

NOTE TECHNIQUE

NAVIGATEUR DIODE : SIX MOIS DE FONCTIONNEMENT A BORD DE SPOT4

Christian JAYLES du Centre Spatial de Toulouse		
---	--	--

Note Technique de Mécanique Orbitale n° 1
décembre 1998

Titre (Title) :

Navigateur DIODE : six mois de fonctionnement à bord de SPOT4

Auteur (Author) :

Christian JAYLES du Centre Spatial de Toulouse – décembre 1998

Comité de relecture (Reviewers) :

- Sophie GEFFROY (CNES, DTS/MPI/MS/AM),
 - Jean-Paul BERTHIAS (CNES, DTS/MPI/MS/MO)
 - Richard BIANCALE (CNES, DSO/ED/GS/GTP),
 - Paul LEGENDRE (CNES, DTS/MPI/MS/MN),
-

© Copyright CNES 1999

Note Technique du CNES N° XXX

Titre (Title) : Navigateur DIODE : six mois de fonctionnement à bord de SPOT4

Auteur (Author) : Christian JAYLES du Centre Spatial de Toulouse – décembre 1998

*Mots Clés (Key words) : On-board Orbit Determination,
Autonomous Navigation,
DORIS*

Résumé :

Ce document décrit DIODE dans ses grandes lignes, en insistant sur l'apport de DIODE au système SPOT4, puis en présentant le système DIODE et en détaillant le logiciel de calcul d'orbite embarqué. On présente ensuite les résultats en orbite de DIODE / SPOT4 après six mois de vol, du point de vue de la robustesse et du point de vue de la précision des estimations de position. Enfin, les versions futures de DIODE sont présentées (ENVISAT, Jason, SPOT5, ...).

Abstract :

This document describes DIODE's main features, first with a look on the benefits for the SPOT4 satellite system, then with a presentation of the DIODE system, and a detailed description of the on-board orbit determination software. On-board results of DIODE are analysed, as well in terms of robustness, as in terms of accuracy of position estimations. Finally next versions of DIODE are presented (ENVISAT, Jason, SPOT5, ...).

© Copyright CNES 1999

SOMMAIRE

GLOSSAIRE	3
DOCUMENTS DE REFERENCE	4
1. INTRODUCTION	5
2. LE SYSTEME DORIS.....	6
3. DIODE DANS SES GRANDES LIGNES	8
3.1. L'APPORT AU SYSTEME SPOT4	8
3.2. PRÉSENTATION DU SYSTÈME DIODE	9
3.3. LE NAVIGATEUR.....	10
4. RESULTATS EN ORBITE	18
4.1. GENERALITES.....	18
4.2. REACTIONS AUX EVENEMENTS PARTICULIERS – ROBUSTESSE DE DIODE	19
4.3. PRECISION DE DIODE EN FONCTIONNEMENT DE ROUTINE	28
5. VERSIONS FUTURES	31
5.1. LES EVOLUTIONS DE DIODE.....	31
5.2. LES PERFORMANCES.....	32
6. CONCLUSION.....	34
ANNEXE 1 – HISTORIQUE DES EVENEMENTS	35
ANNEXE 2 – HISTORIQUE DES TELECHARGEMENTS ENVOYES AU LOGICIEL DE VOL	36

GLOSSAIRE

CAP	Centre d'Archivage et de Prétraitements SPOT4 : exploité par SPOT IMAGE, il assure la réception de la Télémessure Charge Utile (TMCU) et le traitement des images SPOT.
CATODE	Centre d'Analyse et de Traitement de l'Orbitographie DORIS Embarquée. CATODE est développé par le CNES (DTS/MPI/MS/MO), en langage Ada et en utilisant la méthode HOOD.
CTDP	Centre de Traitements DORIS – POSEIDON : exploité par CLS, il assure la réception de la télémessure et le suivi du fonctionnement des instruments DORIS.
CTIV	Centre de Traitement des Images Végétation.
DIODE	Détermination Immédiate d'Orbite par DORIS Embarqué : ensemble des logiciels d'orbitographie bord développé par le CNES (DTS/MPI/MS/MO) pour les récepteurs DORIS. DIODE est développé en langage Ada et en utilisant la méthode HOOD.
HOOD	Hierarchical Object Oriented Design : méthode de conception orientée objet, utilisée pour le développement des logiciels du projet. HOOD a été développée par Cisi (aujourd'hui CS-SI).
MVR	Mesureur de Vitesse Radiale : récepteur DORIS.
POAM	Instrument américain (Naval Research Laboratory) passager de SPOT4 effectuant des mesures sur les constituants de l'atmosphère aux hautes latitudes, et utilisateur des données DORIS/DIODE.
TAI	Temps Atomique International.
TCH	Téléchargement.
TRIODE	Logiciel de Traitement Rapide des Informations de l'Orbitographie DORIS Embarquée. TRIODE est développé par le CNES (DTS/MPI/MS/MO), en langage Ada et en utilisant la méthode HOOD.
TUC	Temps Universel Coordonné.
VEGETATION	Instrument passager de SPOT4 effectuant des prises de vue à grand champ et utilisateur des données DORIS/DIODE.

DOCUMENTS DE REFERENCE

- [1] D. Pradines, J.P. Berthias, C. Jayles : "Real-Time on-Board Orbit Computation with DORIS", 1994 Space Flight Dynamics Symposium, Saint Petersburg-Moscou, mai 1994.
- [2] F. Alby, J.P. Berthias, C. Jayles, D. Pradines : "La Navigation Autonome", Mécanique Spatiale Tome 2 Chapitre 23, J.P. Carrou et al, éditions Cépaduès 1995
- [3] EUROCONSULT : l'intérêt économique de la navigation autonome des satellites, 30 octobre 1992

1. INTRODUCTION

Le projet DIODE (Détermination Immédiate d'Orbite par DORIS Embarqué) avait pour mission d'implanter dans le récepteur DORIS destiné à SPOT4 une fonction supplémentaire de calcul d'orbite à bord permettant de positionner le satellite porteur en temps réel.

Cette fonction est active à bord de SPOT4 depuis le 26 mars 1998. Il s'agit du **premier outil de détermination d'orbite embarquée à produire des résultats durables en vol.**

Dans la suite du document, par extension, on désignera sous le nom de DIODE à la fois le projet, et le logiciel de calcul d'orbite embarqué.

Le but de ce document est de décrire DIODE dans ses grandes lignes, en insistant sur l'apport de DIODE au système SPOT4, puis en présentant le système DIODE et en détaillant le logiciel de calcul d'orbite embarqué. On y présente ensuite les résultats en orbite du Navigateur sur la période du 26/03/1998 au 05/10/1998, au terme de ses **six premiers mois de fonctionnement en orbite**. La performance est analysée du point de vue de la robustesse et du point de vue de la précision des estimations de position. Enfin, les versions futures de DIODE sont présentées (ENVISAT, Jason, SPOT5, ...).

2. LE SYSTEME DORIS

Le système DORIS a été développé conjointement par le CNES, l'Institut Géographique National (IGN), et le Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale (GRGS). Il comprend un réseau mondial d'une cinquantaine de balises construites par CEIS et SOREP, qui émettent en permanence et de façon omnidirectionnelle sur deux fréquences, 2036,25 et 401,25 MHz. Deux balises particulières, l'une à TOULOUSE, l'autre à KOUROU, sont asservies à des horloges atomiques rattachées au Temps Atomique International (TAI), et servent de référence de temps au système.

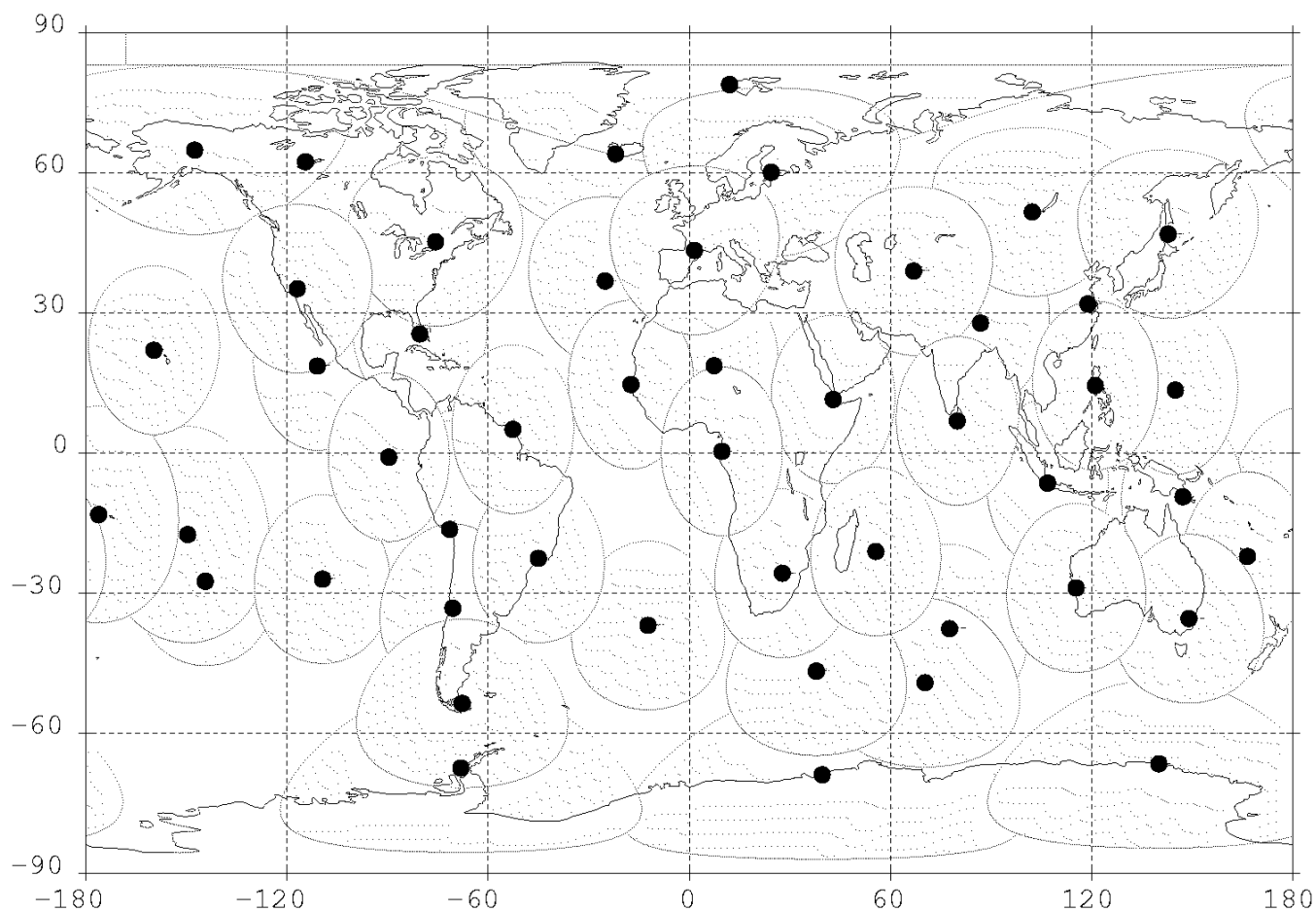


FIG 1.- Le réseau de balises d'orbitographie DORIS.

Visibilités à l'altitude de SPOT4.

L'instrument DORIS, à bord du satellite, contient un récepteur bifréquence pouvant se verrouiller de façon très précise sur les signaux montants des balises, piloté par un oscillateur ultra-stable. Toutes les dix secondes, le récepteur mesure avec précision la fréquence des signaux reçus sur chacune des voies (mesure Doppler), ainsi que le temps d'arrivée du signal de synchronisation transmis par les balises (mesure de synchronisation).

Avec le réseau de balises actuel, la couverture géographique est remarquable, et des mesures sont faites plus de 65 % du temps sur SPOT4, à 800 km d'altitude. A l'altitude plus élevée de TOPEX (1330 km), les cercles de visibilité sont plus étendus, et des mesures sont effectuées sur 80 % de l'orbite.

Le traitement de ces mesures au Service d'Orbitographie DORIS avec le logiciel d'orbitographie ZOOM en temps différé, permet d'élaborer une orbite de **quelques centimètres de précision sur TOPEX**, qui est utilisée par les océanographes pour exploiter les mesures altimétriques.

Les récepteurs DORIS de première génération volent sur SPOT2, SPOT4 et sur TOPEX, et ont déjà volé sur SPOT3. On dispose ainsi de 40 à 50 millions de mesures DORIS, qui ont constitué un solide réservoir de données de grande qualité pour la mise au point de DIODE.

3. DIODE DANS SES GRANDES LIGNES

DIODE est une partie de l'instrument DORIS embarqué sur SPOT4, qui calcule la position et la vitesse du satellite. Cette fonctionnalité localise le satellite qui l'embarque, en le positionnant par rapport au réseau de balises DORIS. C'est pourquoi DIODE est aussi appelé le « Navigateur ».

3.1. L'APPORT AU SYSTEME SPOT4

Les images prises par le satellite sont déformées quand elles arrivent au sol. Pour leur donner leur allure finale, il est nécessaire de faire des corrections qui dépendent de la position du satellite au moment où elles ont été prises.

D'habitude, pour les satellites d'observation de la Terre, les positions étaient prédites à l'avance par le centre de contrôle (en fonction de la trajectoire de la veille, en utilisant des programmes d'orbitographie), ou bien calculées a posteriori.

Le rôle de DIODE est de calculer cette position en temps réel, directement à bord du satellite. Il devient alors possible de « marquer » automatiquement les images, au moment où elles sont faites : les informations (image + orbite) sont disponibles ensemble, à leur arrivée en station de réception de la télémesure.

La qualité finale des images SPOT4 nécessite une position du satellite connue à 200 mètres près environ : DIODE, qui s'appuie sur les mesures très précises de DORIS, localise SPOT4 avec une précision de **quelques mètres**.

Avec DIODE, on dispose donc d'un système plus efficace qu'auparavant (l'information est fraîche et les données sont très précises), et automatique, donc de mise en œuvre simple. De plus, le satellite sait où il est en temps réel, ce qui permet aux autres instruments, à bord du satellite, de venir également exploiter cette information : POAM et VEGETATION, passagers de SPOT4, récupèrent aussi les produits du Navigateur pour leurs propres besoins.

Le projet DIODE constitue une démonstration en vol du **calcul d'orbite à bord d'un satellite** (voir [2] et [3]). Il est également destiné à approfondir les applications ultérieures de ce concept, qui sont prometteuses. Citons notamment le pointage fin d'antenne ou de terminal optique, et le contrôle d'orbite autonome à bord du satellite porteur.

On peut illustrer ceci par le scénario suivant :

L'orbite réelle du satellite est connue en permanence à bord grâce au traitement en temps réel des mesures d'orbitographie. Elle est périodiquement corrigée pour suivre l'orbite nominale (programmée à bord), le système de navigation autonome contrôlant la mise à feu optimale des moteurs. Simultanément, les instruments embarqués utilisent leur connaissance de la position et de la vitesse du satellite pour s'orienter ou prétraiter leurs observations. Au sol, un centre de contrôle déchargé des calculs de trajectoires et de manœuvres, vérifie grâce aux paramètres contenus dans la télémesure, que les opérations à bord s'effectuent correctement, l'intervention humaine étant limitée aux cas exceptionnels.

3.2. PRESENTATION DU SYSTEME DIODE

L'ensemble du système est organisé de la façon suivante :

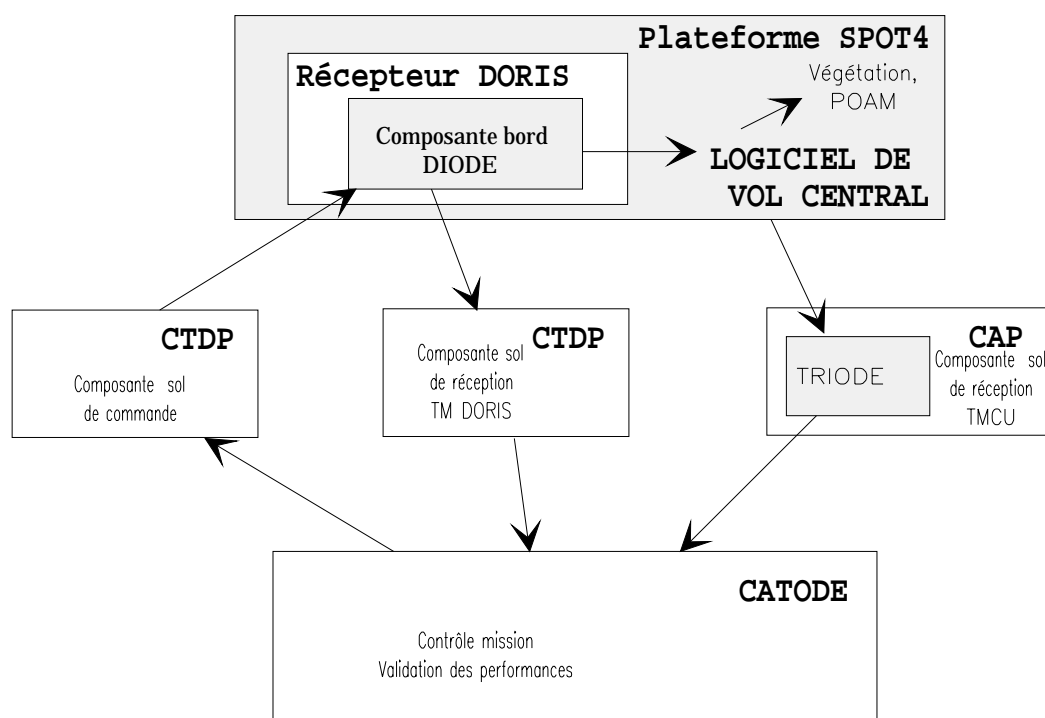


FIG 1.- Description générale du système DIODE.

La **composante sol de commande** est intégrée au Centre de Traitements DORIS-POSEIDON (CTDP) et réalise l'élaboration et l'envoi (via le centre de mise et maintien à poste SPOT4) des télécommandes (mise ON/OFF, ...) et des téléchargements (bulletin initial, données manœuvre, ...) destinés à la commande de la composante bord.

A chaque séquence DORIS, c'est à dire environ toutes les dix secondes, la **composante bord** élabore une estimation de la position de SPOT4 qui est transmise :

- à DORIS, pour être acheminée vers le sol dans la Télémétrie scientifique DORIS. Ces estimations sont reçues au sol par le CTDP (via les stations d'Aussaguel et de Kiruna), et transmises à l'entité chargée du contrôle de la mission (CATODE),
- au logiciel de vol du satellite, qui la met à disposition des instruments POAM et VEGETATION, et l'associe aux images dans la Télémétrie Image qui est reçue au sol par le Centre d'Archivage et de Prétraitements (CAP). Ces bulletins sont traités par la tâche sol TRIODE, pour produire une éphéméride SPOT4, qui est utilisée par le processus de traitement d'image.

Enfin, CATODE est chargé de la validation des performances du système ("recette" en vol), et du contrôle de la mission. Réalisé et mis en œuvre au CNES sur station de travail, ce sous-système effectue des comparaisons entre diverses orbites de SPOT4. CATODE élabore quand c'est nécessaire, les demandes d'envoi de téléchargements à destination de la composante sol de commande.

3.3. LE NAVIGATEUR

Dans cette première version de DIODE, la composante bord de DIODE est assurée par une carte supplémentaire, équipée d'un microprocesseur MAS 281 (norme MIL-STD-1750A) sur lequel fonctionnent :

- le logiciel de gestion,
- le logiciel DIODE réalisé par le CNES.

Dassault Electronique (aujourd'hui Thomson-Csf DETEXIS), fournisseur du récepteur DORIS destiné à SPOT4, a réalisé l'implantation de la carte « Navigateur » et a développé le logiciel de gestion activant DIODE.

Le logiciel de calcul d'orbite a été développé au CNES (DTS/MPI/MS/MO), avec un support technique des départements Traitements Bord, Méthodes et Procédures, Assurance Qualité Etudes et Méthodes, et de la société COFRAMI.

3.3.1. LA MISSION DU NAVIGATEUR

Le logiciel DIODE est chargé des traitements d'orbitographie. C'est un programme séquentiel, activé cycliquement à chaque séquence DORIS (toutes les dix secondes) par le logiciel de gestion. Sa fonction est de délivrer une estimation de la position du satellite en utilisant les mesures DORIS.

- La précision demandée pour cette estimation est :
 - 100 mètres RMS et 200 mètres MAX sur chacune des composantes (sauf pendant les quatre orbites qui suivent une forte manœuvre). Nous verrons plus loin que les performances réelles en vol sont bien meilleures.
- DIODE doit, sur le microprocesseur cible, tenir la cadence temps réel imposée par la réalisation des mesures DORIS (une mesure toutes les dix secondes).
- Enfin, ce logiciel doit, associé au logiciel de gestion, tenir dans la mémoire de la carte Navigateur (96 kilo-octets).

3.3.2. LES INTERFACES

DIODE échange des données avec :

- le logiciel de gestion du récepteur DORIS,
- le logiciel de la plateforme SPOT.

En confondant ces deux logiciels en une seule entité ENVIRONNEMENT BORD et en utilisant le formalisme HOOD, on peut représenter ceci par le schéma suivant :

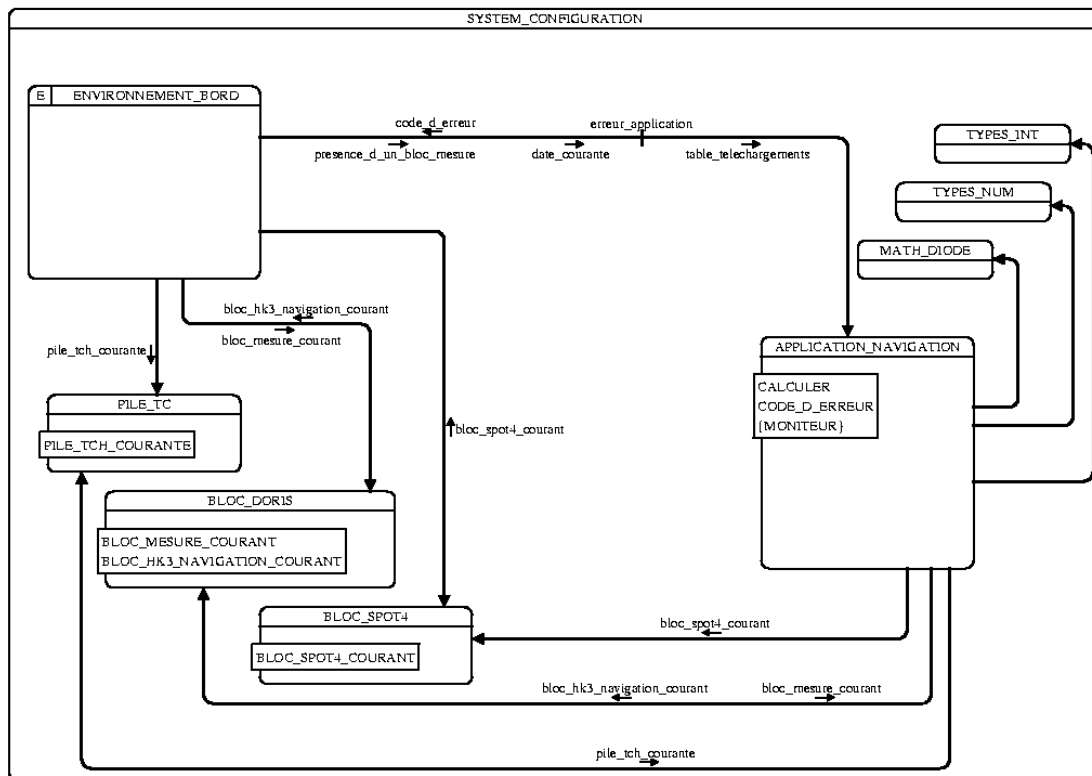


FIG 2.- Description des interfaces bord.

Différentes informations sont nécessaires en entrée de DIODE :

- Les mesures DORIS sont mises à disposition par le logiciel de gestion dans la zone BLOC_DORIS; celle-ci contient ainsi, en permanence, le dernier bloc mesure produit par le récepteur.
- Les téléchargements envoyés par le sol, sont fournis à DIODE via le logiciel de gestion du récepteur DORIS : Ce sont des modifications/mises à jour de valeurs, qui sont rares et peu significatives de charge opérationnelle (voir Annexe 2).
- Enfin, quelques données sont fournies directement en séquence d'appel :
 - la date courante (pour laquelle DIODE doit fournir un résultat),
 - l'indicateur de présence ou d'absence d'un bloc mesure,
 - le tableau de status, indiquant lesquels des téléchargements de la pile sont à prendre en compte pour la séquence courante.

Dans tous les cas, DIODE délivre en sortie :

- une estimation de la position du satellite (à la date courante spécifiée), qui est mise en forme, pour être ensuite livrée aux utilisateurs,

- un diagnostic d'erreur, qui est un paramètre global de DIODE et est positionné en cas d'incident interne (erreur lors de la prise en compte d'un téléchargement, au cours de la correction de l'état, ...).

Dans les 96 kilo-octets disponibles sur la carte Navigateur, trois zones mémoire d'échange ont été définies pour les blocs (de données ou de résultats) :

- la première, appelée **BLOCS_DORIS**, contient les blocs mesures produits par DORIS et les résultats de DIODE.
- la seconde, nommée **PILE_TC**, peut contenir vingt téléchargements de données provenant de la composante sol. Elle est en interface entre la gestion (qui la renseigne) et DIODE.
- la troisième, appelée **BLOC_SPOT4**, contient les bulletins destinés au à la composante sol de Spot4. Elle est en interface entre DIODE (qui la renseigne) et la gestion qui sera chargée de dialoguer avec le LVC SPOT4.

Ainsi, le principe retenu pour les échanges de données bord peut se schématiser de la façon suivante :

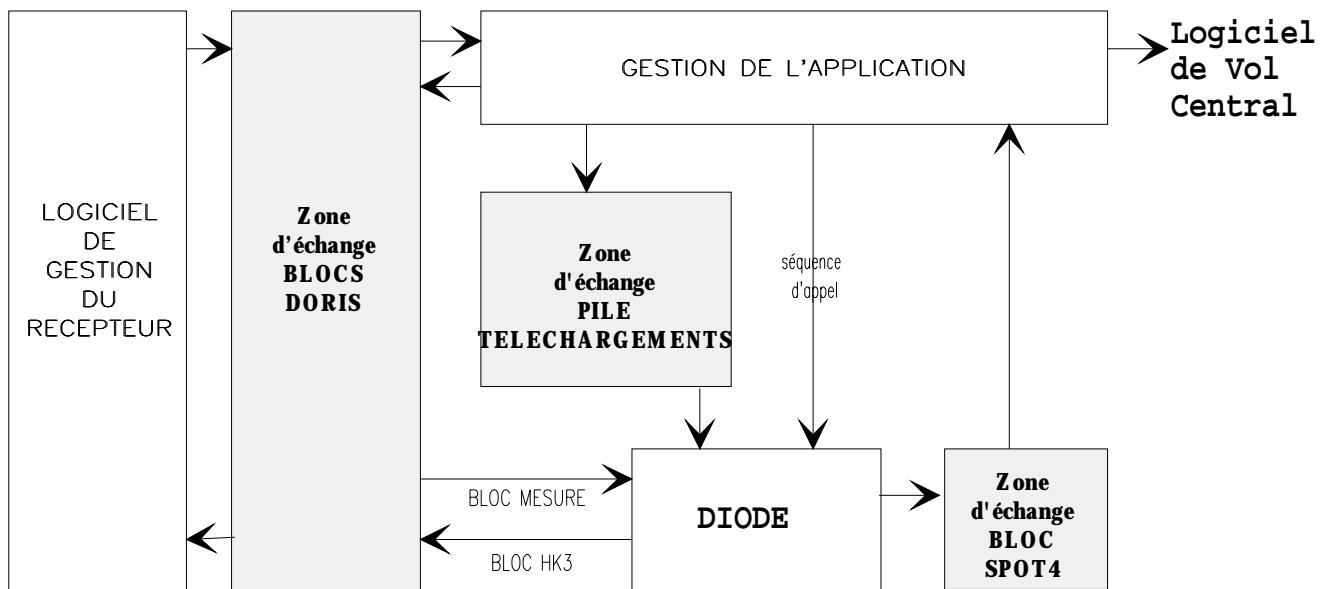


FIG 3.- Organisation des échanges de données à bord.

Les bulletins Navigateur SPOT4 produits par DIODE et livrés aux utilisateurs, contiennent les informations suivantes:

Date TUC	Jours Juliens, 10^{-4} secondes
X Y Z	trois composantes de la position, en repère terrestre, en mètres.
XP YP ZP	trois composantes du vecteur Vitesse Inertielle projeté en repère terrestre, en millimètres par seconde.
Indice de qualité	estimation (en mètres) de la précision du bulletin.

3.3.3. FONCTIONNEMENT

Pour que DIODE soit le plus autonome possible, trois modes de fonctionnement exclusifs ont été définis. Les passages d'un mode à l'autre sont automatiques en fonction des valeurs relatives de :

- la date de l'état interne de DIODE,
- la date pour laquelle on lui demande une estimation de position (date courante).

3.3.3.1. MODE NORMAL

C'est le mode de fonctionnement nominal où l'état interne est cohérent avec la date du dernier appel. C'est dans ce mode que les bulletins délivrés contiennent l'estimation de position du satellite porteur.

Dans ce mode, à chaque appel, DIODE calcule une estimation de position du satellite à la date qui lui est spécifiée (date courante), selon le principe suivant :

- La priorité est donnée à la prise en compte des téléchargements dont la date d'effet est antérieure à la date courante (dont le status est positionné).
- Ensuite, DIODE prédit la position du satellite à partir de celle qui avait été estimée lors du calcul précédent (dix secondes plus tôt).
- Si le MVR n'a pas effectué de mesure lors de la séquence précédente (non-visibilité balise), ou si la mesure qui a été effectuée est invalide, DIODE ne fait rien de plus et l'estimation de position est celle qui résulte de la prédiction.
- Si une mesure Doris est présente et valide pour la séquence précédant la date courante, DIODE utilise l'information de cette mesure pour corriger le résultat de la prédiction.
- Enfin DIODE met en forme et livre les estimations de position (et de données connexes) à SPOT4 et DORIS.

On peut représenter ce fonctionnement par le schéma suivant :

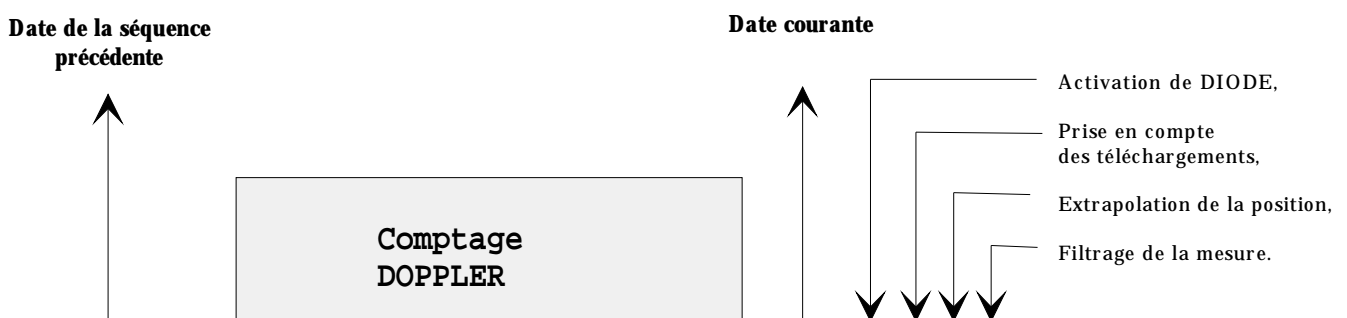


FIG 4.- Fonctionnement en mode normal.

3.3.3.2. MODE RATTRAPAGE

C'est le mode de fonctionnement où DIODE bascule lorsque la date de l'état interne est antérieure à la date courante. Ceci peut se produire lorsque DIODE est activé alors que le bulletin initial téléchargé est antérieur (de plus de dix secondes) à la date courante, ou si on choisit d'interrompre DIODE pour quelques instants (passage en mode veille pour raison opérationnelle, ...).

Dans ce mode, les mesures ne sont pas traitées et DIODE travaille en prédiction pure. Son état interne n'étant pas à la date courante, il n'est pas délivré. Les bulletins produits (DORIS et SPOT4) sont des bulletins par défaut (positions et vitesses nuls).

Le pas d'extrapolation est calculé automatiquement, sa valeur maximale (liée au temps d'exécution et à la précision des algorithmes utilisés) étant de une minute.

La reprise du mode NORMAL intervient automatiquement dès que la date de l'état interne de DIODE a rattrapé la date courante.

3.3.3.3. MODE ATTENTE

Ce mode peut intervenir dans deux cas :

1 - Au moment de la mise en route, aucun bulletin initial n'a été transmis, ou celui qui a été transmis n'a pas encore été pris en compte (date d'effet non encore échue).

2 - Après une remise à zéro du compteur de temps bord DORIS, jusqu'à la réception (par la gestion) d'un téléchargement précisant la date en Temps Atomique International (TAI) de la remise à zéro.

Dans ce mode, aucun calcul d'orbitographie ne peut être effectué (cette version de DIODE ne dispose pas d'une fonction d'auto-initialisation). DIODE délivre donc des bulletins par défaut (positions et vitesses nuls).

La reprise du mode NORMAL intervient dès que la date du bulletin est échue.

3.3.3.4. GESTION DES ERREURS

La gestion des erreurs de DIODE s'appuie fortement sur le mécanisme des exceptions Ada.

Toute erreur interne est récupérée pour donner lieu au lever de l'exception ERREUR_DIODE. Dans ce cas, les utilisateurs ne doivent pas se servir de l'estimation de position qui peut avoir été polluée. La valeur du CODE_D_ERREUR donne une indication sur la nature de l'erreur.

Certaines erreurs bénignes (par exemple un problème lors de la livraison du bulletin aux utilisateurs) sont sans conséquence grave pour la suite des traitements; elles sont acquittées dès la séquence suivante. En revanche, les erreurs graves (par exemple une erreur au cours de l'extrapolation de l'état) empêchent la poursuite du traitement. Tant qu'elles ne sont pas acquittées (par téléchargement d'un nouveau bulletin initial), DIODE relève l'exception ERREUR_DIODE à chaque appel.

3.3.3.5. CAS DEGRADES

L'ensemble de ces points est soigneusement vérifié lors des phases de validation de chaque version de DIODE. Pour ne pas alourdir inutilement cet exposé, on ne présente ici que quelques exemples caractéristiques de fonctionnement dégradé.

Période sans visibilité balise

Durant de telles périodes, l'état interne de DIODE n'est plus continuellement comparé à la réalité de l'orbite (puisque'il n'y a pas de mesure), et résulte seulement d'extrapolations successives. A cause des limitations du modèle dynamique, cet état va donc se dégrader au fil du temps. Selon la qualité de la dernière position estimée, la dégradation sera plus ou moins rapide. En règle générale, on observe que :

- Pour une durée inférieure à 12 heures sans visibilité balise, l'état interne ne s'écarte pas de la position réelle de plus de 200 mètres.
- Pour une durée comprise entre 12 heures et 48 heures environ sans visibilité balise, l'état interne peut s'écarter de la position réelle de plus de 200 mètres, mais il ne s'éloigné pas suffisamment pour diverger : lorsque des mesures arrivent, elles peuvent être traitées pour remettre à jour l'état interne.
- Enfin, pour une durée vraiment longue (plus de 48 heures sans visibilité balise), l'état interne de DIODE s'est trop éloigné de l'orbite réelle du satellite, pour que, lorsque des mesures arrivent, elles puissent être traitées. Les bulletins délivrés restent donc des prédictions pures (indicateurs de traitement des mesures nuls).

Présence d'une balise inconnue de DIODE

Si DIODE reçoit des mesures d'une balise dont il n'a pas le code, il ne les traite pas. Les bulletins délivrés lors des séquences correspondantes, sont des prédictions pures. C'est le cas, par exemple, quand une balise vient d'être installée : le code de cette nouvelle balise ne sera téléchargé à DIODE qu'après la phase de validation du bon fonctionnement de la balise.

Présence d'une balise dont les coordonnées sont erronées

Si l'erreur sur les coordonnées d'une balise est trop grande (supérieure à 10 km sur chaque coordonnée), DIODE ne doit pas traiter les mesures correspondantes. Ceci peut se produire, en opérations, en cas d'erreur dans un téléchargement de type BALISE, ou si une balise DORIS est réimplantée après réparation sur un site différent de son site initial sans que DIODE en ait été avisé.

Le résidu de mesure est alors très élevé, et la mesure est rejetée. Cependant, certaines mesures peuvent (par hasard) être prises en compte : cela ne doit pas perturber l'état de façon significative et le passage sur la balise suivante doit être parfaitement nominal.

3.3.4. ALGORITHMES UTILISES

DIODE est articulé autour d'un filtre de Kalman qui compare en permanence les mesures DORIS à un modèle de mouvement du satellite, et réactualise toutes les dix secondes la dernière estimation de la position du satellite.

Les équations du filtre de Kalman utilisent la formulation UD de Bierman, qui est robuste vis-à-vis des erreurs numériques. L'état interne est constitué principalement des six paramètres de position-vitesse du satellite.

La correspondance entre le temps bord DORIS et le Temps Atomique International, est également maintenue par un filtrage de Kalman sur les mesures de synchronisation DORIS. Cette fonction permet de dater les mesures Doppler avec une précision de quelques microsecondes RMS (homogène à la précision de l'estimation de position).

3.3.4.1. LE MODELE D'ORBITE

Il est utile à la propagation des estimations de position et de vitesse. Etant donné le caractère temps réel du fonctionnement et la précision recherchée, une intégration numérique a été préférée à un modèle analytique. DIODE intègre donc l'équation fondamentale de la dynamique $F=m\gamma$ en utilisant un intégrateur numérique de Runge-Kutta d'ordre 4 (formulation de Gill).

Le repère pseudo-inertiel d'intégration est du type du repère de VEIS (on confond le pôle instantané de rotation terrestre et le pôle géographique). Ce choix, homogène avec la précision de détermination de l'orbite, permet une grande simplicité dans le calcul des matrices de changement de repères (terrestre \leftrightarrow pseudo-inertiel).

Le modèle dynamique représente la somme des forces qui s'appliquent au centre de gravité du satellite. Pour cette première version de DIODE, la seule accélération représentée est l'attraction terrestre. Grâce à une optimisation soignée des algorithmes du point de vue de la place mémoire et du temps calcul, le modèle de potentiel a pu être poussé jusqu'au degré 15 de la représentation en harmoniques sphériques. C'est un modèle dédié élaboré par le département Géodésie Terrestre et Planétaire du CNES.

3.3.4.2. MODELISATION DE LA MESURE DOPPLER DORIS

Chaque mesure réalisée par le récepteur DORIS est munie d'indicateurs de validité : ceux-ci sont examinés par DIODE et mènent, si l'un d'eux est incorrect, au non-traitement de la mesure. Un contrôle est également fait par comparaison des puissances du niveau du signal reçues à bord avec des seuils paramétrables. Ces contrôles permettent d'éliminer la plupart des mesures erronées.

Les mesures aux deux fréquences sont ensuite combinées pour éliminer l'effet ionosphérique.

La mesure Doppler est interprétée comme une différence de distance entre les instants précis de début et de fin de comptage. La modélisation s'appuie sur un calcul de temps de propagation géométrique non-itératif. Une formulation simple de la correction troposphérique $\Delta d = l_0 / \sin(\text{site})$ est prise en compte (où l_0 est l'allongement troposphérique moyen à la verticale = 2,5 mètres).

Avant la correction finale de l'état, un dernier contrôle est fait : le résidu normalisé (l'innovation) est comparé à un seuil paramétrable. Si ce résidu est trop élevé, la mesure est déclarée invalide et la correction n'est pas effectuée. Ce procédé permet d'éliminer les mesures erronées qui ne sont pas signalées par des indicateurs d'invalidité (par exemple, des mesures sur une balise dont les coordonnées sont fausses).

3.3.5. LOGICIEL

Ecrit en langage Ada, le code est constitué de 2500 lignes de code environ pour un encombrement mémoire de l'ordre de 45 kilo-octets.

Afin de lui garantir la qualité et la maintenabilité nécessaires à un logiciel embarqué, DIODE a été conçu avec la méthode HOOD (Hierarchical Object Oriented Design). Le découpage Orienté Objet et la notion de hiérarchie dans l'architecture ont apporté un confort et une sécurité remarquables pour le développement et la maintenance des composants logiciels.

Pour favoriser sa portabilité sur différents processeurs, DIODE utilise ses propres algorithmes de fonctions mathématiques (sinus, cosinus, racine carrée). Les opérations vectorielles et matricielles sont codées dans des objets d'environnement et, grâce au mécanisme de surcharge des opérations de base, permettent une grande clarté dans le codage des algorithmes.

En s'appuyant sur le standard CNES de règles d'utilisation du langage Ada, des règles de qualité propres à DIODE ont été définies. Un audit des services de la qualité du CNES en 1996 a d'ailleurs confirmé la modularité et la clarté du code.

3.3.6. VALIDATION

La première validation de DIODE est intervenue au cours même de son développement, par une utilisation sol en temps quasi-réel lors de la mise à poste de TOPEX/Poséidon. Cette expérience a permis de montrer le bon fonctionnement global de DIODE et également de valider et de préciser les choix opérationnels faits.

Ensuite, une validation fonctionnelle a permis de vérifier l'ensemble de son comportement au sol, sur une série de jeux d'essais dérivés de mesures réelles SPOT2, SPOT3 et TOPEX/Poséidon. La première partie de cette validation s'est déroulée au CNES sur machine de développement. DIODE a ensuite été validé sur un microprocesseur cible 1750 mis à disposition par le département Traitements Bord du CNES. De nombreux jeux d'essai ont permis de vérifier de façon complète le fonctionnement et l'embarquabilité de DIODE. Après l'intégration de DIODE à DORIS, une nouvelle phase de validation a été menée chez Dassault Electronique (DETEXIS), sur une maquette de l'instrument DORIS.

Parallèlement, le Navigateur a été mis en fonctionnement au sol de façon permanente, effectuant en temps peu différé le suivi quotidien de SPOT2, SPOT3 et TOPEX/Poséidon (voir [1]). Ce qui lui a garanti, avant même l'embarquement sur SPOT4, une expérience de plusieurs années de fonctionnement au sol.

Enfin, plusieurs séries d'essais système sur le satellite SPOT4 (au sol, lors de vérifications en salle blanche) ont permis de confirmer définitivement le bon fonctionnement du Navigateur.

4. RESULTATS EN ORBITE

La période analysée s'étend du 26 mars 1998, date de la mise en service de DIODE sur SPOT4, au 5 octobre 1998, soit 193 jours.

4.1. GENERALITES

Pendant toute cette période (hors manœuvres), le Centre de Traitements DORIS-POSEIDON (CTDP) a activé le logiciel ZOOM sur les mesures DORIS, produisant une orbite de référence de qualité décimétrique. C'est à cette référence que nous nous comparons ici. Quelques comparaisons à l'éphéméride précise rapide « MOE » calculée par le Service d'Orbitographie DORIS (qui, elle, est de qualité centimétrique), ont donné les mêmes résultats : ces deux orbites sont plus précises que celles de DIODE et constituent deux bonnes références pour estimer la précision du Navigateur.

On trouvera en Annexe 1 un historique des principaux événements concernant DIODE/SPOT4 pendant toute la période étudiée.

Toutes les dates données dans ce document sont en Temps Atomique International. Sur toute la période considérée ici, on peut calculer les dates en Temps Universel Coordonné (TUC) par la formule :

date TUC = date TAI - 31,0 secondes

Les bulletins élaborés par DIODE, prélevés par le récepteur DORIS, puis collectés par le CTDP et envoyés à CATODE, ont été constitués en une éphéméride continue pour cette étude. 108409 bulletins ont été traités ici, ce qui représente environ 7 % de la production de DIODE seulement (tous les bulletins ne sont pas récupérés au sol, à cause des limitations de volume de données transmises par télémesure).

4.2. REACTIONS AUX EVENEMENTS PARTICULIERS – ROBUSTESSE

Les écarts de cette « éphéméride bord » à l'orbite de référence sont représentés en mètres dans le repère orbital local (directions normale, tangentielle et radiale). Les échelles correspondent volontairement aux spécifications de valeurs maximales.

Ce tracé montre ce qui s'est vraiment produit, **toutes erreurs confondues**, lors des six premiers mois de vol de DIODE/SPOT4 :

DIODE/SPOT4 – REFERENCE ZOOM CTD

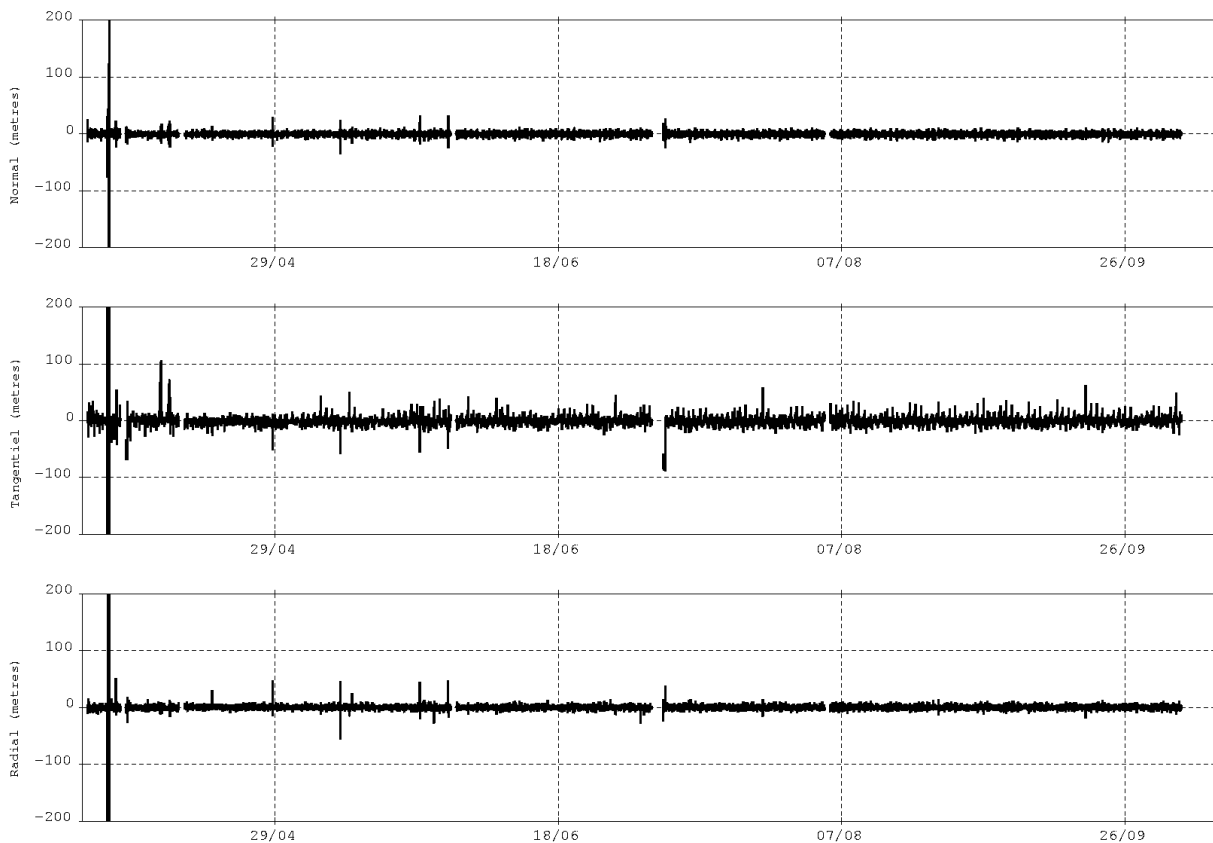


FIG 5.- Erreurs d'estimations de position calculées en orbite par DIODE/SPOT4.

4.2.1. COMMENTAIRES ORBITOGRAPHIQUES

On trouvera en Annexe 2 un historique des téléchargements envoyés au logiciel de vol DIODE pendant toute la période étudiée.

L'examen du tracé ci-dessus appelle les commentaires suivants :

- La mise en route de DIODE s'est déroulée comme prévu, de façon très satisfaisante, le 26/03/1998, en visibilité de Toulouse, avec un bulletin initial élaboré par le CTD.

- Les trois premiers jours montrent un fonctionnement de DIODE pratiquement nominal. En réalité, les performances sont légèrement dégradées par :
 - l'utilisation du mode ATTENTE du récepteur DORIS. Toujours utilisé après une mise en route (on ne dispose pas encore de prévisions de programmation), ce mode ne permet pas de fabriquer autant de mesures que le mode VITESSE, qui est le mode utilisé en routine.
 - le fait que le Navigateur ne connaît pas toutes les balises (en effet, le réseau DORIS a évolué depuis la livraison du logiciel de vol pour son intégration dans DORIS). Durant ces trois premiers jours, les balises manquantes sont téléchargées à DIODE (voir Annexe 2).
- Le 30/03/1998 est réalisée la deuxième manœuvre de mise à poste (le demi-grand-axe de SPOT4 est remonté de 13 km en deux poussées). A cause d'une anomalie sol dans l'interprétation des dates de poussée, les valeurs téléchargées à DIODE sont erronées et à 8 h 38 min, le Navigateur s'éloigne trop de l'orbite réelle pour pouvoir encore corriger son modèle par le traitement des mesures. Pendant cette période, l'erreur en position monte à 6,8 km et l'indice de qualité se montre insuffisamment réactif : il se cantonne à des valeurs de l'ordre de 50 mètres environ. Un premier bulletin initial est téléchargé à 15 h 15 min, mais il est trop approximatif (1,5 km) pour garantir de façon certaine que DIODE va reconverger. Un deuxième bulletin initial, plus précis, est finalement envoyé : il remet DIODE en fonctionnement nominal à 18 h 15 min. L'anomalie sol dans le calcul des dates de manœuvre est corrigée le jour même.
- Le 31/03/1998, DIODE effectue un suivi satisfaisant de la troisième manœuvre de mise à poste (accroissement de 8 km du demi-grand-axe), avec des réglages élargis pour s'adapter à l'utilisation du mode ATTENTE de DORIS. On analyse cette phase au paragraphe 4.2.5. Cette manœuvre marque la fin de la mise à poste de SPOT4.
- Le 01/04/1998, un ion lourd sur le microprocesseur DORIS cause une interruption du calcul de DIODE aux environs de 16 h 15 min (date du dernier bulletin reçu dans la télémessure SPOT, en visibilité d'une station du réseau). Cet incident est commenté au paragraphe 4.2.3.2.
- Au terme d'une procédure DORIS de ré-initialisation mineure, DORIS recommence à fabriquer des mesures le lendemain à 9 h 13 min, en mode ATTENTE. DIODE est réactivé à 15 h 34 min. Le récepteur est remis en mode VITESSE le 03/04/1998 à 23 h 59 min. Pendant quelques heures, on observe un décalage tangentiel dû à la valeur approximative de la correspondance des temps téléchargée au Navigateur avec le bulletin initial : 9 millisecondes d'écart entraînent environ 60 mètres de décalage le long de la trace. Après le premier passage sur une balise maîtresse, le filtre de synchronisation se recale sur les mesures de datation DORIS et le biais disparaît.
- Le 08/04/1998, DORIS est mis -volontairement- en mode Brouillage de 12 h 18 min à 22 h 10 min, ce qui entraîne l'arrêt (normal) de la réalisation des mesures. Le 09/04/1998, lors d'un mode DUMP DORIS, une perte des données de programmation entraîne une nouvelle absence des mesures, de 23 h 40 min au lendemain 9 h 41 min. Ces modes « technologiques » sont testés dans le cadre de la validation en vol de l'instrument DORIS. Pendant ces deux périodes, les positions calculées par DIODE sont des extrapolations pures. Elles s'écartent graduellement de l'orbite de référence, pour venir y reconverger rapidement dès le retour des mesures (voir parag. 4.2.4.). Dans les deux cas, l'instrument DORIS est ensuite mis en mode ATTENTE jusqu'à 23 h 59 min.

- Le 15/04/1998, les données prévues de la première manœuvre de maintien à poste de SPOT4 sont téléchargées à DIODE, qui suit parfaitement les deux poussées. On ne distingue pas d'écart à ce moment-là, pourtant ces points sont bien présents dans la comparaison : la manœuvre a été correctement prise en compte et les estimations de position ont une précision de quelques mètres.
- Le pic de 30 mètres du 17/04/1998 à 20 h 46 min, en fin de visibilité de la balise SPITZBERG, est dû à une anomalie DORIS connue (mode chaîné et correction de temps automatique) qui intervient de façon épisodique en ce début de vie de DORIS/SPOT4. Avec les réglages actuels du Navigateur, l'erreur de position engendrée est variable de 0 à 100 mètres suivant que la correction intervient en début, en milieu ou en fin de passage et suivant le temps mis ensuite pour retrouver une balise. Cette anomalie est d'ores et déjà corrigée dans les récepteurs DORIS suivants.
- Le 19/04/1998, un ou plusieurs flots de données ont été perdus (problème de transmissions sol), ce qui entraîne pour CATODE une absence de bulletins Navigateur, de 22 h jusqu'au lendemain 9 h 48 min. Pendant ce temps, le logiciel de vol, lui, a traité normalement les mesures (l'indice qualité bord est nominal lorsque les données reprennent).
- Le pic du 28/04/1998 à 12 h 31 min est dû à une autre occurrence de l'anomalie **DORIS** ci-dessus. Cette fois-ci, elle intervient en milieu de passage sur la balise de DAKAR et son effet est plus important (70 mètres).
- Le 01/05/1998 intervient une nouvelle perte au sol d'un ou plusieurs flots de données : les bulletins Navigateur sont perdus de 9 h 46 min à 13 h 30 min. Même anomalie le 02/05/1998 de 8 h 34 min à 10 h 42 min. Ces incidents sont sans conséquence grave sur le fonctionnement global du système, cependant ils nuisent à l'observation des résultats du logiciels de vol.
- Le 10/05/1998, une nouvelle anomalie du mode chaîné DORIS/SPOT4, à 11 h 59 min lors d'un passage sur la balise 18 (DAKAR), entraîne un écart de l'ordre de 50 mètres.
- Le 12/05/1998, une autre occurrence de cette anomalie à 13 h 15 min, lors d'un passage sur la balise 31 (CACHOEIRA) mène à un écart de 30 mètres environ.
- De nouvelles pertes au sol des bulletins interviennent de 22 h le 16/05/1998 à 5 h le 17/05/1998, puis le 18/05/1998 entre 14 h et 15 h. Pendant ces périodes, le logiciel de vol continue à fonctionner normalement.
- Le 24/05/1998, une nouvelle anomalie « mode chaîné » à 12 h 31 min lors d'un passage sur la balise 18 (DAKAR) entraîne un écart de 30 à 50 mètres.
- Le 27/05/1998, la deuxième manœuvre de maintien à poste de SPOT4 est suivie avec succès par le Navigateur. Cette fois-ci, pour expérimenter sa robustesse, les données a priori des deux poussées n'avaient pas été téléchargées à DIODE. On observe des écarts de 30 à 50 mètres et une re-convergence très rapide des estimations de position (l'incrément de vitesse total était de 0,029 m/s).
- Le 29/05/1998, intervient la dernière anomalie « mode chaîné » à 12 h 35 min : un écart de 60 mètres est observé. Le Groupe d'Opérations DORIS décide d'opter sur SPOT4 pour le mode non chaîné permanent afin de s'affranchir de cette source d'erreur pour DIODE.
- L'incident DIODE du 04/07/1998 est détaillé au paragraphe 4.2.3.3.

- Les commandes et téléchargements envoyés le 06/07/1998 ont remis le Navigateur en fonctionnement nominal à 12 h 04 min. Cependant, le premier passage sur la balise maîtresse de Toulouse qui permet un ajustement fin de la datation n'intervient que vers 22 h. Durant la période (12 h-22 h), les estimations de position sont environ de 50 à 100 mètres. Il est clair que le dysfonctionnement de Kourou sur cette période contribue à allonger le délai de retour à la normale. A partir du lendemain, tout rentre dans l'ordre et les performances redeviennent excellentes.

Il n'y a pas eu d'incident notable depuis le 07/07/1998. On ne distingue sur le tracé que quelques phases d'extrapolation qui sont analysées au paragraphe 4.3.1. et quelques pertes sol des flots de données.

4.2.2. INDICE DE QUALITE

A chaque bulletin, le logiciel de vol associe un indice qualité, destiné à indiquer aux utilisateurs la validité de l'estimation de position. Cet indice qualité est conçu comme une valeur en mètres, donnant une idée de l'ordre de grandeur de l'erreur commise par DIODE sur ce bulletin. Bien entendu, DIODE n'a pas connaissance de l'erreur qu'il commet (sinon, il lui suffirait de la soustraire ...). Cet indice qualité est donc une grandeur plus ou moins empirique qui doit s'avérer, après comparaison de DIODE à la référence, être corrélée le mieux possible avec l'erreur d'orbite.

On trace ici l'indice qualité calculé par DIODE à bord de SPOT4 en le comparant avec l'erreur d'orbite en 3D sur toute la période. Afin de juger de la validité de cet indice, on a volontairement laissé ici tous les cas d'erreur (même ceux dont la cause est externe à DIODE).

Indice Qualite DIODE/SPOT4

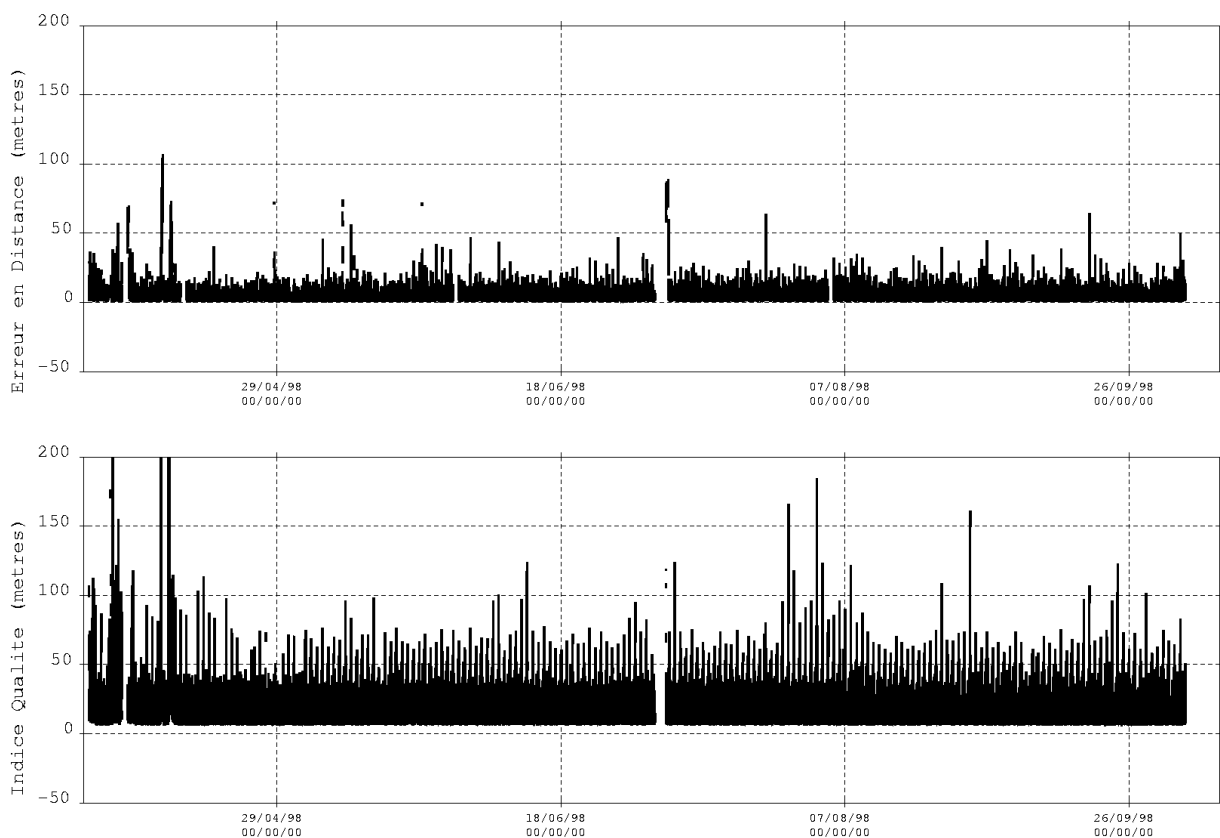


FIG 6.- Comparaison de l'indice qualité et de l'erreur 3D.

Pour cette version de DIODE, l'indice de qualité est calculé uniquement en fonction des covariances de position du filtre Doppler. Ce procédé permet de détecter les périodes sans mesures (modes brouillages et dumps déjà cités) et les longues phases d'extrapolation (pics « un jour » dus aux extrapolations périodiques). De la façon dont est réglé le filtre, la valeur de cet indice qualité est assez pessimiste en fonctionnement normal, que ce soit en période d'extrapolation ou en présence de mesures.

Par contre, pour cette de version de DIODE, l'indice qualité ne rend pas compte des erreurs de mesure : en particulier, les occurrences de l'anomalie « mode chaîné » des 17/04/1998, 28/04/1998, 10/05/1998, 12/05/1998, 24/05/1998 et 29/05/1998 ne sont pas représentées de façon satisfaisante. Une étude a été menée depuis, améliorant le mode de calcul de cet indice qualité : cette amélioration est intégrée dans la version DIODE qui volera sur Jason.

On notera cependant que le mode de calcul actuel suffit aux utilisateurs, avec un seuil convenable sur la note TRIODE, pour assurer un comportement sûr vis-à-vis des traitements d'image. POAM n'utilise pas l'indice de qualité.

4.2.3. INTERVENTIONS DU SOL

DIODE a été voulu le plus autonome possible. Néanmoins, quelques interventions du sol sont nécessaires pour assurer au Navigateur un fonctionnement correct. Au cours de ces six mois, le Centre de Contrôle est intervenu sur DIODE de deux façons différentes :

- pour lui envoyer des téléchargements,
- ou pour le ranimer à la suite d'une interruption du fonctionnement.

4.2.3.1. TELECHARGEMENTS

On pourra se reporter à l'Annexe 2, qui contient un historique des téléchargements envoyés à DIODE sur la période étudiée.

Il est à noter que DIODE a besoin de très peu de données externes en routine. Depuis la fin de sa mise en service sur SPOT4, entre le 8 avril 1998 et le 4 octobre 1998 (donc en six mois), seulement dix téléchargements lui ont été envoyés, pour prendre en compte les manœuvres, les évolutions du réseau de balises et l'incident du 4 juillet.

La commande de DIODE nécessite donc en routine moins de deux téléchargements par mois. Bien entendu, cette valeur est fonction de la fréquence des évolutions du réseau de balises DORIS, et des contraintes de maintien à poste de SPOT4 (fréquences des manœuvres), ainsi que de la précision demandée au Navigateur.

4.2.3.2. ION LOURD SUR LA CARTE DORIS

Comme on l'a déjà vu, DIODE a subi deux interruptions de fonctionnement au cours de ces six premiers mois. La première est intervenue le 01/04/1998. Le dernier bulletin reçu au sol avant l'incident est daté de 16 h 15 min. Après remise en route, le premier bulletin est daté du 02/04/1998 à 15 h 34 min. L'interruption aura donc duré un peu moins de 24 heures, auxquelles il faut ajouter quelques heures pour que la datation finisse de se stabiliser après le survol d'une balise maîtresse.

Sur SPOT4, les processeurs DORIS et DIODE sont distincts : DIODE aurait pu continuer à fonctionner en extrapolation, même si DORIS ne fonctionnait plus. Cependant, en deuxième génération et au-delà, DORIS et DIODE tourneront sur le même processeur. Cette possibilité d'amélioration, qui ne vaudrait que pour DORIS/SPOT4, n'a donc pas été étudiée davantage.

Les instruments DORIS de première génération sont munis d'un processeur 80C86 qui est sensible aux radiations. On observe sur ces instruments (SPOT2, TOPEX/Poséidon, puis SPOT3 et maintenant SPOT4) des événements de type « ion lourd » avec une fréquence moyenne de une à deux fois par an. Les instruments DORIS de deuxième génération et de génération miniature seront équipés d'un processeur GEC PLESSEY 31750 réputé moins sensible aux radiations (la fréquence annoncée est d'un incident tous les dix ans environ).

Une autre voie d'amélioration du service (par la réduction de la durée de l'interruption) est d'augmenter le nombre de balises de référence de temps, ce qui réduit le délai pour l'acquisition finale d'une correspondance temps bord-temps sol précise. Une étude est en cours à ce sujet.

4.2.3.3. INCIDENT DIODE

L'incident du 04/07/1998 ne concerne que DIODE (DORIS n'a pas été perturbé et le Navigateur sol a continué à fonctionner de façon satisfaisante). Soudain, à 13 h 01 min, DIODE ne délivre plus que des bulletins par défaut. Un indicateur dans la télémessure de surveillance exprime un « débordement du temps d'exécution de DIODE ». La partie orbitographique ne semble pas être en cause et il peut donc s'agir :

- soit d'un ion lourd sur la carte DIODE, ce qui paraît peu probable (le taux d'upset du processeur MAS 281 devrait être d'un tous les dix ans environ),
- soit d'un problème logiciel lié à l'aspect temps réel (interruption mal maîtrisée pendant l'exécution des calculs orbitographiques, ou anomalie dans l'exécutif temps réel utilisé).

Le dépouillement de la télémessure de surveillance n'a rien donné de plus. Il n'y a pas de bulletin navigateur pendant cette phase dans la Banque de Données SPOT4 (on n'était pas en visibilité d'une station de réception directe). Dans les bulletins issus du CTIV, il n'y a pas d'information supplémentaire. Une fiche d'anomalie est ouverte, dont l'analyse est toujours en cours (une des hypothèses est liée au fait que sur SPOT4, DIODE et DORIS fonctionnent sur deux cartes différentes). Pour le reste, seule la fréquence de ce type d'événement pourra donner un indice sur sa nature.

Les commandes et téléchargements envoyés le 06/07/1998 ont remis le Navigateur en fonctionnement nominal à 12 h 04 min. L'incident a donc entraîné une interruption de fonctionnement de 48 heures environ. Cependant, le premier passage sur la balise maîtresse de Toulouse qui permette un recalage fin de la datation, n'est intervenu que vers 22 h : durant la période (12 h-22 h), les estimations de position sont environ de 50 à 100 mètres. Un message a été envoyé aux utilisateurs des données de DIODE (POAM, VEGETATION, SPOT IMAGE) pour les aviser de l'incident.

4.2.4. PERIODES SANS MESURES

A deux reprises, les 08/04/1998 et 10/04/1998, l'instrument DORIS a été mis dans un mode où il ne fabriquait plus de mesure. Dans un tel cas, DIODE est privé de l'information sur l'orbite réelle donnée par les mesures : il élabore des estimations de la position du satellite qui sont le fruit d'extrapolations pures. Ces estimations se dégradent donc au fil du temps : elles s'éloignent progressivement de l'orbite réelle, calculée a posteriori et matérialisée par la référence.

Les deux trous de mesure ont duré environ dix heures. Voici le tracé des erreurs d'estimations de position de DIODE, le 10/04/1998 de 0 h à 18 h :

DIODE/SPOT4 - REFERENCE ZOOM

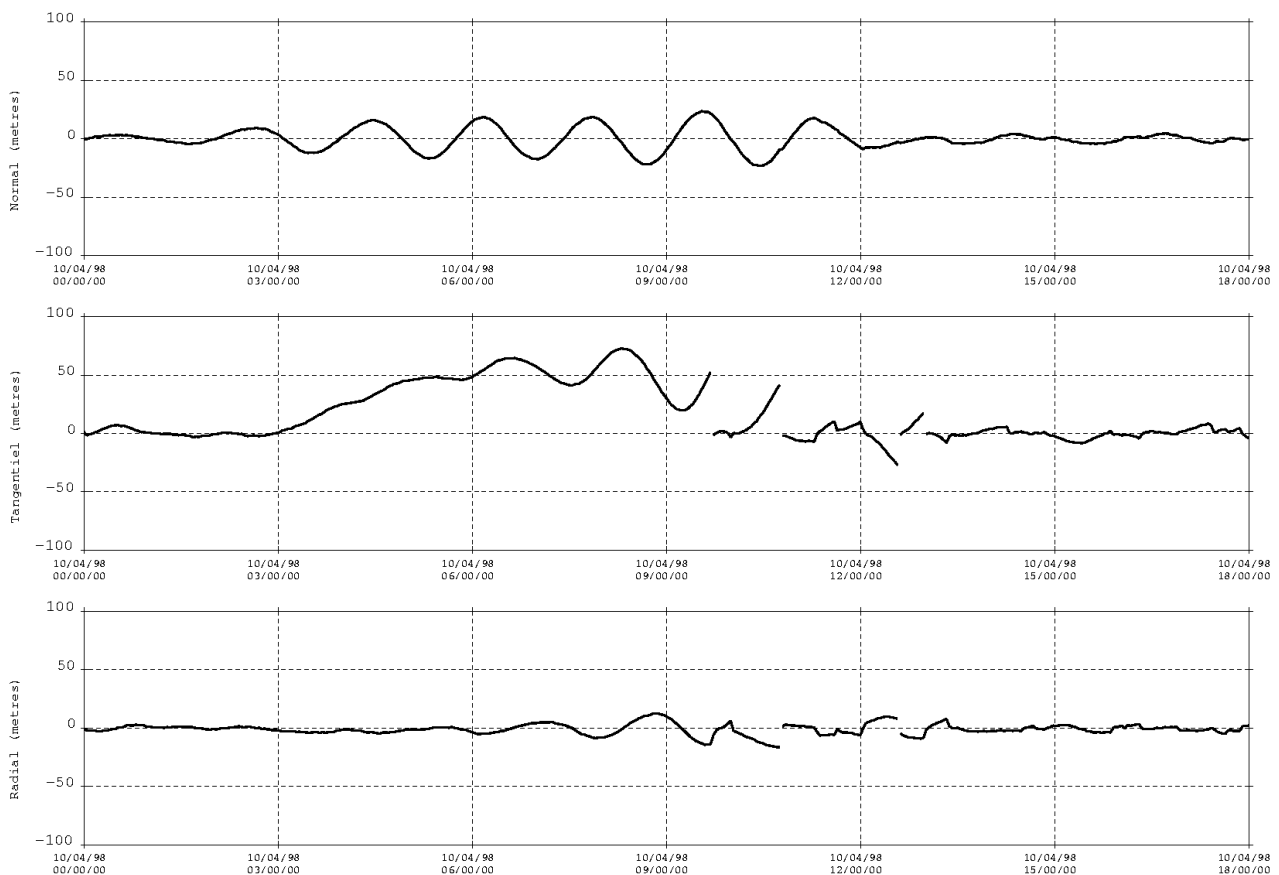


FIG 7.- DIODE en phase d'extrapolation prolongée.

L'absence de mesure intervient de 0 h à 9 h 41 min. L'estimation de position ne s'écarte que de 80 mètres environ (100 mètres le 08/04/1998). DIODE est donc bien capable de tenir une demi-journée sans mesure, sans sortir de ses spécifications.

Dès le retour des mesures, l'estimation de position reconverge très rapidement (directions radiale et tangentielle). Quelques phases d'extrapolation ensuite montrent que les paramètres internes du filtre se réajustent en quelques heures.

4.2.5. MANOEUVRES

Lors de la première manœuvre de mise à poste de SPOT4, DIODE n'était pas encore mis en route.

Comme on l'a vu lors de l'analyse des événements (paragraphe 4.2.1.), le suivi de la deuxième manœuvre, le 30/03/1998 n'a pas pu être réalisé à cause d'une anomalie sol. Le retraitement des données au sol a montré que sans cette erreur, le suivi aurait été correct.

On présente ici le suivi de la troisième manœuvre de mise à poste, le 31/03/1998, qui a pu se dérouler de façon nominale.

Les données prévues des deux poussées (dates, durées et accélérations dans les trois directions) ont été téléchargées au logiciel de vol, sans erreur cette fois-ci, quelques heures avant le début de la manœuvre.

Un réglage différent du filtre de Kalman (ouverture des seuils d'élimination de mesures) a permis de réaliser le suivi malgré le peu de mesures réalisées : pour des raisons de robustesse liées au calcul des programmations, le récepteur DORIS a en effet été placé en mode ATTENTE.

DIODE/SPOT4 - REFERENCE ZOOM

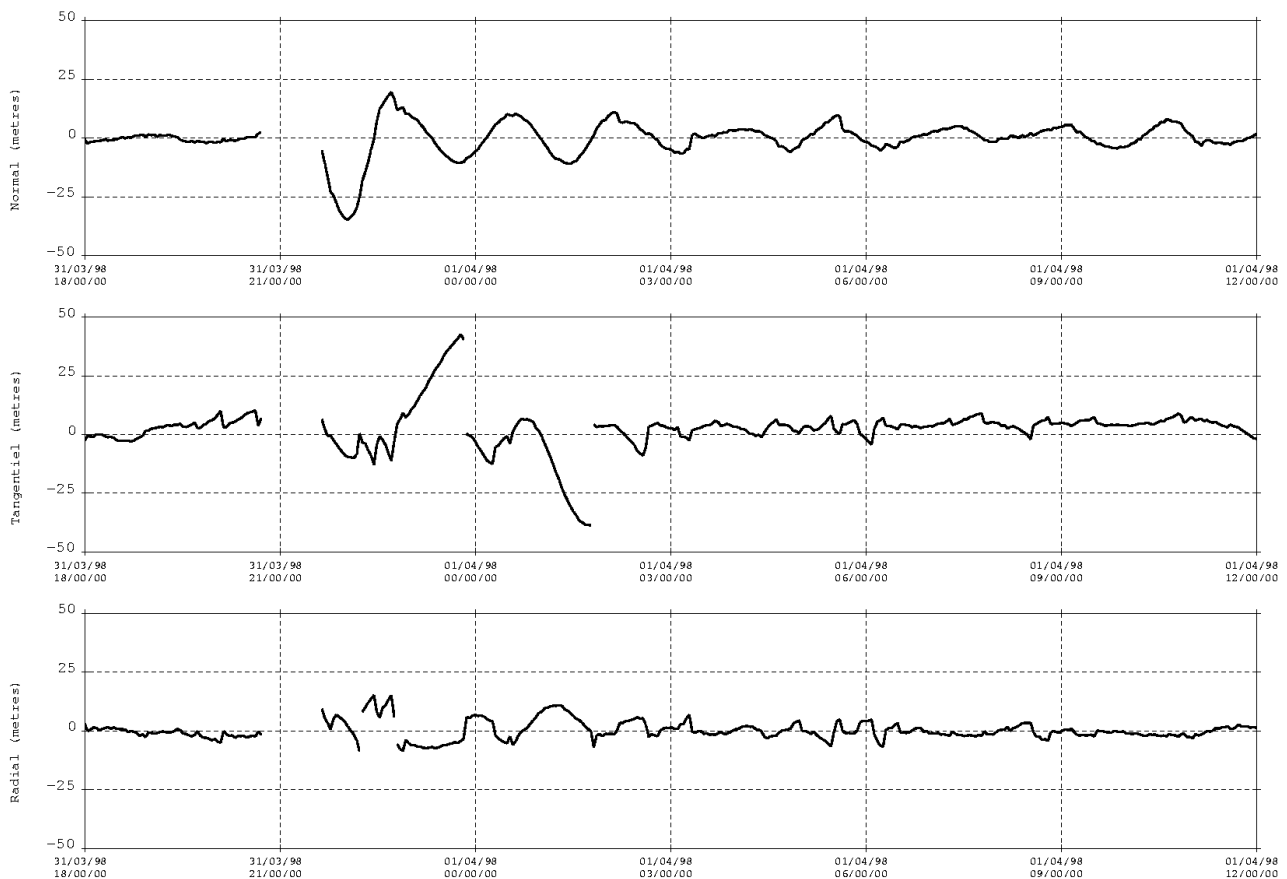


FIG 8.- Suivi par DIODE de la troisième manœuvre de mise à poste de SPOT4.

La manœuvre est réalisée autour de 21 h, en deux poussées tangentielles distantes d'une demi-orbite. Entre les deux poussées, ZOOM n'a pas ajusté d'arc d'orbite et on ne dispose pas d'une référence fiable. Ces points sont donc absents de la comparaison.

Il y a un fort contraste entre la stabilité de l'estimation de position avant la manœuvre et les oscillations du filtre après la deuxième poussée. Il est probable qu'entre les deux poussées, l'estimation de position subisse également des oscillations du même ordre de grandeur (50 mètres). Ceci est suffisamment précis pour envisager une utilisation de DIODE comme aide au diagnostic de réalisation de la manœuvre en temps réel.

Sur le reste de la période étudiée, sont intervenues trois manœuvres de maintien à poste de SPOT4. Ces manœuvres, beaucoup plus faibles que la précédente, ont toutes été correctement suivies par DIODE.

Pour la première et la troisième manœuvre de maintien à poste, les poussées prévues ont été téléchargées à DIODE et celui-ci les a passées sans dégradation notable des estimations de position.

La deuxième manœuvre de maintien à poste (le 27/05/1998) a été suivie en omettant **volontairement** de transmettre au logiciel de vol les valeurs prévues des poussées. DIODE a également bien suivi cette manœuvre, avec des écarts de 30 à 50 mètres seulement pendant moins d'une orbite. Cette expérience permet de confirmer un aspect important de la robustesse de DIODE.

4.3. PRECISION EN FONCTIONNEMENT DE ROUTINE

Pour évaluer la performance de DIODE, on élimine les effets dus à des causes extérieures à DIODE et on se limite à la période postérieure au 03/04/1998 (pour s'affranchir en particulier des perturbations du satellite dues aux grandes manœuvres de mise à poste).

On exclut donc de la comparaison les périodes affectées par :

- l'ion lourd du 01/04/1998,
- les passages du récepteur DORIS en mode ATTENTE,
- l'anomalie DORIS « mode chaîné »,
- les modes technologiques DORIS brouillages et dump,
- l'incident DIODE du 04/07/1998,

et on obtient cette fois-ci le tracé suivant, qui est significatif du fonctionnement de routine de cette version de DIODE (l'échelle d'écart est volontairement resserrée entre -50 mètres et +50 mètres) :

DIODE/SPOT4 - REFERENCE ZOOM CTD

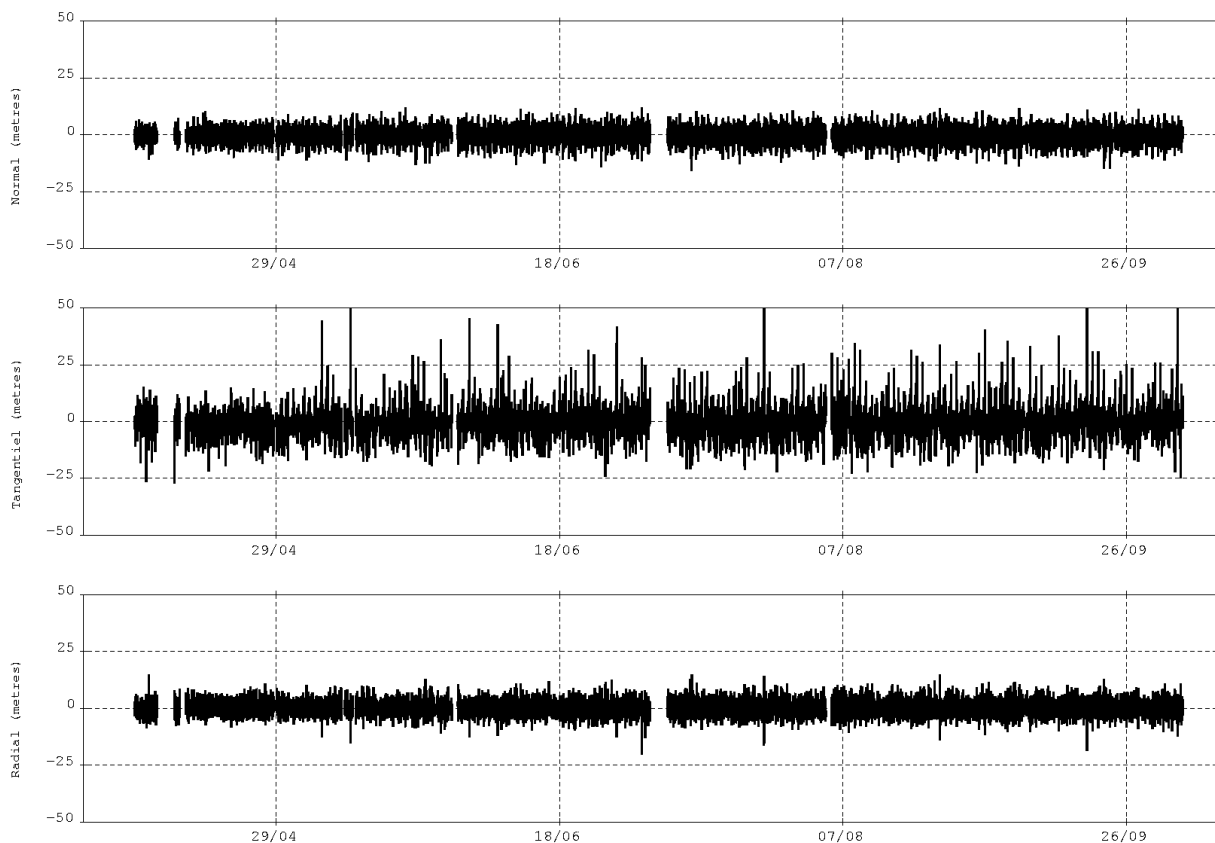


FIG 9.- Résultats de DIODE/SPOT4 en fonctionnement de routine.

4.3.1. COMMENTAIRES ORBITOGRAPHIQUES

Quelques points sont à détailler ici :

- Les pics qui se distinguent sur la composante tangentielle sont tous dus au même phénomène : les balises 42 (TERRE ADELIE) et 65 (RIO GRANDE) ne sont pas traitées par DIODE, car elles émettent avec un indicateur qui provoque le rejet systématique des mesures. De plus, YUZHNO a été retirée un moment du réseau bord pour cause de réinitialisations trop fréquentes. Enfin, la balise de SYOWA (Antarctique) est en panne depuis le 3/05/1998 (une tempête a arraché l'antenne). En conséquence, pratiquement tous les jours entre 1 h et 2 h, une période d'extrapolation de 40 minutes a lieu, à une heure et selon une géométrie qui fluctuent légèrement en fonction du jour du cycle orbital de SPOT4. Les jours où cette phase d'extrapolation est abordée après un passage à site bas sur la balise 26 (REYKJAVIK), les derniers paramètres estimés par DIODE sont entachés d'une erreur métrique dont l'effet s'amplifie lors de la longue période extrapolation. Ainsi, par exemple, des quatre pics à 50 mètres, les 12/05, 24/07, 19/09 et 05/10. De même, le 02/06/1998 vers 1 h, une longue extrapolation mène à une erreur de 45 mètres en tangentielle. Ces pics sont donc dus à la fois à l'état actuel du réseau DORIS et au traitement des mesures fait par DIODE : ils sont significatifs et ne doivent pas être retirés des comparaisons.
- Entre le 29/06/1998 et le 01/07/1998, un fonctionnement anormal de la balise maîtresse de Kourou a provoqué la réalisation de corrections de synchronisation inutiles, par les logiciels de vol de DORIS/SPOT2, SPOT4 et TOPEX/Poséidon. DIODE n'a pas été réellement gêné par cet incident, ce qui confirme que les corrections de temps y sont correctement gérées. Kourou a ensuite été désactivée du 01/07/1998 au 10/07/1998, puis a été remise en service réduit comme simple balise d'orbitographie.
- L'ensemble de la période est marqué par une croissance de l'activité solaire entraînant une importance accrue de la force de frottement atmosphérique. La comparaison de DIODE à l'orbite restituée montre des performances satisfaisantes, presque nominales en fait. Le seul impact est un léger accroissement de l'erreur le long de la trace lors des phases d'extrapolation, qui n'est visible que statistiquement. En période de restitution, le Navigateur n'est pratiquement pas affecté par l'important frottement atmosphérique.

4.3.2. STATISTIQUES DE PRECISION

En fonctionnement de routine, l'estimation de position DIODE présente donc par rapport à ZOOM les statistiques suivantes :

	92243	-28,58	15,57	-0,101	2,68
	92243	-28,27	62,16	0,056	4,26
	92243	-15,78	12,88	-0,156	3,07

Comme on l'a déjà vu, la composante tangentielle est marquée par l'accroissement du frottement atmosphérique au cours de la période étudiée.

Les écart-types sont fortement influencés par les pics (sur la composante tangentielle notamment). En réalité, les phases à plus de 20 mètres (en 3D) représentent **moins de 3 pour mille** du temps, c'est-à-dire quelques heures seulement sur six mois de fonctionnement.

Une estimation de la précision de cette version de DIODE avait été faite au sol avant le lancement de SPOT4, avec les mesures de DORIS/SPOT2 et SPOT3. On retrouve bien le même ordre de grandeur des erreurs.

4.3.3. STATISTIQUES DE DISPONIBILITE

Pendant la période de fonctionnement nominal, **DIODE n'est pas sorti de ses spécifications une seule fois**. Deux interruptions de service ont entraîné moins de 72 heures sans bulletin Navigateur : sur les 6 premiers mois d'opération, **DIODE a une disponibilité meilleure que 98,5 %** et ce, lors de son premier vol.

5. VERSIONS FUTURES

DIODE fait déjà partie intégrante des prochains récepteurs DORIS qui voleront sur ENVISAT, SPOT5 et Jason 1. Ces récepteurs DORIS ont été considérablement améliorés tant sur le plan matériel que logiciel : par exemple, le langage Ada et la méthode HOOD, déjà adoptés par DIODE pour la mission SPOT4, ont été étendus à l'ensemble du logiciel. L'expérience acquise sur le processeur 1750 MAS 281 a permis de réunir l'ensemble du logiciel et de le faire exécuter sur un processeur GEC PLESSEY 31750.

DIODE aussi a évolué : sa précision s'est accrue, de nouvelles fonctionnalités sont introduites et sa fiabilité a été améliorée.

5.1. LES EVOLUTIONS

Par rapport à la version SPOT4, de nouvelles fonctionnalités sont disponibles :

- Afin de s'affranchir du téléchargement d'un bulletin initial chaque fois qu'on redémarre le logiciel, une fonction d"**auto-initialisation**" a été ajoutée. Les prochaines versions de DIODE, dès ENVISAT et Jason, sont ainsi capables d'élaborer un bulletin initial suffisamment précis pour permettre au filtre de routine de converger, généralement en moins d'une heure. L'auto-initialisation est réalisée uniquement grâce aux mesures DORIS et permet de simplifier notablement la commande de l'instrument. Cette fonction utilise une modélisation spécifique de la mesure DORIS et un filtre moindres carrés opérant sur quatre passages de mesures Doppler.
- L'estimation de correspondance des temps est exportée vers le logiciel de gestion : DORIS peut donc **dater précisément en Temps Atomique International (TAI) des Tops bord** issus de la plateforme ou d'un passager et offrir un service comparable à une horloge bord. Cette estimation offre une précision de quelques microsecondes d'écart-type (homogène à la précision de l'estimation de position) et est assortie d'un indice de qualité.
- Enfin, dans son mode le plus fin de fonctionnement, afin d'assurer une couverture maximale de l'orbite, le récepteur DORIS doit être programmé pour connaître à l'avance la prochaine balise à recevoir et sa fréquence d'accrochage. Jusqu'ici, ces prévisions qui s'appuient sur la position du satellite, étaient calculées au sol quotidiennement et téléchargées vers le satellite. Afin d'alléger et de fiabiliser le fonctionnement opérationnel de DORIS, un calcul de prévision de visibilité et un algorithme de choix optimal des balises ont été ajoutés au sein de DIODE, qui permettront la **programmation autonome** de l'instrument DORIS.

De nombreuses améliorations algorithmiques ont également été faites dans le filtre de routine, parmi lesquelles, notamment :

- Le modèle de potentiel est poussé à l'ordre 40x40 (modèle JGM3), et un modèle d'attraction luni-solaire et de pression de radiation solaire directe ont été ajoutés.
- Le mouvement du pôle est ajusté à bord, avec une précision de l'ordre de 0,1 seconde d'arc.
- Le retard troposphérique est absorbé par un coefficient ajusté par passage.
- La position des centres de phase antenne a été prise en compte.
- Une modélisation de l'attitude du satellite porteur a été intégrée à DIODE.

Enfin, le mode de calcul de l'indice qualité a été soigneusement approfondi. Il effectuera dorénavant une notation beaucoup plus fiable des bulletins, qui permettra aux utilisateurs bord et à la mission principale d'utiliser les résultats de DIODE de façon sûre.

5.2. LES PERFORMANCES

DIODE deuxième génération (pour ENVISAT) a été validé, livré, puis mis en exploitation sur les mesures de TOPEX/Poséidon qu'il traite au sol depuis septembre 1996. La version suivante, DIODE « génération miniature », est en cours de validation pour un premier vol sur Jason 1.

La figure suivante présente les résultats de la version actuelle de DIODE miniature, lors du traitement de vingt jours de mesures réelles DORIS issues de TOPEX/Poséidon (octobre 1997). Les écarts à l'orbite de référence (calculée par le Service d'Orbitographie DORIS et de classe centimétrique cette fois-ci), sont visualisés en mètres dans le repère orbital local selon les directions normale, tangentielle et radiale.

DIODE miniature - ZOOM ELFE / TOPEX

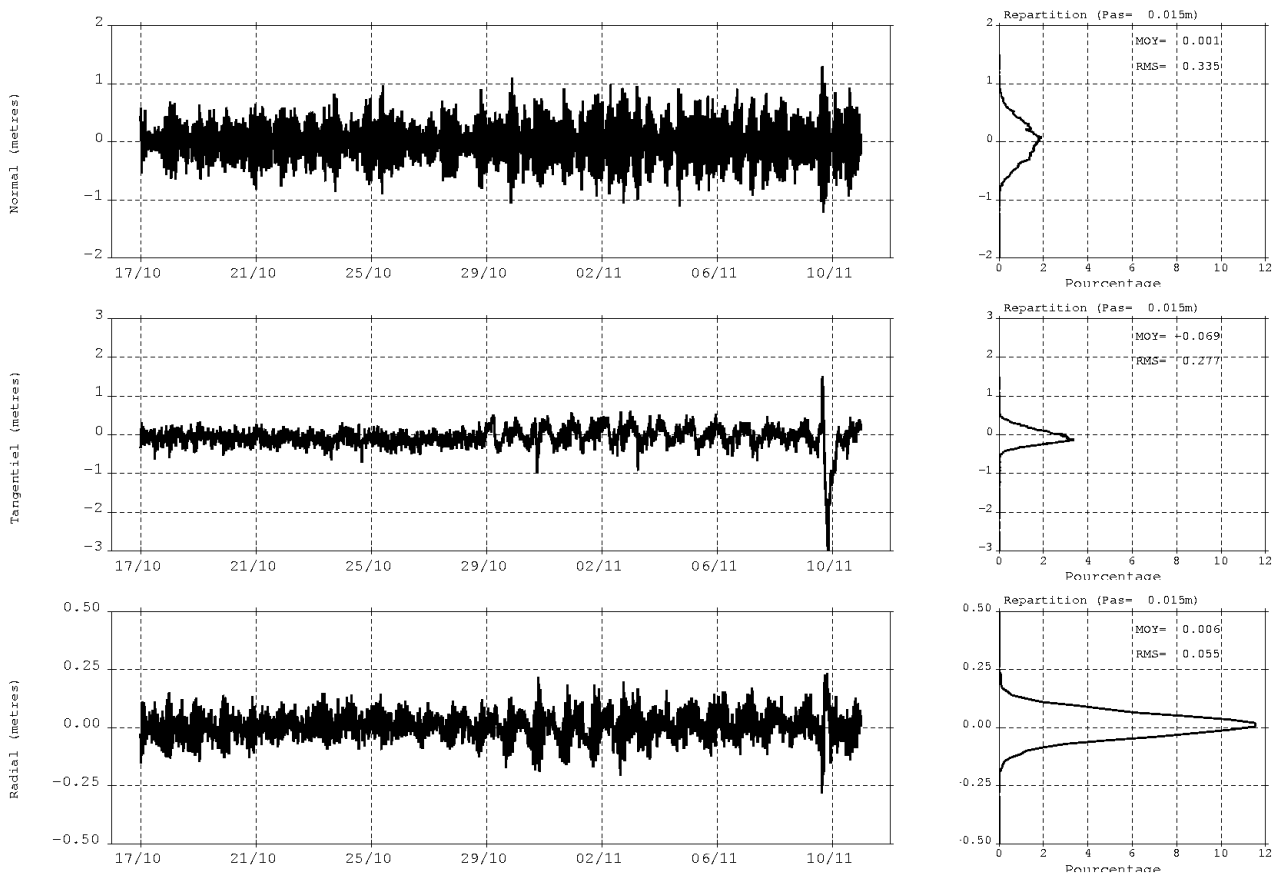


FIG 10.- Précision de la version DIODE miniature.

Dans la direction normale (qui est peu observable par les mesures Doppler), les écarts sont très marqués par la période orbitale et révèlent sans doute une imprécision résiduelle dans la détermination de l'orientation du pôle terrestre. Le 29/10/1997, pour une raison encore inconnue, l'allure des erreurs se modifie. L'analyse de ce phénomène est en cours : on ne sait pas encore s'il est dû à une erreur de DIODE, s'il est contenu dans la référence, ou si quelque chose a vraiment été modifié au niveau du satellite. Le 02/11/1997, l'attitude change et TOPEX passe en loi fixe : on observe un effet périodique -

qui n'est pas encore bien compris - sur la composante tangentielle. Enfin, le 9/11/1997, TOPEX se retourne (flip) et le Navigateur fait un écart de 3 mètres (ce qui représente exactement le double du bras de levier de l'antenne DORIS par rapport au centre de gravité de TOPEX).

On prêtera une attention particulière aux statistiques des erreurs sur la direction radiale (5,5 centimètres), qui ouvrent la porte à l'utilisation des données DIODE par certains traitements d'altimétrie.

6. CONCLUSION

Le projet DIODE a rempli son principal objectif : le Calcul d'Orbite Embarqué est désormais un point acquis et démontré en vol.

L'expérience DIODE/SPOT4 permet en outre de mettre en évidence quelques-uns des atouts du concept :

- allègement opérationnel,
- précision améliorée,
- simplification du système.

Certains apports du concept n'ont pas encore été mis en œuvre :

- utilisation bord des données pour le pointage de terminaux,
- contrôle d'orbite (totalement ou partiellement) autonome,
- réduction des coûts de maintien à poste,
- aide au suivi des manœuvres en temps réel.

Ces points pourront désormais être étudiés de manière plus intensive avec une certitude nouvelle : **la détermination d'orbite autonome est sortie de son stade probatoire, pour faire à l'avenir partie intégrante de la conception des systèmes satellitaires.**

Le calcul d'orbite embarqué est devenu aujourd'hui une possibilité offerte à tout utilisateur du système DORIS et il est clair que ce concept possède de nombreux atouts. Plusieurs agences spatiales (et même maintenant un industriel américain) développent d'ailleurs des systèmes équivalents.

Dans les années qui viennent, le contrôle des satellites devra s'automatiser (notamment avec l'avènement de grandes constellations) et il est probable que l'on verra émerger bientôt de véritables systèmes de **contrôle d'orbite autonome**. Le CNES a la capacité de participer activement à cette évolution.

ANNEXE 1 – HISTORIQUE DES EVENEMENTS

Les principaux événements DIODE depuis la mise à poste de SPOT4 jusqu'au 04/10/1998 sont les suivants :

- Le 24/03/1998, SPOT4 est lancé à 01 h 46 min. L'injection très précise d'Ariane 4 rend inutile une correction d'inclinaison.
- Le jour même, DORIS est mis ON, puis le logiciel de vol DIODE est téléchargé à bord.
- Le 25/03/1998, la première manœuvre de mise à poste (le demi-grand-axe est relevé de 1 km) est réalisée. L'incrément de vitesse total est de 0,59 m/s.
- Le 26/03/1998, DIODE est mis ON en visibilité de Toulouse à 21 h 25 min. Le fonctionnement est tout de suite satisfaisant.
- Le 27/03/1998, les positions calculées par DIODE et lissées par TRIODE sont utilisées pour la rectification de la première image SPOT4.
- Le 30/03/1998, la deuxième manœuvre de mise à poste (le demi-grand-axe est relevé de 13 km) est réalisée en deux poussées séparées d'une demi-orbite (pour assurer également un contrôle de l'excentricité). L'incrément de vitesse total est de 6,77 m/s.
- Le 31/03/1998 intervient la troisième manœuvre de mise à poste (le demi-grand-axe est relevé de 8 km). L'incrément de vitesse total est de 4,12 m/s. Cette manœuvre marque la fin de la mise à poste de SPOT4.
- Le 01/04/1998, un ion lourd interrompt le fonctionnement du microprocesseur DORIS : DIODE produit des bulletins par défaut de 16 h 15 min au lendemain à 15 h 34 min. Le récepteur est ensuite mis en mode ATTENTE jusqu'au 03/04/1998 à 23 h 59 min.
- Le 08/04/1998, DORIS est mis en mode BROUILLAGE de 12 h 18 min à 22 h 50 min, puis en mode ATTENTE jusqu'à 23 h 59 min.
- Le 09/04/1998 : mode DUMP et perte des programmations de 23 h 40 min au lendemain 9 h 41 min, puis retour en mode ATTENTE jusqu'à 23 h 59 min.
- Le 15/04/1998, la première manœuvre de maintien à poste est réalisée, également en deux poussées séparées d'une demi-orbite. Le demi-grand axe est abaissé de 30 mètres, l'incrément de vitesse total est de 0,018 m/s.
- Le 27/05/1998 se produit la deuxième manœuvre de maintien à poste de SPOT4. L'incrément de vitesse est de 0,029 m/s.
- Fin juin 1998, on procède à l'arrêt des vérifications de CATODE sur les traitements faits au CAP (fin de la période probatoire DIODE/TRIODE). A partir de cette date, les éphémérides produites par DIODE/TRIODE constituent **l'option nominale** pour le traitement des images SPOT4.
- Un incident intervient sur la carte DIODE le 04/07/1998 à 13 h 02 min. Le retour à la normale se produit le 06/07/1998 à 12 h 04 min.
- Le 01/09/1998 : troisième manœuvre de maintien à poste. L'incrément de vitesse est de 0,029 m/s.

ANNEXE 2 – HISTORIQUE DES TELECHARGEMENTS ENVOYES AU LOGICIEL DE VOL

On donne ici une synthèse de tous les téléchargements envoyés à DIODE depuis la mise à poste de SPOT4 jusqu'au 04/10/1998. Pour une meilleure compréhension des opérations, ils ont été regroupés par rubriques.

La plus grande partie de ces téléchargements est due à la phase de mise en fonctionnement de SPOT4 et de DORIS. A partir du 08/04/1998, les seuls téléchargements qui sont envoyés sont liés aux manœuvres, à quelques évolutions du réseau de balises DORIS, et à l'incident du 04/07/1998.

INITIALISATION NORMALE DE DIODE :

- Correspondance TAITUC de 31,0 secondes chargée à bord le 26/03/1998.
- Balise maîtresse TLHA ajoutée dans le réseau bord le 26/03/1998.
- Réglages du filtre de KALMAN chargés à bord, pour élargir la valeur de la covariance initiale de synchronisation, qui était erronée dans les paramètres par défaut chargés avec le logiciel de vol.
- RAZ et bulletin initial le 26/03/1998.

ACTUALISATION DU RESEAU BORD :

- Balises 66 (PAPEETE), 68 (RAPA), 70 (GOLDSTONE), 72 (SANTIAGO), (Nlle AMSTERDAM), 75 (Ste HELENE), 76 (HARTEBEESSHOEK), 77 (OTTAWA) ajoutées dans le réseau bord le 27/03/1998.
- Balise 59 (YUZHNO) et 1 (TLSA) retirées du réseau bord le 27/03/1998.

(TENTATIVE DE) SUIVI DE LA DEUXIEME MANŒUVRE DE MISE A POSTE DE SPOT4 :

- Le 30/03/1998, les caractéristiques a priori des deux poussées sont envoyées à bord en deux téléchargements. Ces valeurs sont erronées.
- Bulletin initial le 30/03/1998. Elaboré par le CTDP après la manœuvre non suivie, ce bulletin initial calculé d'après une orbite extrapolée trop imprécise est à 1,5 km de l'orbite réelle. Nous n'avons pas eu le temps d'analyser en temps réel si DIODE allait reconverger ou non.
- Nouveau bulletin initial le 30/03/1998.

SUIVI DE LA TROISIEME MANŒUVRE DE MISE A POSTE DE SPOT4 :

- Le 31/03/1998, les caractéristiques prévues des deux poussées sont chargées à bord, sans erreur cette fois-ci.
- Réglage du filtre de KALMAN le 31/03/1998 : élargissement de la tolérance Doppler.
- Réglage du filtre de KALMAN le 01/04/1998 : rétablissement des réglages usuels.

REINITIALISATION APRES L'ION LOURD DU 01/04/1998 :

- Bulletin initial 02/04/1998 (mais TCH RAZ non envoyé => pas d'effet sur DIODE et correction des procédures d'opération).
- RAZ et bulletin initial 02/04/1998.

ACTUALISATION DU RESEAU BORD :

On procède ici à la suppression, dans le réseau bord, des balises devenues inactives à la suite de pannes (depuis que le code de DIODE –contenant un réseau bord par défaut- avait été livré en juillet 1995) :

- Balises 7 (Nlle AMSTERDAM), 8 (idem), 10 (GOLDSTONE A), 14 (SAINT ETIENNE DE TINEE), 15 (ORRORAL), 16 (KOUROU A), 17 (RIO GRANDE), 19 (HARTEBEE SHOEK A), 21 (SOCORRO A), et 27 (HUAHINE A) retirées du réseau bord le 06/04/1998.
- Balises 33 (FLORES A), 34 (HVOA), 35 (ARLITTE A), 38 (SANTIAGO), 43 (Ste HELENE), 48 (OTTAWA), 50 (KERGUELEN), 53 (FLORES), 55 (PORT MORESBY) et 56 (WAIMEA) retirées du réseau bord le 07/04/1998.
- Balises 57 (KITAB), 62 (SANTA MARIA) et 63 (GOLDSTONE) retirées du réseau bord le 08/04/1998.

PREMIERE MANŒUVRE DE MAINTIEN A POSTE DE SPOT4 :

- Le 15/04/1998 à 23 h 53 min, caractéristiques prévues de la première poussée.
- Le 16/04/1998 à 0 h 44 min, caractéristiques prévues de la deuxième poussée.

EVOLUTION DU RESEAU BALISES :

- Balise 79 (SODB) ajoutée dans le réseau bord le 01/07/1998.
- Balise 59 (YUZHNO) remise dans le réseau bord le 01/07/1998.

REMISE EN SERVICE APRES L'INCIDENT DU 04/07/1998 :

- RAZ et bulletin initial le 06/07/1998. C'est le dernier bulletin initial envoyé à DIODE à ce jour.

EVOLUTION DU RESEAU BALISES :

- Balise 66 (PAPEETE A) retirée du réseau bord le 16/07/1998.
- Balise 78 (PAQB) ajoutée dans le réseau bord le 16/07/1998.

TROISIEME MANŒUVRE DE MAINTIEN A POSTE DE SPOT4 :

- Le 01/09/1998 à 0 h 41 min, caractéristiques prévues de la première poussée.
- Le 01/09/1998 à 1 h 32 min, caractéristiques prévues de la deuxième poussée.

EVOLUTION DU RESEAU BALISES :

- Balise 80 (REYB) ajoutée dans le réseau bord le 01/09/1998.
- Balise 26 (REYA) retirée du réseau bord le 01/09/1998.
- Balise 69 (KITAB) remise dans le réseau bord le 14/09/1998.