des balises au sol en plus de celle d'orbitographie précise du récepteur embarqué.

Cette fonction a en fait un double objectif :

- déterminer avec la meilleure exactitude possible les coordonnées du réseau orbitographique et leurs variations temporelles,

- déterminer les positions de balises ou de réseaux de balises, et ceci pour les diverses utilisations en positionnement géodésique.

Le premier objectif vise à la réduction d'un poste d'erreur important dans les calculs d'orbite de précision, ainsi qu'à la réalisation précise du système de référence terrestre dans lequel ces orbites seront calculées. L'exactitude et la stabilité dans le temps sont des aspects importants, notamment pour les missions d'altimétrie radar sur les océans.

Les possibilités de comparaison et ultérieurement, de combinaison avec d'autres systèmes de poursuite (laser, GPS...) sont également une préoccupation majeure aussi bien pour l'amélioration des orbites de satellites bénéficiant de plusieurs systèmes coexistants, comme TOPEX-POSEIDON, que pour l'analyse simultanée de plusieurs missions (par exemple pour la détermination du champ de gravité terrestre, ou de la topographie des océans). Cela est rendu possible grâce aux colocations nombreuses de balises DORIS avec d'autres réseaux.

Le second objectif vise les diverses applications scientifiques ou technologiques du positionnement absolu ou relatif, momentané ou permanent. En vue de la qualification des performances de localisation dans le cadre de la mission probatoire de DORIS sur SPOT2, quelques réseaux locaux ont été (ou seront) installés, en sus du réseau orbitographique : DJIBOUTI, HAWAI, ST ETIENNE DE TINEE (France) et au JAPON.

Ces expériences sont regroupées sous le nom d' "expériences pilotes".

Performances actuelles.

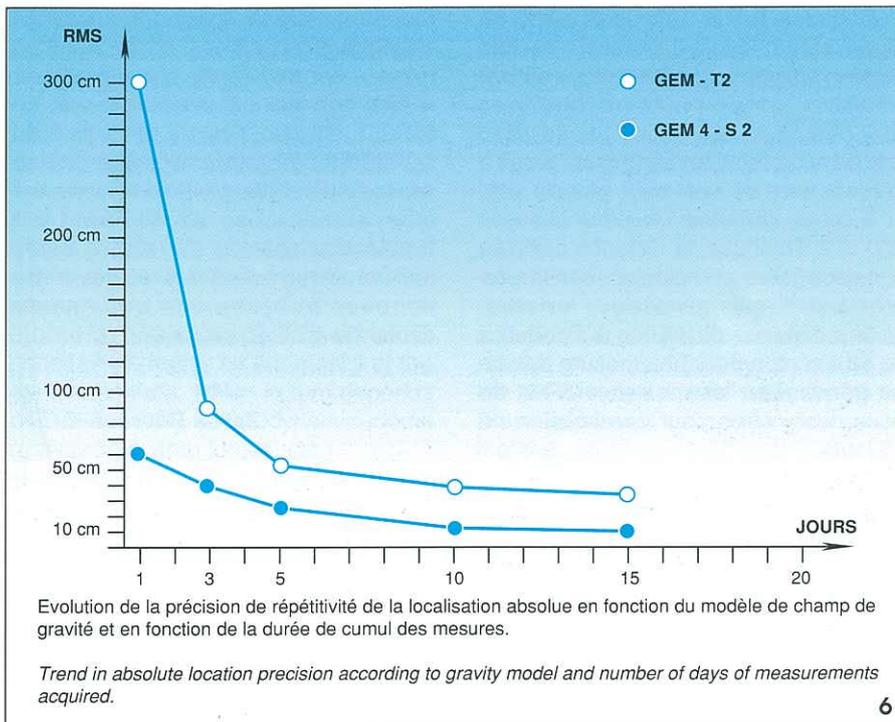
Dans les évaluations décrites ici, une localisation sera la détermination des coordonnées des antennes de balises dans le système de référence terrestre, dit Système Terrestre DORIS (S.T.D).

LOCALISATION ABSOLUE ABSOLUTE LOCATION ACCURACY

SYSTEME - SYSTEM	EXACTITUDE ACCURACY (cm)	DUREE D'OBSERVATION (jours) MEASUREMENT DURATION (days)
GPS Navigation avec SA <i>GPS Standard Positioning Service with Selective Availability</i>	10 000	0.1
GPS Navigation <i>GPS Standard Positioning Service</i>	2000	0.1
Transit opérationnel <i>Transit Operational Positioning</i>	200	15
GPS Précis <i>GPS Precise Positioning Service</i>	100	8
Transit précis <i>Transit Precise Positioning</i>	80	8
DORIS Eclair <i>DORIS Fast-Delivery Product</i>	50 - 100	1
SLR 2ème génération <i>2nd-generation Satellite Laser Ranging</i>	20	90
DORIS <i>DORIS Off-Line Product</i>	10	15
VLBI S/X M2 <i>Very Long Baseline Interferometry S/X M2</i>	5	10
GPS Ultra-précis <i>GPS Ultra-Precise positioning</i>	5	8
SLR 3ème génération <i>3rd-generation SLR</i>	3	60
VLBI S/X M3 <i>VLBI S/X M3</i>	< 2	3

DORIS GROUND LOCATION PERFORMANCE

Trend after one year, development prospects.



6



Although DORIS was originally designed to accurately locate satellites on their orbits, it also lends itself perfectly to the accurate location of ground beacons. Terrestrial location has two purposes:

- accurately determine the coordinates of orbit determination beacons (ODBs), and measure variations in time,
- locate users' Ground Location Beacons (GLBs), individual or networked, for geodetic applications.

ODB location reduces a major cause of error in calculating satellite orbits, and generates the terrestrial reference system which the calculations require. Accuracy and stability over time are important, particularly for oceanographic radar altimeter missions. Results can be compared and merged with those from other tracking systems such as laser systems and GPS. This is done by colocating DORIS beacons with other networks. Orbits of satellites carrying several systems, e.g. TOPEX-

POSEIDON, can then be refined, and sets of missions (e.g. determining the Earth's gravity field and the ocean topography) analysed simultaneously.

GLBs are used in various scientific and technological applications of absolute and differential location, whether *ad hoc* or ongoing. To qualify location performance for the trial mission of DORIS on SPOT-2, local networks are being set up in addition to those in the ODB network. These pilot experiments are being conducted in Djibouti, Hawaii and St. Etienne de Tinée (France), and planned for Japan.

Current performance.

In the following discussion of DORIS performance, "location" means determining beacon antenna coordinates in the terrestrial reference frame we call the DORIS Terrestrial System (DTS). The natural coordinates returned are three-dimensional, geocentric and cartesian. We shall look at the precision and accuracy in

Les coordonnées naturellement estimées sont des coordonnées cartésiennes tridimensionnelles et géocentriques. Nous nous intéresserons donc à la précision et l'exactitude des coordonnées d'un point A (localisation absolue), ou des différences de coordonnées de deux points A et B plus ou moins éloignés (localisation relative). Ce second cas est intéressant dans la mesure où une part des erreurs est corrélée géographiquement, et donc s'élimine en faisant ces différences.

Les calculs de localisation proviennent du Service de Localisation de Balises. Ils sont réalisés par CLS avec le concours de l'IGN. Le service opérationnel qui fonctionne depuis plus d'un an utilise une méthode géométrique et les éphémérides fournies par le Service d'Orbitographie DORIS du CNES.

Les performances de localisation sont actuellement principalement limitées par la qualité des éphémérides, elle-même tributaire des erreurs du modèle dynamique (champ de gravité, forces de frottement...).

Pendant les premiers mois d'exploitation, le modèle GEM-T2 a été utilisé. En parallèle, le GRGS, dans le cadre de son programme d'amélioration des modèles globaux de champ de gravité GRIM, en coopération avec le DGFI de München, a déterminé un nouveau modèle GRIM4-S2 incluant 3 mois de mesures DORIS.

L'évolution des résultats de la répétitivité absolue est résumée par le diagramme ci-dessus (fig. 6).

Il montre l'amélioration significative obtenue par l'utilisation du nouveau champ. A titre de comparaison, les résidus a posteriori des mesures Doppler lors du calcul de l'éphéméride passent de 5,4 mm/s avec GEM-T2 à 1,6 mm/s avec GRIM4-S2.

On voit donc qu'avec le modèle actuel, la répétitivité absolue se situe à 10 cm après traitement de données cumulées sur des durées d'au moins 15 jours.

La répétitivité relative a été estimée à partir de lignes de base obtenues dans le cadre d'expériences pilotes (Djibouti, Hawaï).

Elle varie en fonction de la distance, et de la durée d'observation :

- 5 cm au bout de 3 jours à 350 m,
- 5 cm au bout de 15 jours à 40 km,
- 12 cm à 80 km et 14 cm à 500 km au bout de 10 jours.

L'exactitude absolue a pu être évaluée en comparant sur les 12 stations en colocation avec des points laser ou VLBI (sites IERS). Après application d'une similitude à 7 paramètres, les résidus moyens quadratiques sont de 15 cm.

L'exactitude relative n'a pu être jusqu'à présent estimée que pour peu de cas, et à courte distance : sur une base de 350 m à Toulouse, la distance calculée sur deux jours coïncide au centimètre près à la mesure géodésique terrestre, et une distance de 15 km à Djibouti a pu être comparée à une mesure directe au géodimètre laser : l'accord est de deux centimètres pour une solution de 15 jours.

... Il semble raisonnable d'envisager qu'une exactitude subdécimétrique pourra être atteinte en absolu, et quelques centimètres en relatif pour des distances inférieures à 1000 km ...

Une solution semi-dynamique sur 9 mois de données a par ailleurs été établie au GRGS à titre d'analyse scientifique. Ses résultats évalués en termes d'ajustement par rapport au réseau IERS sont comparables à ceux de la méthode géométrique.

Perspectives de développement.

Le principal poste d'erreur reste causé par la modélisation dynamique encore insuffisante du mouvement du satellite : champ résiduel et forces de frottement. Un effort important doit donc être poursuivi dans ces domaines. Il faut remarquer que l'altitude basse de SPOT (832 km) est particulièrement pénalisante surtout en période d'activité solaire intense. La situation sera sensiblement plus favorable pour TOPEX/POSEIDON, lancé en 1992, à une altitude de 1330 km.

Il semble raisonnable d'envisager qu'une exactitude subdécimétrique

pourra être atteinte en absolu, et quelques centimètres en relatif pour des distances inférieures à 1000 km.

Ces performances placent DORIS à une place intéressante parmi les systèmes de positionnement, comme l'illustre le tableau précédent (fig. 5). De plus, l'intérêt du système pour la surveillance continue, notamment en réseau, est manifeste, notamment sur le plan opérationnel et économique. En effet, même dans le cas de DORIS/SPOT2, système probatoire où les conditions d'exploitation pourraient être améliorées, on obtient une localisation absolue ou relative après accumulation de 10 à 15 jours de données et après des traitements demandant 2 à 3 semaines.

Claude Boucher - I.G.N.



mapping a given point A (absolute location) and the difference in mapping two points A and B (differential location). [Note : precision refers to the agreement between repeated measurements, while accuracy refers to the long-term discrepancy between measurements and the true value.] Differential location is useful in that certain errors correlate geographically and cancel out.

Locations are generated by the DORIS beacon location service, run by CLS in collaboration with the IGN. The service has been operational for over a year, using a geometric method and the ephemeris data supplied by the DORIS orbitography service at CNES. At the moment, location performance is constrained mainly by the quality of the ephemeris data, which in turn depends on the accuracy of the dynamic model (gravity field, drag forces, etc.).

When DORIS was in its first few months of operation, back in 1990, we used the GEM-T2 model. Around that time, the GRGS was refining the GRIM global gravity field models in collaboration with the DGFI (Munich, Germany). A new model, the GRIM4-S2, was produced from three months of DORIS data.

The accompanying diagram (fig. 6) shows the variation in absolute precision. The improvement obtained using the new model is clear to see. The post-analysis Doppler residuals in the ephemeris calculations decrease from 5.4 mm/s with GEM-T2 to 1.6 mm/s with GRIM4-S2. With the current model (GRIM4-S2), absolute precision is 10 cm after processing of data acquired over at least two weeks.

Differential precision is estimated from the baselines obtained in the Djibouti and Hawaii pilot experiments. It varies according to the distance and observation period :

- 5 cm after three days, with a 350-m baseline,
- 5 cm after 15 days, with a 40-km baseline,
- 12 cm after 10 days, with an 80-km baseline,
- 14 cm after 10 days, with a 500-km baseline.

Absolute accuracy was evaluated by

comparing twelve DORIS beacons collocated with laser or VLBI (International Earth Reference Service [IERS]) instrumentation. The RMS residuals after a seven-parameter transform are 15 cm. Differential accuracy has so far been calculated infrequently, and only over short distances. Over 350 m in Toulouse, the distance calculated over two days is within a centimetre of the terrestrial geodetic measurement. A 15-km baseline at Djibouti was compared with a direct laser geodimeter measurement. The results from two weeks of data match to within two centimetres.

The GRGS has used nine months of data to produce a semi-dynamic solution for scientific analysis. The results, given as adjustments relative to the IERS network, are comparable to those achieved using the geometric method.

Development prospects

The main source of error is still inadequate dynamic modelling of satellite motion, i.e. the residual field and drag forces. Major efforts are still required in these areas. The low altitude of the SPOT orbit (832 km) is particularly penalizing, especially during intense solar flare activity. This will be less of a problem for TOPEX-POSEIDON, to be launched in 1992 into a 1330-km orbit. We can reasonably envisage 10 cm accuracy - or better - for absolute location, and differential accuracy of a few centimetres for distances under 1000 km.

These capabilities put DORIS in a strong position among location systems, as the accompanying table (fig. 5) shows. Its operational and economic benefits for continuous monitoring, particularly in networks, have now become clear. Even with DORIS/SPOT-2, a trial system with operational conditions which are far from ideal, differential and absolute location can be calculated from 10 to 15 days of data and two or three weeks of processing.

Claude Boucher - IGN.

... We can reasonably envisage 10 cm accuracy - or better - for absolute location, and differential accuracy of a few centimetres for distances under 1000 km ...

APPLICATIONS GEODYNAMIQUES DU SYSTEME DORIS

L'EXPERIENCE PILOTE A DJIBOUTI (AFARS).

Au cours des dernières années, les performances des techniques de la géodésie spatiale ont doté les géophysiciens d'un outil permettant d'aborder un nouveau domaine de la Géodynamique : la mesure des déformations tectoniques actuelles de la surface terrestre.



La géodésie spatiale offre trois catégories de techniques pour mesurer avec une précision centimétrique les déformations de la surface terrestre : la télémétrie laser sur satellite, l'interférométrie à grande base et le Doppler sur satellite. La télémétrie laser et l'interférométrie permettent d'obtenir des résultats de grande précision : centimétriques en positionnement et quelques mm/an en vitesse. Malheureusement, ces techniques sont lourdes et coûteuses à mettre en œuvre et pour l'instant, les réseaux de stations sont très mal répartis sur la surface terrestre.

Les techniques radio-fréquences, employées avec les systèmes GPS ou DORIS, offrent en revanche des possibilités plus grandes. Elles permettent de disposer de réseaux mobiles plus faciles à implanter et donc bien adaptés à la surveillance de zones pré-déterminées comme les frontières

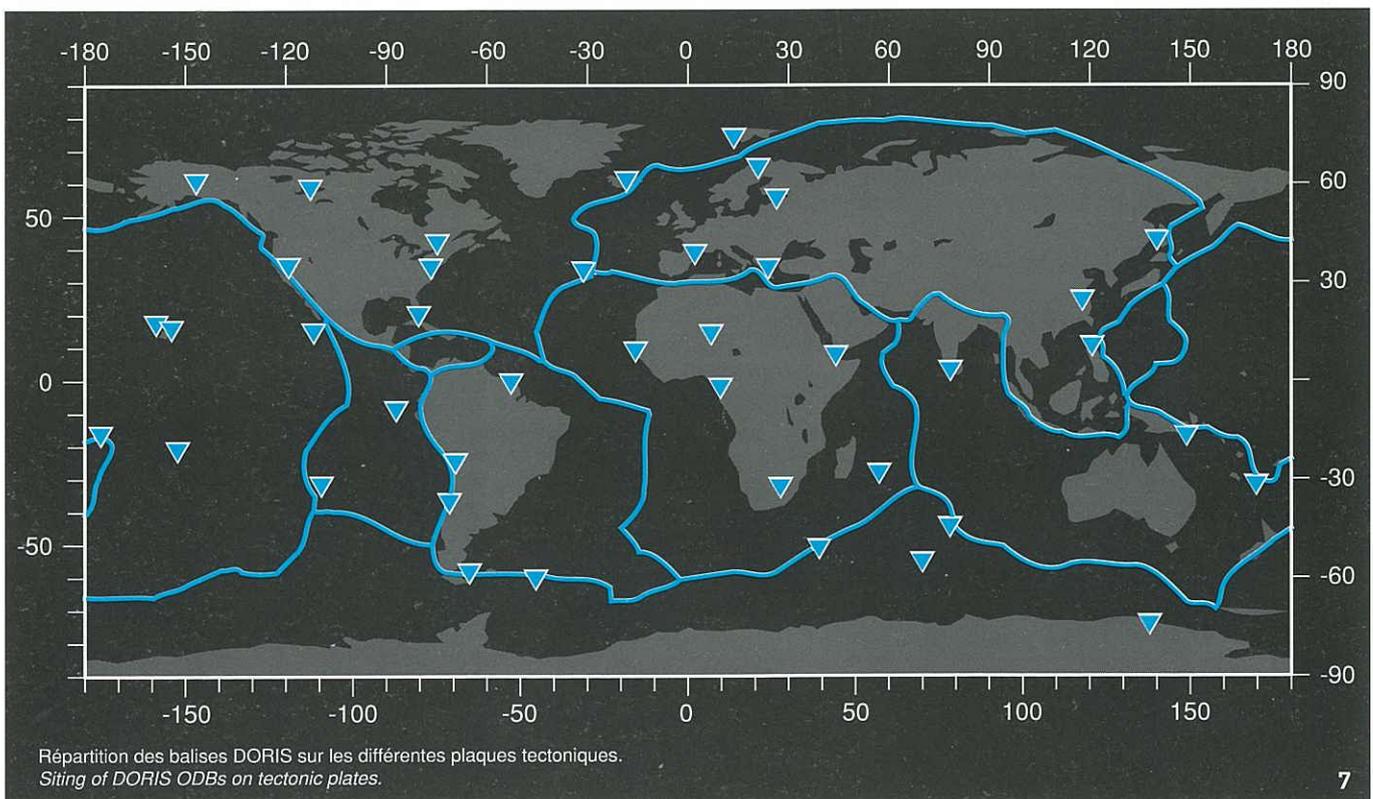
de plaques ; elles permettent également de réaliser un suivi permanent des déformations, soit par des campagnes de mesures à intervalles réguliers, soit par des mesures en continu sur plusieurs années.

En Géodynamique, grâce à ces techniques, les objectifs poursuivis sont doubles :

1° A très grande échelle (1000-10000 km),

le positionnement relatif à une précision centimétrique de points espacés de plusieurs milliers de kilomètres permet de mesurer les mouvements globaux actuels des plaques tectoniques qui sont de l'ordre de 1 à 20 cm/an.

Les premières solutions obtenues à l'aide du satellite Lageos (muni de réflecteurs laser) ont récemment montré qu'en première approximation il existe un bon accord avec les prévisions des modèles géologiques.



DORIS APPLICATIONS IN GEODYNAMICS PILOT EXPERIMENT IN DJIBOUTI (EAST AFRICA)

In recent years space geodesy has enabled geophysicists to open up a new field in geodynamics : the measurement of deformations in the Earth's tectonic plates.



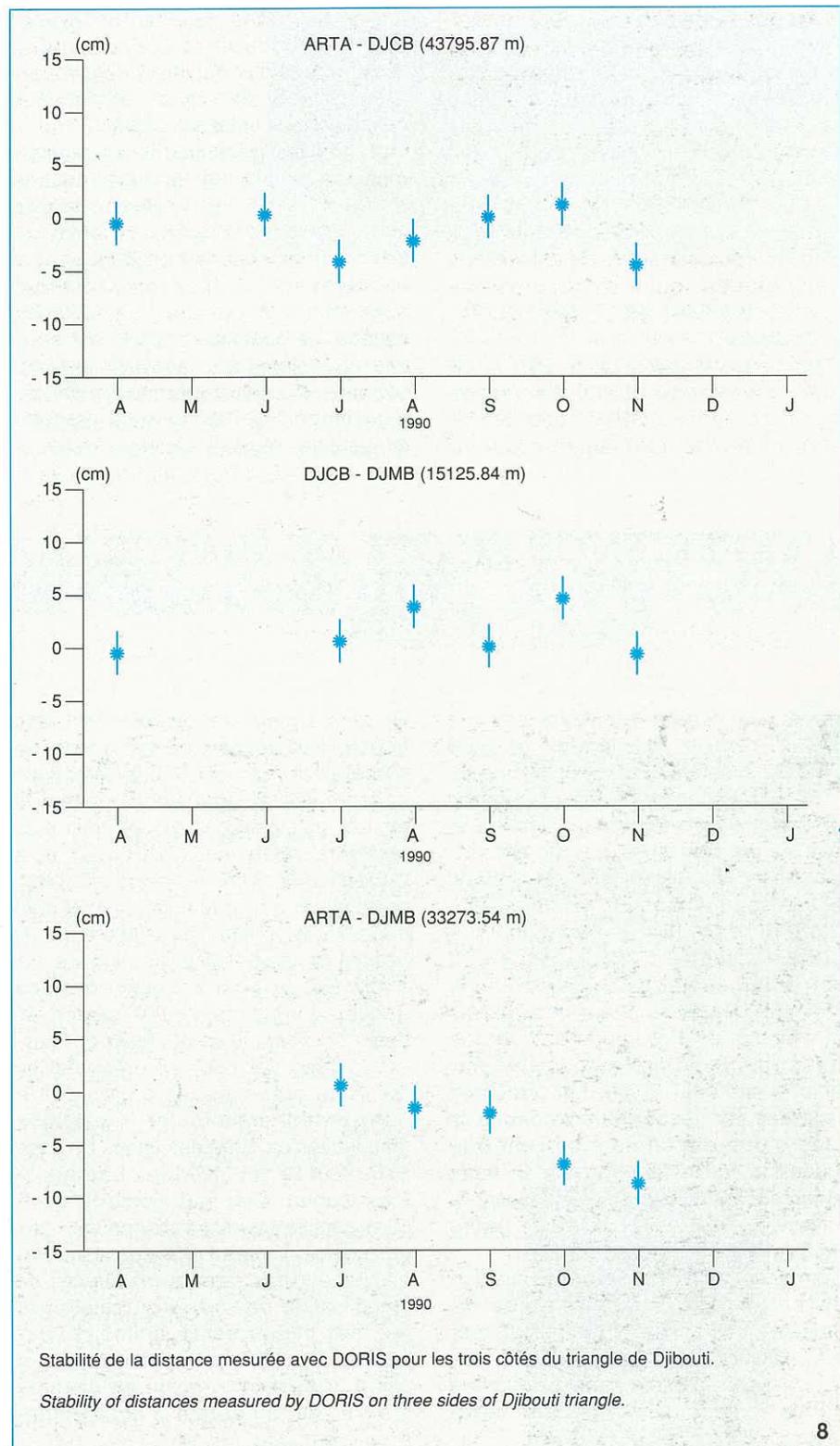
Space geodesy can measure surface deformations to within centimetres. The three methods are satellite laser

telemetry, very long base interferometry (VLBI) and satellite-observed Doppler shifts. Laser telemetry and interferometry are extremely accurate: they locate to within a centimetre and identify movement to within a few millimetres per year. Unfortunately they are also unwieldy and expensive, and ground stations are spread unevenly over the world.

Satellite-based radio-frequency techniques, via GPS or DORIS, are more flexible. The networks are mobile and easier to install and therefore suitable for monitoring areas of interest such as plate boundaries. Deformations can be permanently monitored, either at regular intervals or continuously over several years.

In geodynamics, these methods are being used to conduct two types of studies:

1. Large scale (1000 to 10 000 km), for differential location with centimetre-range accuracy, of points thousands of kilometres apart, to provide data on current global plate motion. The first results from the Lageos satellite with laser reflectors largely agree with the forecasts from geologic models. There are, however, inter-annual variations of a few millimetres, which may reveal real differences between today's instantaneous motions determined by space geodesy and the mean displacements over two or three million years deduced from geologic measurements.



Des écarts de quelques millimètres par an subsistent néanmoins révélant peut-être une différence réelle entre les mouvements instantanés contemporains déterminés par la géodésie spatiale et les mouvements moyens des 2-3 derniers millions d'années déduits des mesures géologiques.

Il reste essentiel de poursuivre ces études à travers les frontières de plaques. Tout d'abord, en multipliant le nombre des lignes de base car elles sont largement limitées aux mesures entre l'Europe et l'Amérique où sont implantées la majorité des stations laser et d'interférométrie. Ensuite, en déterminant les mouvements des plaques pour lesquelles les estimations géologiques sont médiocres ou inexistantes (plaques Caraïbes, Coco, Philippines...)

Comme le montre la carte (fig. 7) ci-jointe, le réseau global de balises d'orbitographie DORIS constitue le premier réseau permanent couvrant

l'ensemble des plaques. Il va permettre à terme de compléter de manière significative l'ensemble des déterminations existantes ou de faire les premières mesures lorsqu'elles n'existent pas.

2° A l'échelle régionale (10-1000 km), les applications de positionnement précis concernent l'étude des déformations aux frontières de plaques, la surveillance des régions sismiques et la surveillance volcanologique.

Les modèles géologiques ne permettent pas de prédire les déformations aux frontières ; or, l'essentiel des déformations de la surface terrestre ont lieu dans les régions frontières et sont associées à des mouvements horizontaux et verticaux d'amplitudes variées. La géodésie spatiale est donc irremplaçable pour assurer le suivi permanent ou quasi-permanent de ces mouvements qui concernent presque toujours des régions à forte sismicité.

Le système GPS est sans doute actuellement le plus précis pour la surveillance locale, et permet la constitution de réseaux denses à maillages fins (quelques dizaines de kilomètres). Cependant, il n'offre que des mesures relatives et demande l'organisation de campagnes régulières car il n'est pas très adapté à un suivi permanent.

Avec le système DORIS, le positionnement absolu et relatif en continu est possible. Les premiers résultats de positionnement précis obtenus par méthodes géométrique et semi-dynamique indiquent une précision de quelques centimètres pour des lignes de base courtes (inf. à 100 km). Pour des lignes de base plus longues, (1000-5000 km), une précision de 2 à $3 \cdot 10^{-8}$ en positionnement relatif est déjà atteinte, elle sera certainement améliorée.

L'EXPERIENCE PILOTE DE SURVEILLANCE TECTONIQUE DU RIFT D'ASAL DANS LES AFARS : RESULTATS



La région des Afars est une région d'intense activité tectonique. C'est une zone de jonction entre trois frontières de plaques en extension : Afrique, Arabie et Somalie. Le rift d'Asal-Ghoubbet en République de Djibouti est la continuation de la dorsale du golfe d'Aden. Il a une structure de dorsale émergée d'une largeur de 15 km. Il fait l'objet d'une surveillance intensive depuis 1973 par des équipes de l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) et de l'Institut Géographique National (IGN). Les mesures réalisées par géodésie terrestre depuis plus d'une décennie montrent une extension horizontale d'environ 6 cm/an jusqu'en 1988. Depuis cette date, la vitesse d'ouverture du rift est de l'ordre de 2 cm/an.

Compte tenu de l'intérêt géophysique de cette zone, de l'existence de mesures anciennes et pour confirmer les possibilités du système DORIS aux frontières de plaques, une expérience pilote a été entreprise dans cette région.

Deux balises de terrain ont été implantées de part et d'autre du rift d'Asal pour mesurer les déformations horizontales et verticales à travers le rift, une troisième balise appartenant au réseau de référence DORIS et située à l'Observatoire d'Arta près de Djibouti complète le dispositif expérimental dont on trouve le schéma sur la figure 9. Les balises fonctionnent en routine depuis Avril 1990 (avec interruption de l'une d'elles au printemps 1990), seules les données disponibles en 1990 ont déjà été traitées. La figure 8 présente les résultats préliminaires pouvant être interprétés comme les variations mensuelles en 1990 des lignes de base Arta-Kadda et Kadda Ladinis - Moudououd. Des variations de quelques centimètres sont observées, nous pensons qu'elles reflètent vraisemblablement des erreurs résiduelles de modélisation de l'orbite du satellite et non des mouvements véritables. Par ailleurs, l'expérience n'étant qu'à son début, il n'est pas encore possible de mettre en évidence l'écartement séculaire du rift.

Toutefois, cette expérience a déjà permis une calibration externe réalisée par comparaison avec une mesure effectuée au géodimètre laser par une équipe de l'IPGP entre Kadda Ladinis et Moudououd. Pour cette ligne de base, les solutions DORIS donnent une valeur de $15\ 125.85 \pm 0.02$ m et la mesure par géodésie terrestre donne $15\ 125.83 \pm 0.02$ m. Les résultats préliminaires de mesures GPS réalisées également en février 1990 par l'IPGP et l'IGN indiquent une valeur similaire.

Les premiers résultats DORIS sont tout à fait encourageants. L'expérience pilote va se poursuivre de manière à mettre en évidence et à quantifier l'accroissement actuel de la ligne de base associée à l'ouverture du rift.

Anny Cazenave - CNES/GRGS

This research needs to be continued across plate boundaries. The number of baselines must be increased; the existing ones are largely based on laser and interferometry stations in Europe and America. Data is needed, too, on plate motion in geologically data sparse areas such as the Caribbean, Cocos and Philippines plates.

The accompanying map shows the existing network of DORIS ODBs. They cover all the world's plates and will significantly extend our knowledge of plate dynamics.

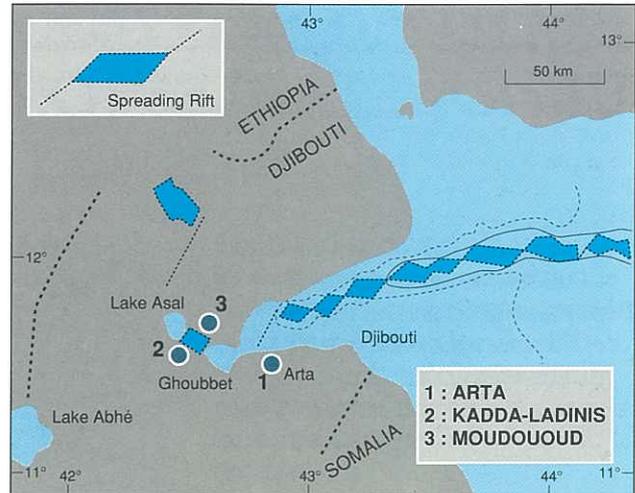
2. Regional scale (10 to 1000 km)

to detect deformation at plate boundaries, monitor regions of high seismicity, and monitor volcanology.

Geologic models cannot predict boundary deformation. It so happens that most surface deformation occurs near plate boundaries, with horizontal and vertical motions of varying extents and durations. They usually occur in regions of high seismicity. Space

geodesy is the only way of monitoring these motions permanently or near-permanently. GPS is probably the most accurate system for local monitoring and can provide densely-gridded networks (every few tens of kilometres). The measurements, however, are only relative and field work must be repeated regularly, since permanent monitoring is not practical.

DORIS provides continuous absolute and differential location. The initial findings using geometric and semi-dynamic methods indicate accuracy of a few centimetres on baselines under



100 km. With longer baselines (1000 to 5000 km) relative location accuracy of $2 \cdot 10^{-8}$ to $3 \cdot 10^{-8}$ has already been achieved, and these figures can certainly be improved.

PILOT EXPERIMENT IN TECTONIC MONITORING: PRELIMINARY RESULTS



The Afars region is marked by intense tectonic activity. It is the meeting point of three spreading plates : Africa, Arabia and Somalia. The Asal-Ghoubbet sub-areal rift in the Republic of Djibouti, a continuation of the Aden ridge, is fifteen kilometres wide. It has been closely monitored since 1973 by teams from the *Institut de Physique du Globe de Paris* (IPGP) and the French National Geographic Institute (IGN). Studies of terrestrial geodesy over the last decade reveal horizontal spreading of about 6 cm/year until 1988, since when the rift has been opening at a rate of about 2 cm/year.

Because the region is of great geophysical interest and historical data is available, a pilot experiment was set up to test DORIS capabilities on plate boundaries. Two ground location beacons (GLBs) were set up either side of the Asal rift to measure horizontal and vertical deformations across it. A third beacon in the DORIS reference

network at the Arta observatory near Djibouti completed the array (see figure 9). The beacons began routine operation in April 1990 (although one stopped temporarily in spring 1990); only the 1990 data has been processed so far. Figure 8 shows the preliminary findings, giving the apparent monthly variations in the Arta-Kadda and Kadda Ladinis - Moudououd baselines in 1990. Variations of a few centimetres can be observed, but we think these reflect residual errors in the satellite orbit model rather than actual motions. The experiment is just beginning and long-term rift motion cannot yet be proven.

The experiment has, however, already provided external calibration through comparisons with laser geodimeter measurements by an IPGP team between Kadda Ladinis and Moudououd. DORIS produced a value of $15125.85 \text{ m} \pm 0.02 \text{ m}$ for the baseline and terrestrial geodesy $15125.83 \text{ m} \pm 0.02 \text{ m}$. The preliminary results of

GPS measurements, also carried out in February 1990 by the IPGP and IGN, are similar.

The first DORIS results are very encouraging. The pilot experiment will continue, to determine and quantify the extension of the baseline caused by the opening of the rift.

Anny Cazenave - CNES/GRGS.



LES OSCILLATEURS ULTRA-STABLES (O.U.S.)

Le système DORIS est basé sur l'utilisation d'oscillateurs très performants : dans les balises, ils servent à construire, par multiplication de fréquence, les signaux qui seront transmis vers le satellite.



Dans le récepteur, un oscillateur de qualité équivalente est nécessaire pour servir de référence dans la transposition de fréquence et la mesure de la variation de phase des signaux reçus. Il est également utilisé comme horloge : toutes les mesures sont ainsi datées dans la même échelle de temps. Le principe de l'effet Doppler entraîne que toute variation de fréquence, soit à l'émission, soit à la réception, sera interprétée comme une erreur sur la vitesse relative balise-satellite. La précision de mesure du système, 0,3 mm/s, correspond à une erreur de fréquence de 10^{-12} , provenant d'une part du bruit sur la liaison radio-électrique, et d'autre part de chacun des deux oscillateurs ayant une stabilité de quelques 10^{-13} pendant la durée de comptage.

Cette performance revient à une variation de une seconde tous les cent mille ans !...

En réalité, la comparaison n'est pas correcte, car le comportement des OUS dépend du temps de comptage. Pour les besoins de DORIS, on définit :

- la stabilité à court terme, d'une mesure à l'autre (10 secondes),
- le moyen terme : variations lentes sur un passage du satellite (quelques minutes),
- les dérives à long terme (sur un jour, ou par mois).

Le besoin en stabilité provient du choix d'un système à simple trajet : on doit supposer, lors du traitement, que les fréquences bord et sol ont été stables pendant la durée d'un passage en visibilité. Toute variation à court terme se traduit par une augmentation du bruit de mesure, mais les variations plus lentes sur un passage sont encore plus gênantes : elles créent une erreur de vitesse qui peut avoir une forme voisine de celle créée par une erreur d'orbite ou de position de balise.

Un OUS "typique" avec une pente de $2 \cdot 10^{-13}$ par minute plus un bruit court terme de $2 \cdot 10^{-13}$, va créer une erreur de position de 4 cm pour un passage de SPOT. Heureusement, ces erreurs se

décorrèlent en grande partie d'un passage à l'autre.

Les dérives à long terme ne jouent pas sur la précision du système, puisque les fréquences moyennes par passage sont supposées inconnues et estimées lors du traitement. La seule contrainte est de maintenir le calage des émissions des balises sur le temps atomique international : des dérives de l'ordre de 10^{-11} par jour n'entraînent qu'une remise à l'heure tous les ans.

Le besoin en stabilité sur des durées de 10 à 500 secondes a conduit le projet à choisir des oscillateurs à quartz haut de gamme, qui représentent dans cette plage de temps de comptage le meilleur compromis coût-performance-état de développement par rapport à d'autres solutions comme les maser à hydrogène ou les horloges atomiques à rubidium ou césium (fig. 12).

Les performances spécifiées ($5 \cdot 10^{-13}$ sur 10 secondes, $4 \cdot 10^{-13}$ par minute, et 10^{-10} par jour) imposent que le "cœur" de l'OUS, c'est-à-dire le cristal de quartz (ou résonateur), et l'électronique associée (l'oscillateur), soient de haute qualité. Ces performances doivent être maintenues dans l'environnement du satellite (fluctuations de température, de champ magnétique, irradiations) et des balises (variations de pression, température, humidité), après avoir subi les vibrations du transport (lancement, ou expédition de balises). Un OUS est donc à lui seul un petit "système" qui doit être optimisé aussi bien sur les plans mécanique, thermique, qu'électrique. Par exemple, un thermostat à double enceinte maintient le quartz à 0,01 degré près lorsque la température externe varie de 40 degrés. Sur SPOT, il a fallu inclure l'OUS dans un blindage magnétique pour l'isoler des variations de champ produites par le système de stabilisation du satellite, ou simplement par le champ terrestre.

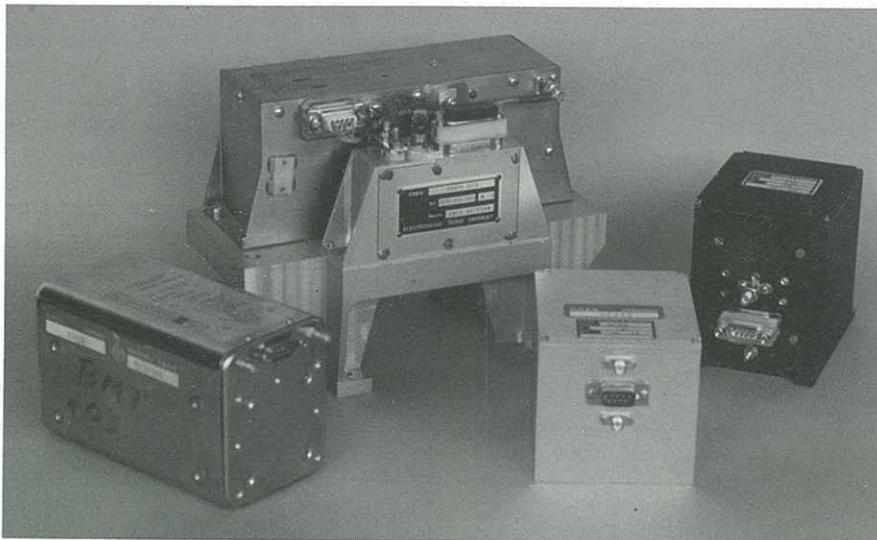
Les OUS du projet DORIS (fig. 11) ont été approvisionnés chez plusieurs industriels : d'abord FEI (USA) pour SPOT2, puis CEPE (France) pour SPOT 3, TOPEX - POSEIDON et



Equipement d'essais des oscillateurs.
Oscillators ground support equipment.

10

ULTRA-STABLE OSCILLATORS ON DORIS



The heart of the DORIS system is the high-performance Ultra-Stable Oscillators (USOs) carried by all beacons and the satellites. The beacon USOs generate signals by frequency multiplication for transmission to the satellite.

11

OUS DORIS bord et sol. / DORIS onboard and ground USOs.



The onboard receiver carries an equally high quality oscillator which is the reference for frequency conversion and measuring phase variations on the received signals. It also time-tags all signals in the same time scale.

In Doppler calculations, any frequency variation on transmission or reception is interpreted as an error on the beacon-satellite relative velocity. The measurement accuracy of 0.3 mm/s corresponds to a frequency error of 10^{-12} , which is due to radio noise and the two oscillators. Oscillators with stability of a few parts in 10^{-13} during the Doppler count are therefore required. In other words, one second every hundred thousand years! In fact, the comparison does not work, since USO behaviour depends on the length of the Doppler count. For DORIS, the following are defined:

- short-term stability from one measurement to the next (10 seconds),
- medium-term stability: slow variations during a satellite pass (a few minutes),
- long-term drift (over a day or a month).

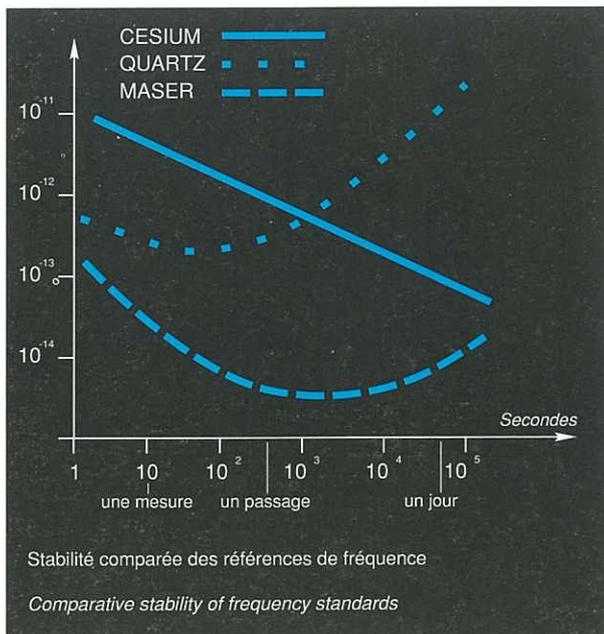
The stability requirement comes from DORIS being a one-way system. During processing, it is assumed that

the onboard and ground frequencies were stable during the satellite pass. Any short-term variation translates as an increase in measurement noise. But slower variations during a pass are even more of a problem : they create a velocity error which can be shaped like orbital error or beacon position error. A "typical" USO with a slope of $2 \cdot 10^{-13}$ per minute causes positional error of 4 cm for a SPOT pass. Fortunately, these errors largely decorrelate from one pass to the next.

Long-term drift does not affect system accuracy, since the mean frequencies over a pass are assumed to be unknown and are estimated during processing. The only constraint is that beacon transmissions must be set to international atomic time: drift on the order of 10^{-11} can be overcome by resetting once a year.

To ensure we met the requirements for stability over periods of 10 to 500 seconds, we chose high-quality quartz oscillators. These provide a better cost-performance-development tradeoff in that range than other solutions such as hydrogen masers or rubidium or cesium atomic clocks (fig. 12).

The performance specifications ($5 \cdot 10^{-13}$ over ten seconds, and slopes of $4 \cdot 10^{-13}$



12

SPOT4. Pour les balises, 76 oscillateurs ont été achetés jusqu'ici chez Oscilloquartz. Il s'agit d'un produit catalogue avec une sélection supplémentaire en fabrication, due aux exigences particulières du projet DORIS.

Tous ces oscillateurs ont été caractérisés en détail, chez les fournisseurs, puis au laboratoire Temps-Fréquence du CNES, dans des conditions voisines de celles qu'ils rencontrent dans la réalité, par exemple des vibrations, ou des gradients thermiques pour évaluer les performances du système de régulation. Cette évaluation a nécessité la mise au point de bancs de tests spécifiques (fig. 10), une difficulté à ce niveau de précision étant de disposer d'une référence et d'un environnement fiables pour le matériel de test. Un grand nombre d'informations ont été produites et sont stockées sur support informatique (fig. 13 et 14) ; elles restent à la disposition du projet pour des traitements complémentaires ou pour des comparaisons avec les valeurs de fréquence et de stabilité qui sont fournies dans le calcul d'orbite. Un suivi des fréquences est effectué régulièrement lors de ce calcul, validé par des campagnes de calibration. Le projet DORIS a permis d'engager des travaux très approfondis sur les différentes techniques qui concourent à la stabilité des OUS. Le CNES, associé

à d'autres organismes concernés par le développement de cette compétence dans ce cadre national, a mené de nombreuses études dans l'industrie ou les laboratoires (CNRS, ONERA). Elles ont abouti à la qualification chez CEPE d'un OUS spatial pour DORIS et d'autres projets, notamment en télécommunications.



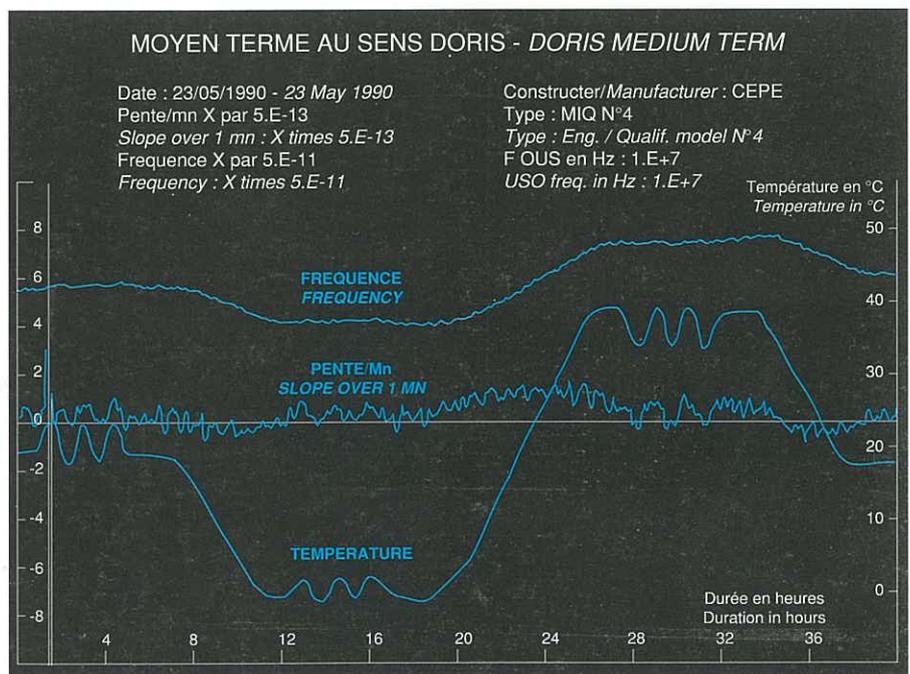
Michel Brunet

Les travaux en cours pour améliorer encore les performances devraient conduire à un gain d'un ordre de grandeur dans les 5 à 10 ans à venir, avec des stabilités à court terme de quelques 10^{-14} et à long terme de quelques 10^{-12} par jour.



Bernard Laporte

Michel BRUNET, Bernard LAPORTE et Michel DORRER - CNES.



Essai en température d'un oscillateur embarquable. / Thermal testing of a satellite onboard USO.

13

a minute and 10^{-10} a day) call for a very high quality quartz crystal (or resonator), which, with the oscillator electronics, forms the heart of the USO. The specs must be met both in the satellite environment (despite variations in temperature, magnetic field and irradiation) and in the beacon environment (pressure, temperature and relative humidity variations) even after transport, i.e. satellite launching or shipping of beacons. A USO is thus a complete system which must be optimized mechanically, thermally and electrically. For example, a double-shielded thermostat maintains the crystal to within 0.01° when the surrounding temperature varies by 40° . On SPOT, the USO had to be magnetically shielded to isolate it from field variations produced by the satellite stabilization system and the terrestrial field.

The DORIS USOs (fig. 11) were procured from several manufacturers: FEI (USA) for SPOT-2, then CEPE (France) for SPOT-3, TOPEX-POSEIDON and SPOT-4. For the beacons, 76 oscillators have so far been bought from Oscilloquartz. These are off-the-shelf products, though they underwent extra screening during manufacturing to ensure they met the stringent DORIS specs.

All the oscillators were tested in detail, first at the suppliers then at the CNES Time-Frequency lab, in near real-life conditions. These included vibration tests, and thermal gradient tests to assess performance of the stabilization system. Dedicated test sets had to be produced (fig. 10). One of the problems at this level of precision is to obtain a sufficiently reliable environment and standards for the test equipment. Large amounts of computer data were produced (fig. 13 & 14), and are now available for the project to do additional processing or make comparisons with frequency and stability data generated in the orbital calculations. Frequencies are monitored routinely during the calculations, and validated by calibration.

The DORIS project has led to in-depth work on the different techniques contributing to USO stability. CNES and other organizations developing this technology in France have conducted

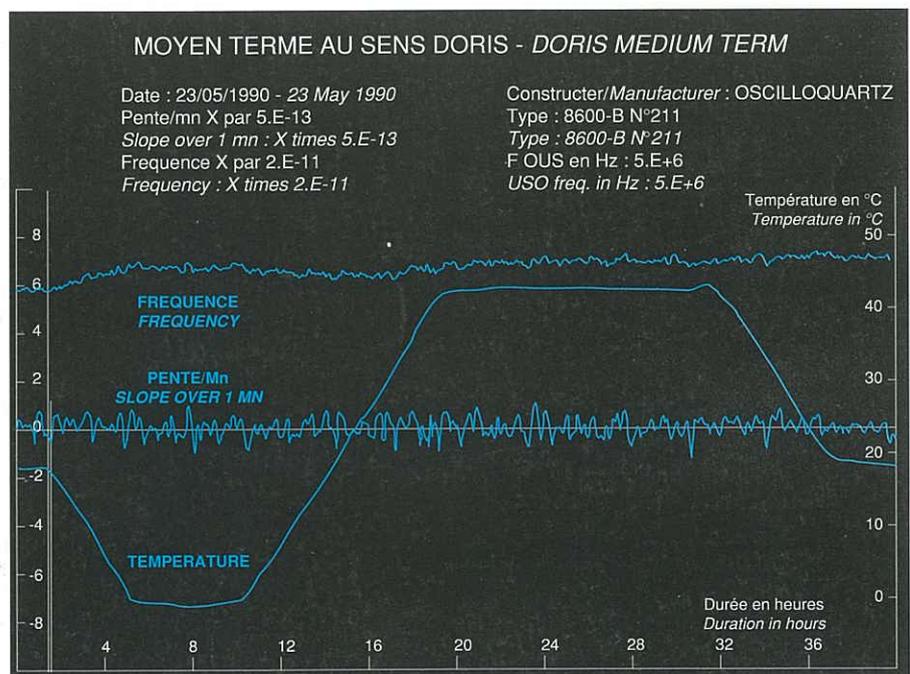
many studies in industry or in labs such as the CNRS and ONERA. As a result, a satellite USO has been qualified at the CEPE for use on DORIS and other projects, in particular for telecommunications.

Work in hand to increase performance further is expected to provide gains of an order of magnitude in the next five to ten years, with short-term stability of a few parts in 10^{-14} and long-term stability of a few parts in 10^{-12} a day.

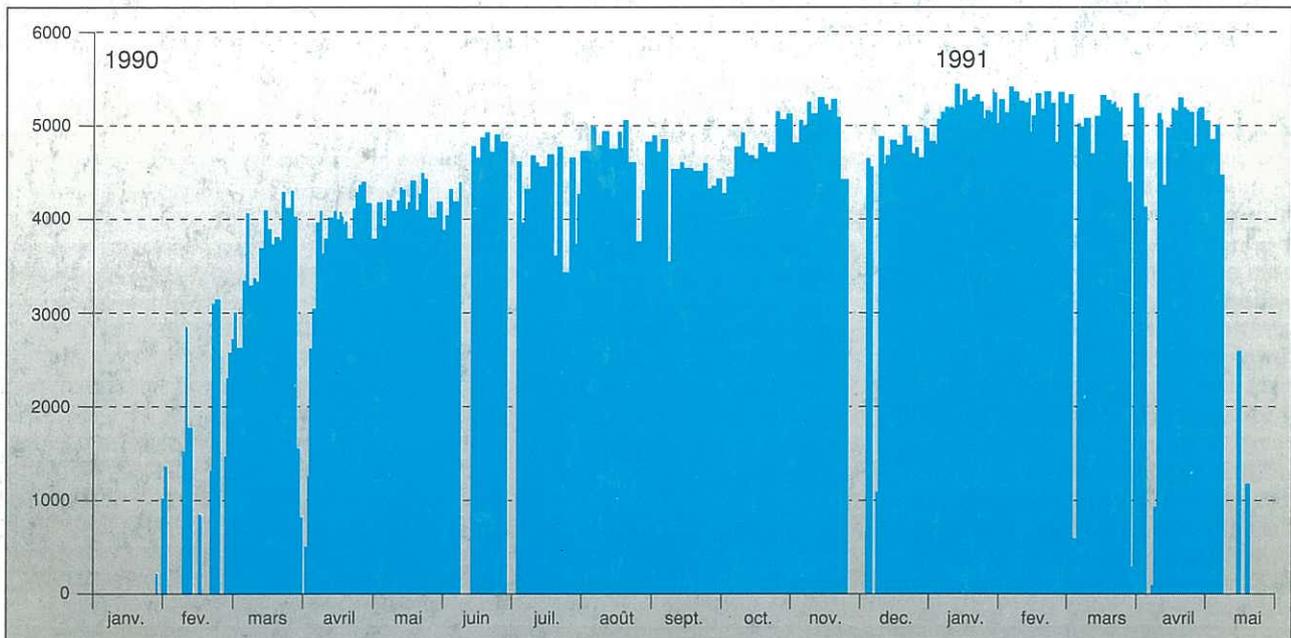
*Michel Brunet, Bernard Laporte,
Michel Dorrer - CNES.*



Michel Dorrer



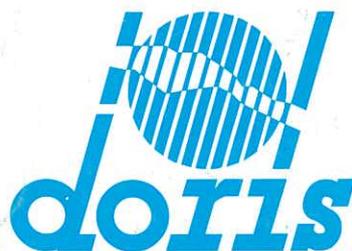
Essai en température d'un OUS balise. / Thermal testing of a beacon USO.



Nombre de mesures DORIS collectées par jour et déjà traitées / Number of DORIS measurements collected per day and already processed.

• Pour en savoir plus :
 CLS peut fournir toute information complémentaire.
 Contactez Philippe Gros au 61 39 47 20
 ou Jean-Pierre Chassaing au (1) 45 08 77 54.

• For further information :
 please contact Philippe Gros (33) 61 39 47 20
 or Jean-Pierre Chassaing (33) (1) 45 08 77 54.



Cette plaquette est réalisée par CLS en coopération avec le CNES et l'IGN.
 This Newsletter was produced by CLS in cooperation with CNES and the IGN.