

DORIS-DIODE : DE SPOT4 A JASON 1

C. JAYLES, J.-P. BERTHIAS, D. LAURICHESSE,
CNES, 18 avenue Edouard Belin, 31401 Toulouse Cedex 4, France
S. NORDINE, P. CAUQUIL
COFRAMI, Le Pré-Catelan, 97 rue Riquet, 31000 Toulouse
e-mail : Christian.Jayles@cnes.fr Fax : +33-561-28-18-55

0. RESUME

A bord du récepteur DORIS/SPOT4, pour la première fois, une fonction de détermination de l'orbite en temps réel est en fonctionnement permanent. Ce "navigateur", nommé DIODE (Détermination Immédiate d'Orbite par DORIS Embarqué), produit depuis Mars 1998 une estimation de la position de SPOT4 de quelques mètres de précision 3D, avec une disponibilité de 99.6%, et une fiabilité de 99.7%.

Ses résultats sont déjà utilisés quotidiennement par SPOT IMAGE et VEGETATION (au sol, pour la rectification des images), et POAM3 (à bord, pour le pointage d'un terminal optique).

Sur Jason 1, ainsi que sur SPOT5 et ENVISAT 1, DIODE et le logiciel de gestion du Récepteur DORIS ont été rapprochés en un seul logiciel, et l'utilisation directe à bord du "savoir" de DIODE a été fortement accrue, permettant la définition de fonctionnalités nouvelles (auto-programmation, datation de Tops plateforme, auto-initialisation, ...). Dans le même temps, les algorithmes de DIODE ont été optimisés et se sont faits plus précis, amenant la détermination de l'altitude à une précision de l'ordre de 15 centimètres. Enfin, avec un récepteur plus résistant par rapport à l'environnement radiatif, DIODE vise une disponibilité proche de 100%.

Ceci permettra d'utiliser les résultats de DIODE pour un traitement immédiat des mesures d'altimétrie dès leur arrivée au sol.

1. INTRODUCTION

La connaissance de l'orbite à bord et en temps réel permet à DIODE de fournir des produits au Logiciel de Vol et aux instruments embarqués, ainsi qu'aux segments sol de contrôle ou de traitement des données. L'ensemble d'un système satellitaire peut alors bénéficier de cette approche nouvelle, pour améliorer ses traitements ou ses délais de fourniture.

En sept ans de discussions avec des utilisateurs futurs ou potentiels des produits DIODE, s'est posée plusieurs fois la même question : " que vais-je faire d'estimations de position et de vitesse à bord de mon satellite ? ". D'une plateforme à l'autre, plusieurs éléments de réponse ont été apportés.

Différentes fonctionnalités, fournissant différents produits sont décrites ci-dessous. Certaines ont déjà été réalisées lors de la mission SPOT4. D'autres sont arrivées plus tard, et attendent encore de voler (Jason 1, SPOT5, ENVISAT, ...). Une utilisation (calibration de manœuvre) n'a pas encore été mise en œuvre. Nous sommes certains que de nouvelles applications du Calcul d'Orbite Embarqué pourront se révéler dans les années à venir.

2.- PRINCIPES COMMUNS A TOUTES LES VERSIONS

Le projet DIODE (Détermination Immédiate d'Orbite par Doris Embarqué), a été créé par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) en 1991, après une étude de faisabilité menée de 1988 à 1990.

Il s'agissait de profiter de la réalisation des mesures à bord, pour effectuer un calcul immédiat de l'orbite "à la source". Il a alors été décidé d'embarquer dans le récepteur DORIS/SPOT4, à titre probatoire, un programme de Calcul d'Orbite Embarqué nommé DIODE.

Le logiciel orbitographique a été développé au CNES (Département Métrologie de l'Orbite de la division Mathématiques Spatiales), avec l'aide active de plusieurs entités (départements QL/RS, QL/EM, SEA/IL (ex-TB), PS/MP, groupe Ada, Centre d'Orbitographie Opérationnelle, équipes projets DORIS et SPOT, ...), et avec un support technique de la société COFRAMI. Toutes les versions de DIODE ont été écrites en langage Ada, et leur conception s'appuie sur la méthode HOOD (Hierarchical Object Oriented Design).

Le filtre de routine de DIODE est principalement composé de trois entités :

1 - Un extrapolateur, basé sur une intégration numérique (algorithme de Runge Kutta, formulation de Gill) et un modèle des forces s'appliquant au satellite. Cet extrapolateur propage le vecteur d'état toutes les dix secondes.

2 - Un filtre de Kalman qui traite les mesures fournies par le Récepteur DORIS pour corriger ce vecteur d'état. Celui-ci contient les paramètres de position-vitesse du satellite et quelques autres paramètres ajustés liés à chaque passage station. Ces paramètres sont :

- ⇒ un biais de fréquence dû aux décalages de fréquence des OUS balises,
- ⇒ un coefficient troposphérique, qui permet d'utiliser un modèle de troposphère très simplifié.

3 - Une modélisation des mesures DORIS, qui sont représentées par des différences de distance station-satellite entre deux tops. Les erreurs ionosphériques sont éliminées par combinaison des mesures aux deux fréquences. La grande différence entre les deux valeurs de fréquence (2036.25 et 401.25 MHz) est un avantage car le bruit de fréquence du récepteur n'est pratiquement pas amplifié par cette combinaison.

Enfin, DIODE utilise les mesures de phase et de synchronisation de chaque passage sur les Balises-Maîtresses (Toulouse et Kourou) pour ajuster le biais de fréquence de l'oscillateur DORIS, et pour estimer la différence entre le temps bord et le TAI. Cette différence est ensuite propagée en tenant compte du biais de fréquence OUS ajusté.

3. DIODE/SPOT4 : FONCTIONS DEJA DEMONTREES EN VOL

La première version de DIODE vole à bord de SPOT4 depuis le 26 Mars 1998. C'est le premier outil de détermination d'orbite embarquée à produire des résultats durables en vol. Il est toujours en opération aujourd'hui.

Une carte électronique réalisée par Thomson-CSF DETEXIS a été ajoutée au Récepteur DORIS. Le programme tourne sur un processeur dédié Marconi MAS 281 de type

MIL STD 1750A. Sa taille est d'environ 2500 lignes de code, pour environ 44 Koctets de place mémoire.

Pour cette première version, le modèle de forces est limité au potentiel de gravitation terrestre, développé à l'ordre 15x15. Les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

Version	SPOT4
Date de qualification	mi-96
Potentiel terrestre	15x15
Potentiel luni-solaire	non
Pression de radiation solaire	non
Ajustement du pôle	non
Force de Hill	non
Ajustement de poussée	non
Programmation du récepteur DORIS	non
Auto-initialisation	non
Indice de qualité	Très simple, sur les positions uniquement

3.1.- FONCTIONNEMENT PROPRE DU NAVIGATEUR

On détaille ici les performances de DIODE sur les aspects caractéristiques d'un programme de Calcul d'Orbite Embarqué : autonomie, disponibilité/fiabilité, précision.

3.1.1.- AUTONOMIE

Les trois premiers mois de vol de SPOT4 ont été consacrés aux tests et à la validation du satellite et des équipements bord. DIODE a commencé à être opéré en environnement nominal en Juin 1998. Entre cette date et Mars 1999, seulement QUINZE téléchargements ont été chargés vers DIODE, pour prendre en compte les évolutions du réseau DORIS (nouvelles stations), les manœuvres de maintien à poste, et la seconde supplémentaire dans la correspondance TAI-TUC : DIODE s'est donc montré très autonome.

=> Seul un petit nombre de paramètres doit être envoyé pour régler et maintenir le processus d'estimation. La commande de DIODE est très simple.

3.1.2.- DISPONIBILITE/FIABILITE

Depuis Mars 1998, si on exclut deux upsets DORIS (les processeurs de 2^{ème} génération sont beaucoup plus robustes aux radiations que celui de DORIS/SPOT4), deux événements ont nécessité une réinitialisation de DIODE :

- un événement en Juillet 1998, dont la cause n'a pas été élucidée, mais qui pourrait être un upset du microprocesseur DIODE, ou un conflit d'interruptions dans le logiciel de gestion bord. Cet événement a provoqué un arrêt subit de la fourniture de bulletins par DIODE, qui a été ensuite rétablie par l'envoi d'un bulletin initial.
- la réinitialisation brutale d'une balise (KITAB) en Janvier 2000 (émission de mesures réalisées avec un OUS non stabilisé). Cet événement a provoqué une

divergence du Navigateur, mais pas une interruption de service : le Navigateur a continué à livrer des bulletins distants de plusieurs kilomètres de l'orbite réelle. Il a été nécessaire, pour rétablir le fonctionnement nominal, de renvoyer un bulletin initial.

Ce type d'incident avait été signalé avant le vol comme une cause possible de divergence du filtre. De nouvelles consignes aux opérateurs des balises, puis les améliorations des balises 3.0 et de DIODE lui-même (indice qualité amélioré, réglages plus serrés, réinitialisation autonome) devraient faire disparaître à terme ce genre d'incidents.

En dehors de ces deux événements, le Navigateur a fonctionné de manière continue sur de longues périodes (jusqu'à douze mois) sans problème. En deux ans, DIODE a eu seulement 60 heures d'indisponibilité environ, ce qui donne une disponibilité actuelle de DIODE de 99.6%. Les spécifications de précision n'ont été dépassées que pendant quelques heures, lors des réinitialisations (délai de passage sur une Balise-Maîtresse). La fiabilité est donc aussi très proche de 100% (99.7%).

<p><i>=> Après presque deux ans de fonctionnement, DIODE a une Durée Moyenne de Bon Fonctionnement d'environ 9 mois.</i></p>

DIODE/SPOT4 constituait une mission probatoire, destinée à donner un aperçu technologique sur les possibilités d'un Navigateur embarqué. Toutes les garanties d'une fiabilité absolue n'ont pas été prises en compte, et il n'est pas étonnant qu'une disponibilité de 100% n'ait pas été obtenue la première fois. Cependant, ces chiffres constituent une excellente base de travail, et les expériences suivantes devraient montrer des performances très améliorées.

3.1.3.- PRECISION EN ROUTINE

Pour des besoins de contrôle, les positions calculées par DIODE sont mémorisées à bord toutes les 160 secondes, et transmises environ deux fois par jour au Centre de Contrôle DORIS et au segment sol de suivi de DIODE (CATODE).

La précision de routine de DIODE a été évaluée par analyse des positions transmises du 3 Avril 1998 au 26 Mars 1999. Ces positions sont comparés à une orbite très précise, réalisée au sol par le programme ZOOM. Afin d'observer le comportement de routine, toutes les périodes où DIODE n'était pas en fonctionnement nominal (acquisition de poste SPOT4, manœuvres orbitales, périodes de test du Récepteur, ...) ont été écartées de la comparaison.

Les écarts entre les estimations de DIODE et la Référence sont ici visualisés dans le Repère Orbital Local, en mètres :

One year of DIODE/SPOT4 - REFERENCE ZOOM

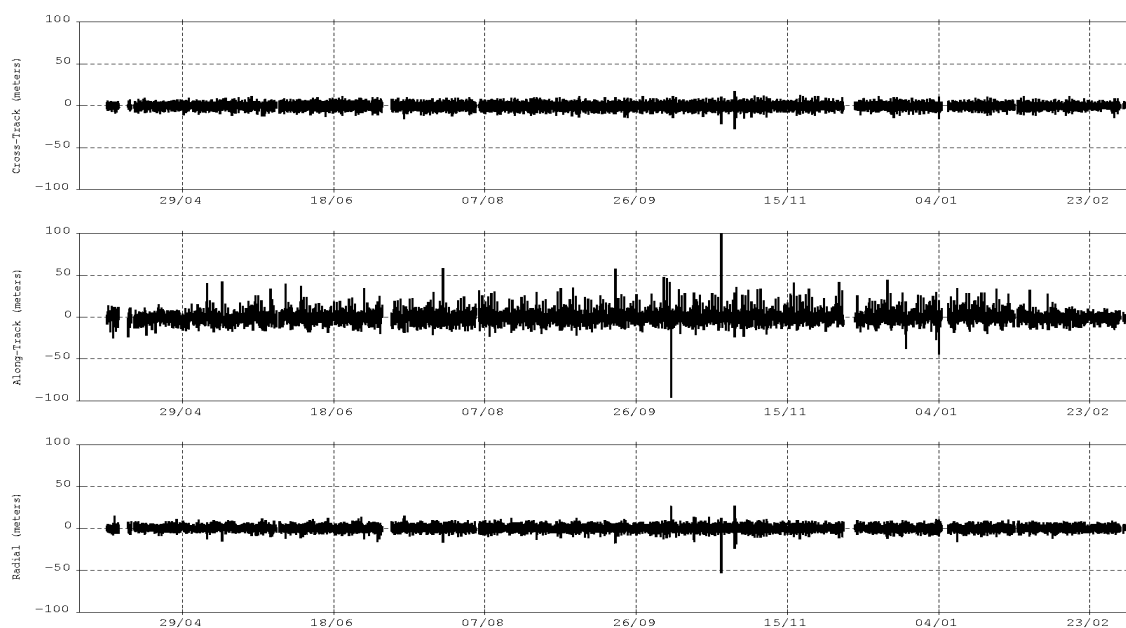


Fig.1 : un an de DIODE / SPOT4

Les plus grands écarts concernent la composante tangentielle, avec des pics entre 100 et 165 mètres. Ils interviennent lors de longues périodes sans mesure (entre 45 minutes et une heure), quand le satellite est hors de visibilité des stations DORIS. Dans ce cas, le filtre de Kalman ne fait que propager le vecteur d'état et l'erreur croît, en particulier dans la direction de la vitesse.

Les absences de points sont généralement dues à des pertes de données sol, à l'exception du premier "trou" au début de Juillet 1998, qui est dû au premier incident mentionné en 3.1.2. Dans la dernière partie du tracé, les estimations deviennent plus précises : deux ou trois stations DORIS supplémentaires ont amené une réduction spectaculaire des phases d'extrapolation.

Les statistiques de la comparaison sont les suivantes :

	Minimum (m)	Maximum (m)	Moyenne (m)	RMS (m)
Radial	-55.95	30.16	-0.12	2.73
Tangentiel	-110.93	165.21	0.07	4.45
Normal	-27.31	17.27	-0.15	3.04

L'erreur tridimensionnelle est proche de 6 mètres.

=> Une précision de quelques mètres est déjà obtenue à bord de SPOT4.

3.1.4.- SUIVI DES MANOEUVRES

Le comportement de DIODE en période de manœuvre orbitale a aussi été soigneusement examiné. La plus importante manœuvre qu'il ait suivie est intervenue le 31 Mars 1998. C'était une élévation du demi-grand axe, réalisée en deux poussées séparées par une demi-orbite. L'amplitude totale était de 8 kilomètres (environ 4 mètres par seconde). DIODE a été informé des prévisions de poussée, et les a correctement passées, avec des erreurs résiduelles d'environ 28 mètres sur le demi-grand axe et environ $2 \cdot 10^{-4}$ degrés sur la direction normale à la trajectoire.

Les écarts à l'orbite de Référence ZOOM sont représentés en mètres, dans le Repère Orbital Local (directions normale, tangentielle et radiale).

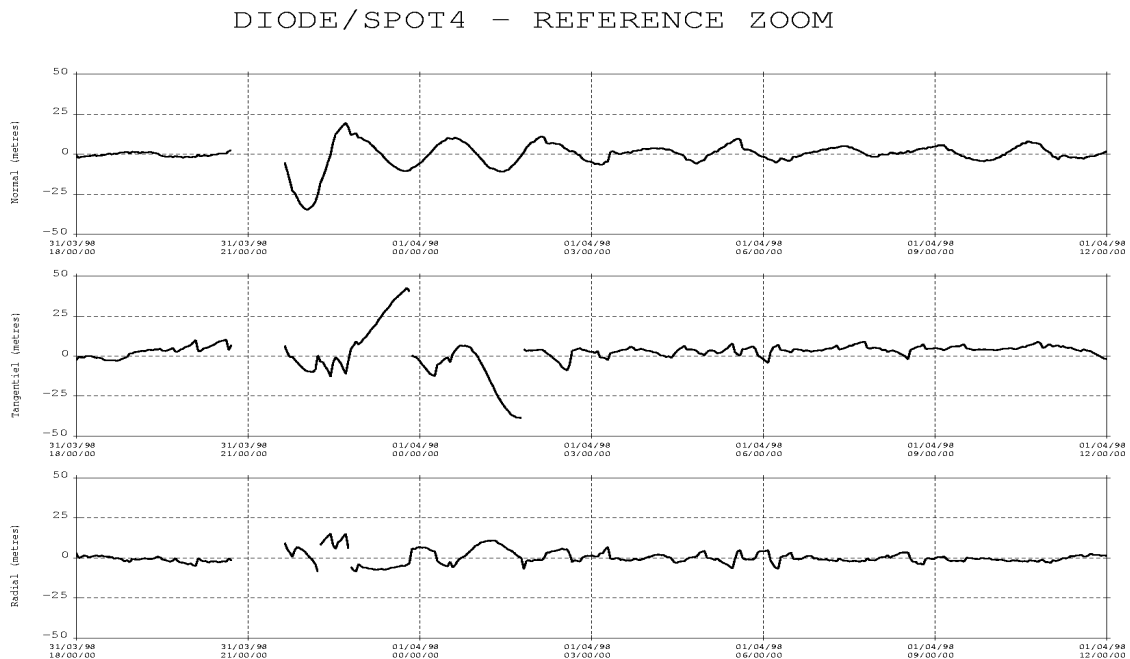


Fig.2 : le comportement de DIODE en période de manoeuvres

Sur ce graphique, le processus d'estimation est bien stable avant la manœuvre. Entre les deux poussées, aucune référence n'est disponible (mais DIODE a continué à fonctionner correctement). Après la manœuvre, les estimations oscillent pendant trois ou quatre orbites, tandis que le filtre absorbe petit-à-petit la partie non modélisée des accélérations.

=> Même en période de très grandes manoeuvres, le Navigateur est capable de calculer une estimation de la position avec une erreur maximale d'environ 50 mètres.

3.2.- UTILISATION AU SOL DE LA DETERMINATION D'ORBITE TEMPS REEL

Les positions et les vitesses en routine sont estimées à bord par DIODE et envoyées au sol via la télémesure du satellite. Ceci permet un prétraitement précis et immédiat des images SPOT4, par les différentes stations réparties de par le monde.

Depuis Mars 1998, bien que DIODE/SPOT4 soit une expérience probatoire, presque toutes les images SPOT4 ont été rectifiées en utilisant les positions calculées par DIODE.

Pour donner des ordres de grandeur, les images SPOT4 ont besoin d'une précision d'environ 100 mètres RMS sur la détermination de la position du satellite. DIODE a fourni à SPOT4, depuis bientôt deux ans, des estimations de quelques mètres de précision.

Avant DIODE, le positionnement des images était réalisé, au sol, à partir d'éphémérides extrapolées à l'avance (donc nécessairement moins précises), et chargées à bord du satellite par le Centre de Contrôle. L'utilisation de DIODE allège donc les transmissions d'informations du sol vers le bord, tout en rendant l'opération :

- plus rapide, puisque l'information est disponible en temps réel,
- plus efficace (l'information est fraîche et plus précise qu'avant),
- presque automatique, donc beaucoup plus sûre à opérer.

VEGETATION utilise également les produits de DIODE pour rectifier ses images, depuis Juin 1999.

=> Le segment sol peut utiliser à son profit les résultats de DORIS/DIODE.

3.3.- UTILISATION A BORD DE L'ORBITE TEMPS REEL

Les bulletins de position/vitesse du satellite sont aussi envoyés, via le Logiciel de Vol Central de la plateforme, aux utilisateurs embarqués : POAM3 (un passager de SPOT opéré par le Naval Research Laboratory, qui mesure la densité d'ozone et de vapeur d'eau en fonction de l'altitude) utilise depuis Mars 1998 les estimations de DIODE pour pointer son terminal optique.

=> La plateforme et les passagers peuvent utiliser à leur profit les résultats de DORIS/DIODE.

4.- FONCTIONS DEMONTREES AU SOL ET PRETES A VOLER SUR ENVISAT, JASON-1 ET SPOT5

Les prochaines versions voleront sur ENVISAT (2^{ème} génération), Jason 1 et SPOT5 (deuxième génération Miniature) : DIODE a été adopté et directement intégré sur le processeur des Récepteurs DORIS (de type MIL STD 31750A) de deuxième génération et de deuxième génération miniature.

Sur ces versions, nous prenons en compte :

- le potentiel de gravitation terrestre à l'ordre 40x40 (un effort important a été fait pour optimiser le calcul de l'accélération du potentiel 40x40, afin de limiter le temps calcul à bord),
- l'attraction luni-solaire avec un modèle simplifié d'éphémérides,
- la pression de radiation solaire, avec un modèle géométrique "en plaques",
- des accélérations empiriques de Hill, ajustables, pour absorber les erreurs résiduelles.

Version	Jason 1
Date de qualification	mi-99
Potentiel terrestre	40x40
Potentiel luni-solaire	oui
Pression de radiation solaire	oui (plaques)
Ajustement du pôle	oui
Force de Hill	oui
Ajustement de poussée	oui
Programmation du récepteur DORIS	oui
Auto-initialisation	oui
Indice de qualité	Amélioré, sur les positions et sur les dates

La taille du programme est de l'ordre de 7500 lignes de code, pour une occupation mémoire de 75 Koctets environ.

Toutes les mesures DORIS réalisées sur les différents satellites en orbite sont stockées à bord et transmises chaque jour au segment sol DORIS. Nous avons exploité ce grand réservoir de données (plusieurs années de mesures sur SPOT2, SPOT3, TOPEX et maintenant SPOT4) pour améliorer chaque version de DIODE.

4.1.- FONCTIONNEMENT PROPRE DU NAVIGATEUR

4.1.1.- AUTO-INITIALISATION

Sans information orbitale, le récepteur DORIS peut réaliser des mesures par simple écoute autour d'une fréquence moyenne.

En tant que premier consommateur des mesures DORIS, DIODE est alors capable d'estimer tout seul la position du satellite, sans recevoir l'aide d'un Bulletin Initial envoyé par le sol (il est "perdu dans l'espace"). La seule difficulté est la forte non-linéarité des équations de la

gravitation, et elle est résolue par l'utilisation de deux filtres séparés qui ajustent les mesures de quatre passages. Ces deux filtres s'appuient sur deux modélisations différentes : l'une grossière, mais de convergence rapide, la seconde plus précise. L'orbite qui en résulte (généralement de quelques mètres de précision) est ensuite fournie au filtre de routine, pour la convergence finale. Pour l'instant, la méthode adoptée se limite aux orbites circulaires basses.

Cette fonctionnalité a été testée au sol intensivement sur les mesures issues de TOPEX. Typiquement, le temps pour délivrer une première estimation au filtre de routine est toujours inférieur à une orbite (1h40), et il est en moyenne de l'ordre d'une demi-orbite. En fait, ce temps est lié au temps mis pour acquérir quatre passages successifs.

=> *Le Centre de Contrôle n'a plus besoin d'envoyer de position initiale approximative pour enclencher le processus d'ajustement.*

De plus, DIODE a maintenant la possibilité de déclencher de lui-même une auto-initialisation, avant même que le sol ait pu réagir à une anomalie (voir parag. 4.4).

4.1.2.- PRECISION DE ROUTINE AMELIOREE

DIODE/Jason 1 est actuellement mis en œuvre au sol depuis plus d'un an, avec les mesures de TOPEX. Les statistiques et les écarts présentés ici ont été obtenus sur le cycle 232 (10 jours) de TOPEX :

Les écarts à l'orbite de Référence ZOOM sont représentés en mètres, dans le Repère Orbital Local (directions normale, tangentielle et radiale).

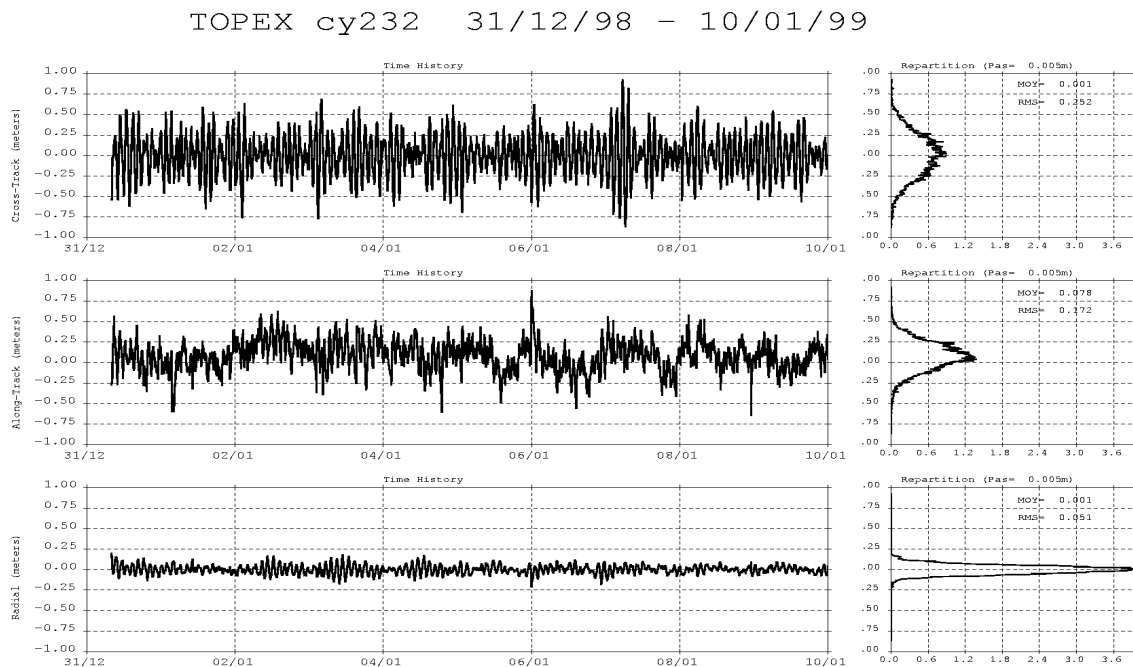


Fig.3 : précision obtenue au sol avec la version DIODE / Jason 1

L'erreur tridimensionnelle est de l'ordre de 30 centimètres RMS. On prêtera une attention particulière aux statistiques concernant la composante radiale : 5 centimètres d'erreur RMS environ, pour une valeur maximale de 20 centimètres.

	Minimum (m)	Maximum (m)	Moyenne(m)	RMS (m)
Radial	-0.214	0.206	0.001	0.051
Tangentiel	-0.650	0.881	0.078	0.172
Normal	-0.869	0.922	0.001	0.253

Il est important de noter que ces résultats ont été obtenus sur la station de travail (64 bits) qui a servi au développement de DIODE. Avec le processeur embarqué (de type 31750), une dégradation numérique des résultats mène à une précision RMS d'environ 13 centimètres sur la composante radiale! Nous essayons bien sûr de réduire ce phénomène.

Pour obtenir ce niveau de précision, il a fallu régler tous les paramètres du filtre de façon consistante. C'est un problème délicat, à cause du nombre de paramètres, et parce qu'ils sont fortement corrélés entre eux. Un compromis est parfois nécessaire entre la précision en mode convergé, et la robustesse aux mesures bruitées ou aux incidents balise. Si nécessaire, les réglages du filtre peuvent toujours être modifiés à bord par téléchargement.

Si l'on trace, pour chaque jour de suivi, trois caractéristiques statistiques de la comparaison quotidienne de l'orbite, on observe les erreurs moyennes suivantes :

DIODE - ZOOM / TOPEX (sparc 64-bits processor)

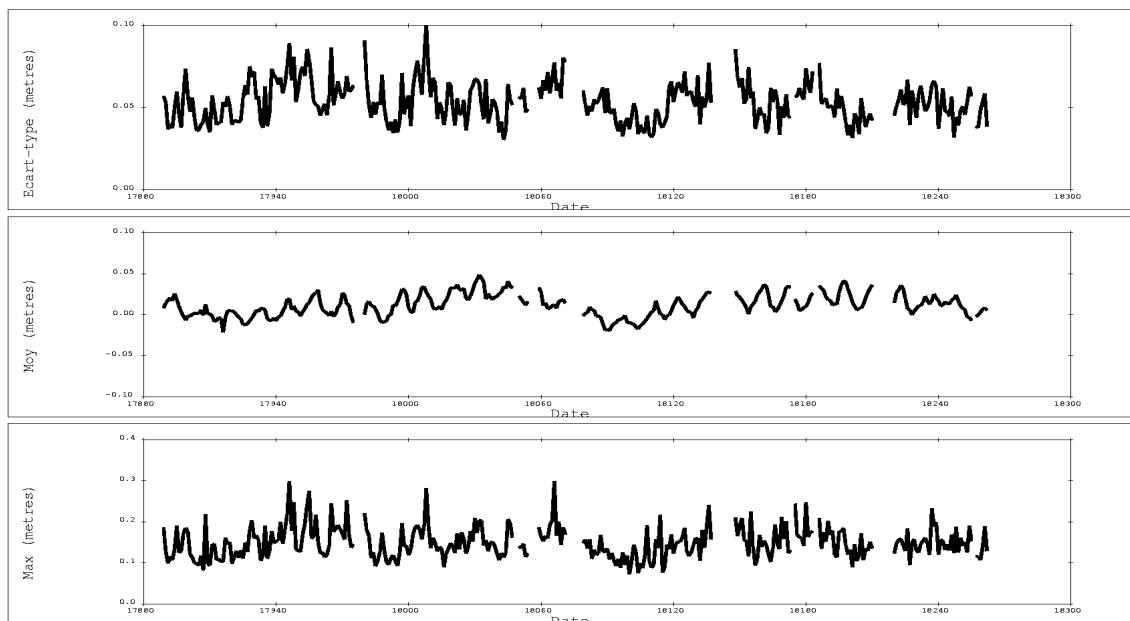


Fig.4 : précision moyenne obtenue au sol avec la version DIODE / Jason 1

La précision de la référence est de l'ordre de 2 à 3 centimètres RMS sur la composante radiale) : DIODE n'en est pas très loin!

=> La précision a été fortement améliorée, pour remplir les besoins d'applications de plus en plus fines.

L'utilisation au sol des résultats de DIODE sera étendue avec ENVISAT et Jason 1, par l'utilisation des positions précises pour un suivi "quick-look" des données altimétriques (circulation à mésoéchelle, détection rapide des phénomènes, ...).

=> *Vers une surveillance des océans en temps réel ?*

4.2.- DETERMINATION DU TEMPS

Pour réaliser ses déterminations de position, DIODE doit estimer la correspondance entre l'horloge embarquée (l'OUS) et une échelle de temps de référence sol (le TAI, ou le TUC). Dans les récepteurs de deuxième génération, cette fonctionnalité interne a été rendue visible à l'environnement bord. Une détermination du temps sera maintenant fournie à la plateforme, permettant une datation précise en TAI d'un événement bord : DORIS jouera le rôle d'horloge de référence à bord.

La précision moyenne de la détermination du temps est de l'ordre de quelques microsecondes, et un indice qualité permet la détection d'événements imprévus.

=> *Chaque passager, et le Logiciel de Vol Central de la plateforme peuvent maintenant recevoir de DORIS/DIODE une détermination du temps à quelques microsecondes près.*

4.3.- AUTO-PROGRAMMATION

En routine, DIODE s'appuie sur son estimation d'orbite pour informer le récepteur DORIS toutes les dix secondes, de la prochaine station visible et de son décalage Doppler. La précision est suffisante pour que ces prédictions puissent être utilisées par le récepteur lui-même, pour une auto-programmation de la prochaine station à recevoir. Un algorithme de choix a été ajouté, pour les cas où plusieurs stations sont en covisibilité.

Le récepteur DORIS peut ainsi réduire sa plage d'acquisition autour de la fréquence attendue. Cette fonctionnalité sera utilisée pour la première fois lors de la mission Jason 1.

=> *DORIS demande maintenant à DIODE ses prévisions de programmation.*

4.4.- INDICE DE QUALITE AMELIORE

Enfin, l'élaboration de l'indice qualité a été améliorée. En plus de la matrice de covariance du filtre, le calcul prend maintenant en compte le vecteur correction à chaque mesure, et l'indicateur de traitement des dernières mesures.

Cet indice qualité donne un ordre de grandeur empirique de l'erreur de position estimée, et devrait mener à une meilleure détection des erreurs orbitales, ou des incidents DORIS ou plateforme. Il permettra en particulier de détecter un début de divergence du filtre due soit à des erreurs de mesures (anomalie balise), soit à des erreurs de modèle (manœuvre inattendue). Ainsi, les utilisateurs auront une information plus fiable sur la qualité des estimations de position, et pourront en tenir compte dans leur traitement.

=> *DIODE offrira une meilleure détection des perturbations extérieures et donc des débuts de divergence.*

De plus, si le sol l'y a autorisé, DIODE devient capable de déclencher de manière autonome une auto-initialisation (si l'indice qualité dépasse un seuil fixé par le sol). Cette option sera également évaluée lors de la mission Jason 1.

=>DIODE aura la possibilité de déclencher une réinitialisation de manière autonome.

5.- FONCTIONS DEMONTREES AU SOL MAIS PAS ENCORE IMPLEMENTEES A BORD

5.1.- CALIBRATION DES MANOEUVRES

DIODE est capable de traverser les phases de manœuvre :

- sans aucune aide pour les petites manoeuvres (typiquement $\Delta V < 5$ cm/s),
- avec les prévisions d'accélération pour les poussées plus importantes (de 5 cm/s à plusieurs m/s) : le centre de contrôle du satellite doit alors charger les caractéristiques prévues de chaque poussée (date, durée et accélérations).

De plus, si l'on est en visibilité, les erreurs de poussée peuvent maintenant être ajustées pendant les manoeuvres. Ceci donne, si la couverture de la manoeuvre par des mesures est suffisante, une précision en position comparable à la précision de routine même en phase manoeuvrée, et contribue donc à rendre le filtre plus robuste aux poussées imprévues.

Ces éléments permettent d'envisager un diagnostic temps réel de la réalisation de manoeuvre, à bord. Un post-processeur pourrait être étudié pour réaliser une véritable calibration en vol, en visualisant le résultat en paramètres adaptés : efficacité de poussée, orbite post-manoevre, ... Cette fonctionnalité a été mise en œuvre au sol en 1998, et a montré des résultats dont la précision est intéressante.

La calibration de manoeuvre pourra certainement se montrer utile à bord, l'enjeu final étant le suivi temps réel des longues manoeuvres (pour des plate-formes équipées de propulsion électrique) et l'arrêt optimal de la poussée quand l'orbite visée est atteinte. Une telle fonctionnalité sera fort intéressante dans le cas de grandes constellations (mise à poste, remplacement d'un satellite par un satellite de secours, ...).

5.2.- CONTROLE D'ORBITE AUTONOME

Avec DIODE/SPOT4, la Détermination d'Orbite a donc montré qu'elle était embarquable. En ajoutant à bord :

- l'orbite de consigne,
- un algorithme de comparaison d'orbites,
- et un calcul de manoeuvres optimales,

il devient envisageable de réaliser un véritable Calcul d'Orbite Autonome (C.O.A.). Un tel concept est déjà à l'étude au CNES, et devrait être expérimenté à bord des satellites STENTOR et DEMETER (mais pas avec DORIS).

Le Contrôle d'Orbite Autonome réduira les risques d'erreur humaine (en particulier dans le cas des grandes constellations, où le contrôle sol n'est pas adapté à un grand nombre de satellites). L'autonomie du contrôle apparaît comme une évolution naturelle, que le contrôle d'attitude a déjà suivie dans les vingt dernières années.

Cette approche "bord" permettra également d'adopter de nouvelles stratégies, par exemple des poussées très fréquentes pour compenser le frottement atmosphérique, ou pour asservir le phasage du satellite avec la Terre à quelques mètres près... Ce type d'asservissement n'était pas envisageable tant que l'homme était dans la boucle de contrôle.

6.- CONCLUSION

Depuis 1991, DIODE est un projet vivant, s'améliorant sans cesse tandis que les spécifications bord se resserrent. Les résultats actuels (une précision de un mètre RMS en tridimensionnel, et quelques centimètres sur la composante radiale) étaient difficiles à prévoir il y a quelques années.

Il appartient maintenant aux responsables de plate-formes et de systèmes satellitaires d'exploiter cette nouvelle fonction au maximum, pour donner à DIODE l'occasion d'aller plus loin. Les missions françaises utiliseront DIODE dans les années à venir (SPOT5 notamment), ainsi que la mission franco-américaine Jason 1 et la mission Européenne ENVISAT. Pourquoi pas d'autres missions ?

Au CNES, les développements se poursuivent avec, en ligne de mire, une version de Récepteur monofréquence dédié à la Navigation Embarquée.

DOCUMENTS DE REFERENCE

- [1] Real-Time on-Board Orbit Computation with DORIS", D. Pradines, J.P. Berthias, C. Jayles, Saint Petersburg-Moscou, Mai 1994.
- [2] La Navigation Autonome, F. Alby, J.P. Berthias, C. Jayles, D. Pradines : Mécanique Spatiale T2 chapitre 23, Carrou et al, Cépaduès 1995
- [3] L'intérêt économique de la navigation autonome des satellites, EUROCONSULT, 30 Octobre 1992
- [4] Orbit and Time on-board computation : from the current SPOT4 solution to GNSS2 needs, Space Flight Dynamics Symposium, *Iguaçu Falls 1997*, T. Tournier, J.P. Berthias, C. Jayles, F. Mercier, D. Laurichesse (CNES), P. Cauquil (COFRAMI)
- [5] Navigateur Diode : six mois de fonctionnement à bord de SPOT4; *Note Technique CNES n°139, Octobre 1999*, C. Jayles (CNES)
- [6] Doris-Diode : one-year results of the first European Navigator; *I.A.F., Amsterdam 1999*, M. Costes, C. Jayles (CNES)