

Principes de la synchronisation et de la datation DORIS

Rédigé par :

C. JAYLES

Date et Visa

16/09/2019

Jayles

Pour accord :

Date et Visa

Pour approbation :

Cécile MANFREDI

Date et Visa

17/09/2019

Manfredi

Pour application à	DS2	TP	DS4	DPP	DJ1	DS5	DH2	DJ2	DCY	D3S	SMM	DOR
												X
Modèles												

Document géré en configuration

OUI

par : CCM DORIS

à dater du : 13/03/2007

Statut du document :

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN
		Version : 0.7
		Date : 10/09/2019
		Page : 2/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

BORDEREAU D'INDEXATION

Confidentialité :		Limité aux destinataires en diffusion
Mots clé :		
Logiciels de création :	Nombre de pages supplémentaires :	
Résumé d'auteur :		

MODIFICATIONS

Les modifications par rapport à la version précédente sont signalées par un trait vertical en marge gauche.

Version	Date	Objet
0.1	09/02/2007	Introduction en configuration par DM CO-DM-D0-447-CN
0.2	07/12/2007	Prise en compte de la DM SALP-DM-MA-488-CN
0.3	22/04/2007	DM CO-DM-D0-475-CN Sensibilité de IT3 au Doppler pour les instruments DGXX
0.4	30/09/2008	DM CO-DM-D0-510-CN Datation DORIS : précisions : ajout des tolérances de désynchronisation des balises DORIS, précisions sur YellowKnife, et ajout du schéma de Jean-Pierre Granier
0.5	26/05/2010	DM CO-DM-D0-2597-CN miscellaneaou + action CR SALP jan 2010 + ajout BM Papeete
0.6	09/03/2011	DM CO-DM-D0-2649-CN automatisation de la mise à jour BM_TAI, outil REG_BTEMPS
0.7	10/09/2019	DM CO-FT-3276 : correction d'une erreur vitesse de la lumière dans le graphique en Annexe

DOCUMENTS APPLICABLES ET DOCUMENTS DE REFERENCE

Référence	Titre du document
	DA1.
CO-NT-D0-EA-10071-CN	DR1. DORIS SYSTEM DESCRIPTION
CO-SP-D0-OP-14815-CN	DR2. MODELLING OF DORIS 2GM AND CRYOSAT INSTRUMENTS
CO-IF-D1/B-EA-10823-CN	DR3. INTERFACE SPECIFICATIONS BETWEEN THE DORIS NETWORK BEACONS AND THE ONBOARD INSTRUMENT
SALP-PR-MA-OP-15424-CN	DR4. RATTACHEMENT EN TEMPS D'UNE BALISE-MAITRESSE
CO-SP-R-EA-15226-CN	DR5. EXIGENCES SYSTEME POUR LA GESTION DU RESEAU DE STATIONS DORIS
CO-IF-B-EA-11844-CN	DR6. SPECIFICATION D'INTERFACE ENTRE LES BALISES DORIS ET LES HORLOGES EXTERNES
SALP-SP-TF-EA-15553-CN	DR7. SPECIFICATIONS TECHNIQUES DE BESOIN DU TIROIR D'ASSERVISSEMENT DE LA BALISE DORIS
CO-NT-D0-EA-15343-CN	DR8. EVALUATION DE L'EFFET D'INSTABILITES DE FREQUENCE OUS SUR LA DETERMINATION D'ORBITE DORIS
CO-PL-D0-EA-15414-CN	DR9. CALIBRATION PLAN
CO-CR-D0-GO-15579-CN/4	DR10. DORIS PERFORMANCE GROUP : 21/06/2006 MEETING PROCEEDINGS

LISTE DES AC ET AD

AC/AD	Paragraphe	Intitulé succinct



DIFFUSION LIMITEE DORIS



Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN
Version : 0.7
Date : **10/09/2019**
Page : 3/47

Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS

ABREVIATIONS

Sigle	Définition
TCH	TéléChargement
TAHR	Temps Atomique des Horloges de Référence : échelle de temps de chacune des horloges des Balises de Temps
TRH	Temps du Récepteur Horaire
TAI	Temps Atomique International
PPS	Pulse per Second
BMT	Balise-Maîtresse de Toulouse
BMK	Balise-Maîtresse de Kourou
BMH	Balise-Maîtresse de Hartebeeshoek
BMP	Balise-Maîtresse de Papeete
TCMD	Top de Comptage de la Mesure Distance
TDI	TOP DORIS interne
TOUS	Temps OUS
TUC	Temps Universel Coordonné
BDT	Base de Temps
OUS	Oscillateur Ultra-Stable

SOMMAIRE

1. OBJET	6
2. DOMAINE D'APPLICATION	7
3. CONVENTIONS	7
3.1 TERMINOLOGIE	7
3.1.1 EVENEMENTS, ECHELLES DE TEMPS ET DATES	7
3.1.2 SYNCHRONISATION ET RATTACHEMENT EN TEMPS	7
3.2 GENERALITES SUR LES BASES DE TEMPS	8
3.2.1 DUREE EXPRIMEE DANS LA BASE DE TEMPS	8
3.2.2 DUREE EXPRIMEE EN TAI	8
3.2.3 RELATION ENTRE DUREE (BASE DE TEMPS) ET DUREE (TAI)	8
3.3 REFERENCES DE TEMPS	9
3.3.1 BALISES DE CORRECTION DE TEMPS	9
3.3.2 BALISE DE TEMPS	10
3.3.3 CONFIGURATION DES BCT ET BT	10
3.3.4 DETERMINATION DU CALAGE EN TEMPS DES REFERENCES	11
3.3.5 REMARQUES COMPLEMENTAIRES	11
3.4 NOTATIONS	11
3.4.1 PARAMETRES UTILISES DANS LE RATTACHEMENT	11
3.4.2 ECHELLES DE TEMPS UTILISEES	12
4. UTILISATION DES INFORMATIONS DE TEMPS PAR UN RECEPTEUR DORIS	13
4.1 HORLOGE BORD	13
4.2 SYNCHRONISATION DU SEGMENT BORD	14
4.2.1 SYNCHRONISATION GROSSIERE	15
4.2.2 PREMIERE BALISE DE CORRECTION DE TEMPS (BCT1)	15
4.2.3 DEUXIEME BALISE DE CORRECTION DE TEMPS (BCT2)	15
4.2.4 ACQUISITION A 10 SECONDES DE LA DATE TAI	15
4.2.5 SYNCHRONISATION CONFIRMEE	16
4.3 PREMIER RATTACHEMENT FIN DU TEMPS BORD TOUS AU TAI (BT3)	16
4.4 RATTACHEMENT DE ROUTINE DU TEMPS BORD TOUS AU TAI	16
4.4.1 MAINTIEN DE LA SYNCHRONISATION BORD-SOL	17
4.4.2 DATATION DES MESURES DE PHASE (DOPPLER)	18
4.4.3 FONCTION BORD « DATEUR »	19
4.5 COMMENTAIRE SUR LA SYNCHRONISATION SYSTEME DE DORIS	20
5. LES MESURES DE RATTACHEMENT EN TEMPS DORIS	21
5.1 PRINCIPE DE LA MESURE DE RATTACHEMENT EN TEMPS (OU MESURE IT3)	22
5.2 MODELISATION DE LA MESURE DE RATTACHEMENT EN TEMPS	25
6. LA CHAINE D'ELABORATION DES TCH BROADCAST DE TEMPS	27
6.1 FONCTION	27
6.2 PROCESSUS DE GENERATION	28
6.3 PRECISION SUR LES CONVENTIONS DE SIGNE UTILISEES	29
6.4 ETAPE 1 : GENERATION DES FICHIERS BMTAI UNITAIRE	29

Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS

6.4.1	GENERATION AUTOMATIQUE PAR L'OUTIL REG_BTEMPS (APPLICABLE UNIQUEMENT AUX BMS)	29
6.4.2	GENERATION VIA LE FICHIER VALEUR_TF.XLS (APPLICABLE AUX BMS ET BT)	30
6.4.3	CONTENU	30
6.4.4	CONVENTIONS	31
6.4.5	EXEMPLE DE FICHIER VALEUR_TF.XLS	32
6.4.6	INFORMATIONS NECESSAIRES AU CENTRE DE MISSION DORIS POUR LE RATTACHEMENT DES BALISES DE TEMPS AU TEMPS TAI	34
6.5	ETAPE 2 : FICHIERS HISTORIQUE BM_TAI	35
6.5.1	CONTENU	36
6.5.2	CONVENTIONS	36
6.6	CONTENUS DES TCH BROADCAST DE TEMPS	36
6.6.1	CONTENU	37
6.6.2	CONVENTIONS	37
6.7	SCHEMA RESUME	37
7.	MOYENS DE SURVEILLANCE	38
7.1	SURVEILLANCE DE LA DATATION BORD JASON-1	38
7.2	SURVEILLANCE DE LA DATATION BORD JASON-2	39
7.3	CALIBRATION DORIS-LASER	40
7.4	VERIFICATION DE LA COHERENCE INTERNE	40
ANNEXE 1 : TEMPS DE TRANSIT BORD DU BIT DE SYNCHRONISATION		41
ANNEXE 2 : LES LIMITES DU SEQUENCEMENT DORIS		42
DEFINITIONS :		42
CALCUL DES VALEURS LIMITES DE DESYNCHRONISATION BALISE // RECEPTION DU MESSAGE		43
LIMITES INFERIEURE : BINF		43
LIMITE SUPERIEURE : BSUP		44
ANNEXE 3 : LE SEQUENCEMENT INTERNE DU RECEPTEUR DORIS DGXX		46

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 6/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

1. OBJET

DORIS (Doppler Orbitographie et Radiopositionnement intégrés par Satellite) est un système de détermination de la position de satellites et de localisation précise de balises DORIS, qui a été développé conjointement par le CNES, l'IGN et le GRGS.

Ce document a pour but de présenter les principes de la datation du système DORIS, en s'attachant particulièrement à décrire :

- ◆ la synchronisation de l'ensemble du système,
- ◆ les mesures de rattachement en temps DORIS (dites IT3),
- ◆ le rattachement en temps des balises (Balises de Correction de Temps, Balises de Temps),
- ◆ les diverses conventions de signes utilisées à bord et au sol,
- ◆ les fichiers horloges de référence,

en détaillant les raisons des choix qui ont été faits.

On trouvera une description globale du système DORIS dans le document DR1.

On trouvera les définitions des différentes fonctions assurées par les balises (Balises de Correction de Temps, Balises de Temps) dans le document DR5.

Les conventions, notations et définitions sont regroupées au chapitre 3.

Pour clarifier l'exposé, on décrit au chapitre 4 la façon dont les récepteurs DORIS utilisent les informations de datation, en phase d'initialisation puis en phase de routine.

On décrit ensuite :

- Au chapitre 5, les principes de datation bord qui permettent soit à bord, soit au sol, de maîtriser le passage de l'échelle de temps bord de chaque récepteur, au Temps Atomique International.
- Au chapitre 6 la chaîne de génération des TCH Broadcast par le segment sol.

Enfin, on décrit au chapitre 7 les moyens de surveillances utilisés pour le suivi de la synchronisation et de la datation DORIS.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 7/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

2. DOMAINE D'APPLICATION

Ce document s'applique à tous les projets DORIS en exploitation et en développement (DORIS / SPOT2, DORIS / SPOT 4, DORIS / SPOT 5, DORIS / Jason-1, DORIS / ENVISAT et DORIS / Hélios2, DORIS / Pléiades, DORIS / Jason-2, DORIS / AltiKa, DORIS/CryoSat2, DORIS / HY2, ...

3. CONVENTIONS

3.1 TERMINOLOGIE

3.1.1 EVENEMENTS, ECHELLES DE TEMPS ET DATES

Dans tout le document, on appellera « échelle de temps » une succession ordonnée d'événements : Tops TDI du temps bord DORIS TOUS, Tops 10 secondes rondes TAI, Tops SI du temps Balise, ...

On appellera « événement » un phénomène localisé et instantané, se produisant à un endroit et un moment connus : arrivée d'un pulse à l'antenne DORIS, ...

On appellera « date » de cet événement une indication numérique précise permettant de situer l'événement par rapport à une échelle de temps.

Pour un événement E1, on notera donc TAI(E1) sa date par rapport à l'échelle de temps TAI.

Une différence de dates exprimées dans la même échelle de temps sera appelée « durée ». Par exemple, l'intervalle de temps entre un Top TDI et le suivant aura pour durée en TAI :

$$TAI(TDI_n, TDI_{n+1}) = TAI(TDI_{n+1}) - TAI(TDI_n)$$

La date d'un événement dans une échelle de temps est par définition le nombre de périodes de l'horloge définissant l'échelle de temps, compté à partir d'un autre événement choisi comme origine (de l'échelle de temps).

3.1.2 SYNCHRONISATION ET RATTACHEMENT EN TEMPS

« Synchroniser » deux événements signifie les amener à se produire en même temps, ou dans un ordre donné et dans un laps de temps donné.

« Rattacher » deux échelles de temps est une opération qui consiste à définir une correspondance précise entre deux échelles de temps: ceci se fait par détermination des paramètres d'une échelle de temps par rapport à l'autre (biais, dérive, ...). Le rattachement d'une échelle de temps à une autre permet ensuite la transposition des dates d'une échelle de temps, dans l'autre.

Ainsi, on s'intéressera dans ce document :

- Au chapitre 5, à rattacher le temps bord DORIS TOUS, aux échelles de temps des Horloges de Référence.

Ce document est la propriété du CNES. Les informations contenues dans celui-ci ne peuvent être communiquées, publiées ou reproduites sans l'accord préalable du CNES.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 8/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

- Au chapitre 6, à rattacher les échelles de temps des Horloges de Référence (Balises de Correction de Temps, Balises de Temps) au Temps Atomique International TAI.

3.2 GENERALITES SUR LES BASES DE TEMPS

On appelle Base de Temps (ou BDT) un équipement (OUS, OCXO, horloge atomique, MASER, ...) fournissant un signal périodique de référence,

- de fréquence $F(t)$ à l'instant de date t , en TAI,
- dont la valeur nominale vaut F_{nom} .

On considère deux événements $E1$ et $E2$: on note $TAI(E1)$ et $TAI(E2)$ leurs dates en TAI.

Les fréquences sont exprimées en « Hertz TAI » (nombre de périodes par seconde TAI).

3.2.1 DUREE EXPRIMEE DANS LA BASE DE TEMPS

Une seconde de la base de temps est la durée nécessaire pour compter F_{nom} périodes sur le signal périodique de référence.

On appelle durée (dans la base de temps BDT) entre les événements $E1$ et $E2$, en secondes BDT (notée $BDT(E1, E2)$) le nombre de périodes du signal de référence de la base de temps, comptées entre $E1$ et $E2$, divisé par F_{nom} .

Le nombre de périodes comptées sur le signal de référence entre $E1$ et $E2$, est par définition égal à :

$$\int_{TAI(E1)}^{TAI(E2)} F(t) dt$$

On a donc :

$$BDT(E1, E2) = \int_{TAI(E1)}^{TAI(E2)} \frac{F(t)}{F_{nom}} dt$$

3.2.2 DUREE EXPRIMEE EN TAI

On note $TAI(E1, E2)$ la durée mesurée en Temps Atomique International (TAI) entre les deux événements $E1$ et $E2$. C'est le nombre de secondes comptées sur un signal de référence virtuel, battant le TAI. On a :

$$TAI(E1, E2) = TAI(E2) - TAI(E1)$$

3.2.3 RELATION ENTRE DUREE (BASE DE TEMPS) ET DUREE (TAI)

On pose $\delta F(t) = F(t) - F_{nom}$

Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS

$$\text{On a donc : } BDT(E1, E2) = \int_{TAI(E1)}^{TAI(E2)} \frac{F(t)}{F_{nom}} dt = \int_{TAI(E1)}^{TAI(E2)} \frac{\delta F(t)}{F_{nom}} dt + (TAI(E2) - TAI(E1))$$

On note $\frac{\overline{\delta F(E1, E2)}}{F_{nom}}$ la valeur moyenne de $\delta F(t)/F_{nom}$ entre E1 et E2. On a (par définition de la valeur moyenne) :

$$\frac{\overline{\delta F(E1, E2)}}{F_{nom}} = \frac{1}{(TAI(E2) - TAI(E1))} \int_{TAI(E1)}^{TAI(E2)} \frac{\delta F(t)}{F_{nom}} dt$$

On obtient ainsi la relation entre une durée BDT et une durée TAI :

$$BDT(E1, E2) = TAI(E1, E2) * \left(1 + \frac{\overline{\delta F(E1, E2)}}{F_{nom}} \right) \quad [A]$$

ou, au 1^{er} ordre :

$$TAI(E1, E2) = BDT(E1, E2) * \left(1 - \frac{\overline{\delta F(E1, E2)}}{F_{nom}} \right) \quad [A']$$

3.3 REFERENCES DE TEMPS

Les références de Temps et de fréquence du système sont les horloges/oscillateurs des :

- Balises de Correction de Temps pour la synchronisation,
- Balises de Temps pour le rattachement fin du temps TOUS au TAI.

Les échelles de temps des balises sont traditionnellement notées « SI ».

3.3.1 BALISES DE CORRECTION DE TEMPS

Ces balises, notées BCT, constituent des Références stables pour la synchronisation des récepteurs : le comportement de leur horloge est surveillé et leur échelle de temps est conservée proche du TAI. Leur spécification actuelle de calage est de 50 microsecondes MAX, voir DR5.

Ces balises doivent donc avoir une excellente stabilité :

- sur le long terme afin que le maintien du calage ne récessite pas de recalage trop fréquent (1 tous les deux ans pour une dérive de l'ordre de 100 nanosecondes/ jour soit un $\Delta f/f$ de 10^{-12}) voir DR6,
- sur le court terme car ces balises sont aussi des balises d'orbitographie ($\Delta f/f$ = quelques 10^{-13} sur 10 à 1000 secondes).

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 10/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

Le récepteur DORIS reconnaît ces balises par leur code réservé dans la table des codes des Balises (voir DR3 Annexe).

3.3.2 BALISE DE TEMPS

Les Balises de Temps (BT) sont des balises dont le comportement est connu par rapport au TAI avec une grande précision (mieux que 500 nanosecondes sur une semaine, 1 microseconde MAX sur 10 jours, cf DR5) , mais dont le comportement n'est pas nécessairement recalé pour rester proche du TAI. Ces balises peuvent donc présenter des écarts ou des dérives importants de leur échelle de temps par rapport au TAI (plusieurs dizaines de microsecondes, voire plusieurs centaines de microsecondes ... voire plus), pourvu qu'ils soient connus avec la précision requise.

Ces balises constituent donc des références précises pour la détermination du temps, mais elles ne sont pas utilisées pour la synchronisation bord.

Ces balises doivent avoir des performances comparables à celles des BCT :

Sur le long terme de manière à garantir le rattachement spécifié sur les 10 jours à venir, à partir du comportement observé sur le passé, soit une erreur relative de fréquence inférieure à 10^{-12} (voir DR6),

Sur le court terme car elles sont également Balises d'Orbitographie.

3.3.3 CONFIGURATION DES BCT ET BT

Pour ces balises, deux types d'horloges dites « de Référence » peuvent convenir :

- OUS asservi sur Césium,
- MASER à hydrogène

Ces équipements respectent les exigences que doivent tenir les horloges externes (voir DR6).

3.3.3.1 Configuration Césium + asservissement sur OUS

Dans ce cas, l'horloge de Référence est constituée par l'asservissement d'un oscillateur à quartz qui apporte son faible bruit court terme et moyen terme (quelques 10^{-13} sur 10 à 1000 secondes) sur une horloge atomique qui donne sa stabilité long terme (durées supérieures à 1000 secondes).

Par exemple, dans sa configuration 2006, DORIS utilisait :

- Le Césium du CNES (pour la BMT), contribuant à l'élaboration du Temps Atomique International,
- Des Césiums dédiés intégrés aux balises Maîtresses de Kourou, d'Hartebeeshtoeck et Papeete.

En effet, un oscillateur à quartz présente un bruit court terme et moyen terme satisfaisants pour la performance DORIS, mais sa stabilité long terme n'est pas suffisante pour une BT ou une BCT. La fréquence de l'oscillateur est alors corrigée par un asservissement sur un Césium pour qu'elle reste proche de celle du Césium, ce qui assure la stabilité à long terme de l'ensemble. La conception de cet asservissement doit être telle, qu'elle ne dégrade pas la performance de l'OUS entre 10 et 1000s (voir DR7).

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 11/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

3.3.3.2 Configuration Maser à hydrogène

L'horloge de type Maser à hydrogène présente à la fois les qualités requises pour les besoins Court Terme, Moyen Terme et Long Terme. Le système DORIS comporte aujourd'hui deux Balises de Temps équipées de Maser (qui peuvent être activées ou désactivées), qui sont YellowKnife (Canada) et Terre Adélie (Antarctique).

3.3.4 DETERMINATION DU CALAGE EN TEMPS DES REFERENCES

Le rattachement au TAI de l'Horloge de Référence de ces balises (BCT, BT) est suivi :

- soit par un récepteur horaire (exemple Kourou, Hartebeesthoek, Papeete) voir DR4,
- soit par les moyens du laboratoire Temps/Fréquence du CNES (Toulouse),
- soit encore par observation du comportement de l'horloge par le traitement des mesures DORIS dans le Centre de Mission DORIS (méthode interne à DORIS, dite « des Broadcasts »).

Les valeurs de rattachement entre les horloges des Balises de Temps et le TAI sont envoyées aux récepteurs DORIS par le Centre de Mission DORIS via les Balises de Téléchargements, sous la forme de Broadcasts de Temps (voir chapitre 6). Ces valeurs sont ensuite stockées à bord par les logiciels de vol.

3.3.5 REMARQUES COMPLEMENTAIRES

Les valeurs observées grâce aux mesures des Balises de Temps permettent de déduire les caractéristiques du temps bord.

Seules les mesures des Balises de Temps en mode normal (RS=0, H=1, SY=1) sont utilisées pour déterminer la correspondance fine Temps Bord – TAI et l'écart en fréquence de l'oscillateur bord.

3.4 NOTATIONS

3.4.1 PARAMETRES UTILISES DANS LE RATTACHEMENT

Les notations suivantes sont utilisées dans tout le document :

f_s	fréquence de l'OUS ou de l'horloge sol ($F_{sol_{nom}}$ = fréquence nominale = 5 MHz)
f_b	fréquence de l'OUS bord ($F_{bord_{nom}}$ = fréquence nominale = 10 MHz)
τ_{SI}	écart en TAI entre le temps balise SI et le Temps Atomique de l'Horloge de Référence TAHR (temps de transit des câbles et de l'électronique de la balise)
τ_{s3}	délais électroniques de la balise et de l'antenne sol affectant le bit de synchronisation
T_{p3}	temps de propagation entre le centre de phase de l'antenne sol et le centre de phase de l'antenne bord, affectant le bit de synchronisation
τ_{m3}	délais électroniques du récepteur et de l'antenne bord affectant le bit de synchronisation
$T3$	événement daté en temps bord (arrivée du bit de synchronisation au compteur bord)

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 12/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

IT3 mesure de rattachement en temps = durée en temps bord entre le Top TCMD et l'événement T3

3.4.2 ECHELLES DE TEMPS UTILISEES

3.4.2.1 Echelle de Temps bord TOUS

L'échelle de temps bord est conventionnellement appelée TOUS.

Il y a autant d'échelles TOUS que d'instruments DORIS en opérations. Pour un même instrument, cette échelle change en cas de réinitialisation, de redémarrage ou de changement de chaîne.

L'échelle TOUS peut être matérialisée :

Soit par les 10 secondes rondes TOUS,

Soit par les Tops TDI qui marquent le début des séquences bord. Ces tops sont généralement espacés de 10 secondes TOUS, sauf en cas de Correction de Temps (CT), ce qui provoque des discontinuités de cette échelle de Temps.. Les Corrections de Temps sont nécessaires pour le maintien de la synchronisation des Tops TDI sur le TAI à mieux que ± 50 millisecondes.

3.4.2.2 Echelle de Temps balise SI

L'échelle de temps balise est conventionnellement appelée SI. Les Tops 10s rondes du temps sol SI qui matérialisent cette échelle de temps sont appelés « Tops SI ».

Il y a autant d'échelles SI que de balises DORIS en opérations. Pour une même balise, cette échelle change en cas de redémarrage ou de recalage.

3.4.2.3 Echelle de Temps des Horloges de Référence TAHR

L'échelle de temps d'une horloge de Référence est appelée TAHR. Les Tops 10s rondes du temps TAHR qui matérialisent cette échelle de temps sont appelés « Tops TAHR ».

Il y a autant d'échelles TAHR que d'(horloges de) balise de Temps DORIS. Cette échelle change en cas de redémarrage ou de recalage de l'horloge.

3.4.2.4 Echelle de Temps TAI

L'échelle de temps de référence est le Temps Atomique International. Les Tops 10s rondes du temps TAI qui « matérialisent » cette échelle de temps sont appelés « Tops TAI ».

Rappel : les tops TAI, TAHR, SI, et TDI sont (comme l'événement T3) des événements qui peuvent être datés en TAI ou en temps bord TOUS ou dans une autre échelle de temps.

Exemple: TAI (TDI_n) ou TOUS (T3) ou TAI(SI_n).

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 13/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

4. UTILISATION DES INFORMATIONS DE TEMPS PAR UN RECEPTEUR DORIS

Lorsqu'il est mis sous tension par la plateforme, le récepteur DORIS est dans un mode où il commence à capter des signaux balises. A chaque passage sur une balise, le récepteur DORIS effectue des corrections de son temps bord (donné par l'OUS bord qui lui sert d'horloge) pour capter au mieux le message que cette balise émet toutes les 10 secondes : le récepteur est à l'écoute, il cherche les balises sur lesquelles il va pouvoir se synchroniser.

4.1 HORLOGE BORD

Le temps bord DORIS est donné par l'horloge bord au pas de 10 millisecondes bord, issue de l'oscillateur bord de fréquence nominale 10 MHz. Tous les événements DORIS sont datés en heure bord ou heure TOUS (nombre de pas du compteur depuis la dernière remise à zéro (RAZ)).

Tous les 1000 pas (c'est-à-dire toutes les 10 secondes environ), un Top est produit : c'est le Top 10 secondes bord ou TOP TDI. On s'intéresse aux événements TDI_n et TDI_{n+1} :

$$TOUS(TDI_n, TDI_{n+1}) = 10 \text{sec} TOUS$$

D'après [A], la durée en TAI entre ces deux Tops TDI successifs est fonction de la fréquence de l'oscillateur bord :

$$TAI(TDI_n, TDI_{n+1}) = TOUS(TDI_n, TDI_{n+1}) \left(1 + \frac{\overline{\delta f_b}(TDI_n, TDI_{n+1})}{F_{bord_{nom}}} \right)$$

donc :

$$TAI(TDI_n, TDI_{n+1}) = \frac{10}{\left(1 + \frac{\overline{\delta f_b}(TDI_n, TDI_{n+1})}{F_{bord_{nom}}} \right)}$$

soit enfin, au 1^{er} ordre :

$$TAI(TDI_n, TDI_{n+1}) = 10 * \left(1 - \frac{\overline{\delta f_b}(TDI_n, TDI_{n+1})}{F_{bord_{nom}}} \right) \quad [B]$$

Si la fréquence de l'oscillateur bord est plus élevée que la normale ($f_b(t) > F_{bord_{nom}}$ donc $\delta f_b(t) > 0$), alors le temps bord bat plus vite que le TAI et l'écart entre deux Tops TDI (qui vaut 10 secondes exactement en temps bord) durera moins de dix secondes en temps TAI.

Une des caractéristiques fondamentales d'un récepteur DORIS est de fonctionner sur ce cycle de Tops TDI qui sont générés à partir de son temps bord. Le premier objectif du récepteur est de synchroniser

Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS

correctement ce cadencement, à environ -1.15 seconde $\pm$ 50 millisecondes par rapport aux Tops 10 secondes rondes de l'échelle de temps TAI.

4.2 SYNCHRONISATION DU SEGMENT BORD

Le récepteur en phase d'initialisation va ainsi verrouiller son cadencement 10 secondes sur celui des Balises de Correction de Temps qu'il va survoler. Cette étape permet au récepteur de se synchroniser à environ 1.15 seconde $\pm$ 50 millisecondes (en pratique 10 à 20 millisecondes) par rapport au temps des BCT survolées, donc en pratique par rapport au TAI.

L'ensemble des phases décrites ci-dessous peut être résumé dans le schéma suivant :

Temps depuis la mise ON de DORIS	Phase	Etape	
Selon les orbites, et la disponibilité des balises, de une à douze heures	Synch. Instr.	Synchronisation grossière	
		Première balise de Correction de Temps	
		Deuxième balise de Correction de Temps	Acquisition à 10 secondes de la date TAI
		Synchronisation confirmée	Brd. Acq.
Selon les orbites, et la disponibilité des balises, de une à trois heures	Navigation (DIODE) Initialisation	Recherche de B1 à B4	
		Première orbite	
		Navigation grossière	
		Premier rattachement fin du temps bord TOUS au TAI (BT3)	
	Routine	Rattachement de routine du temps bord TOUS au TAI	

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 15/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

4.2.1 SYNCHRONISATION GROSSIERE

Pendant cette phase, le récepteur attend l'accrochage d'une balise quelconque et effectue des corrections de sa synchronisation bord (par saut de 3,5 secondes) afin d'obtenir une mesure TDI valide. Une fois cette valeur trouvée, le récepteur effectue une correction supplémentaire afin de s'assurer que le message balise sera correctement reçu durant un cycle TDI

4.2.2 PREMIERE BALISE DE CORRECTION DE TEMPS (BCT1)

Pour poursuivre sa synchronisation, le récepteur va devoir attendre de survoler une première Balise de Correction de Temps : on note conventionnellement ce passage BCT1.

A cette étape, le récepteur utilise les mesures de rattachement en temps DORIS (dites IT3) : un événement dont la date d'émission est parfaitement connue en temps balise, est daté à sa réception à bord, dans l'échelle de temps bord.

Le principe de ces mesures est détaillé au chapitre 5, elles permettent de maîtriser la correspondance des échelles de temps bord et balise.

Lors de cette étape (et de la suivante), une simplification du traitement est faite, en considérant :

- que le besoin de précision est de l'ordre de la dizaine de millisecondes,
- que le Navigateur n'étant pas encore actif, on ne connaît pas la distance station-satellite donc le temps de propagation (qui vaut quelques millisecondes pour les orbites fréquentées par DORIS)

Le cadencement bord est alors synchronisé sur celui de cette première BCT survolée. (TDI-TAI = -1.5s +/- 50ms)

4.2.3 DEUXIEME BALISE DE CORRECTION DE TEMPS (BCT2)

Une deuxième BCT (notée BCT2) doit confirmer le cadencement bord synchronisé sur BCT1. Ceci rend le système tolérant à une panne de Balise de Correction de Temps, qui aurait été susceptible d'induire un cadencement erroné.

CAS PARTICULIER : il existe une possibilité de désactiver cette confirmation, qui est en général nécessaire au Logiciel de Vol, en positionnant le mode « Vigibalise ». Cette option est prévue pour couvrir un cas de dysfonctionnement sur l'ensemble des Balises-Maîtresses, et n'a pas encore été utilisée.

En parallèle, le récepteur doit acquérir la date TAI.

4.2.4 ACQUISITION A 10 SECONDES DE LA DATE TAI

La première balise de type 3.0 que le récepteur réussit à suivre (*) va lui donner l'heure (à 10 secondes près) : le message de ces balises contient en effet le numéro de la séquence, c'est-à-dire le nombre d'intervalles de 10 secondes TAI qui se sont écoulés depuis le 1^{er} Janvier 2000, 0h.

Ce nombre est correct si la balise en question est à l'heure à 10 secondes près (voir parag. 4.5). Dans ce cas, l'ensemble des temps de transit, temps de propagation et biais de calage relatif des horloges sol et bord est suffisamment faible pour garantir que l'on a :

$TAI(TDI_n) = TAI(SI_n)$	A MIEUX QUE DIX SECONDES TAI	[C]
--------------------------	------------------------------	-----

Ce document est la propriété du CNES. Les informations contenues dans celui-ci ne peuvent être communiquées, publiées ou reproduites sans l'accord préalable du CNES.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 16/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

L'équation [C] est la condition de synchronisation de DORIS. Le récepteur en initialisation détermine l'origine de son échelle de temps bord permettant de respecter cette condition.

(*) les Balises de 3^{ème} génération qui ne sont pas BCT ne sont pas suivies suffisamment longtemps (3 ou 4 mesures seulement) pour permettre l'acquisition TAI qui est sous-commutée 1/3 dans le message balise, et nécessite plusieurs mesures cohérentes. Même pour les récepteurs de génération DGXX et suivantes, avec le mode DAS, on libère l'UT puis on peut raccrocher sur la même balise etc etc mais la durée d'une visibilité ne suffira pas à donner suffisamment de mesures cohérentes.

4.2.5 SYNCHRONISATION CONFIRMEE

Lorsque les trois opérations (synchronisation acquise sur BCT1, confirmée sur BCT2, et acquisition à 10 secondes de la date TAI sur une balise de 3^{ème} génération) sont achevées, le séquençement nominal est confirmé, le récepteur passe à la deuxième phase de l'initialisation et le Navigateur DIODE est activé.

Cette étape est en général effectuée quelques minutes après le survol de BCT2, puisque l'acquisition de la date TAI est en principe déjà acquise étant donné l'usage de n'installer comme BCT que des balises de 3^{ème} génération).

4.3 PREMIER RATTACHEMENT FIN DU TEMPS BORD TOUS AU TAI (BT3)

Cette étape a pour but de connaître la correspondance entre le temps bord TOUS et le TAI avec une précision de l'ordre de la microseconde. Ce rattachement sera ensuite utilisé pour dater précisément les mesures Doppler.

Ce rattachement fin (qui nécessite la connaissance du temps de propagation station-satellite, et donc en particulier de l'orbite) est réalisé sur la première Balise de Temps survolée après que le Navigateur ait déterminé une première orbite (en pratique, la première BT après BCT2 : on note conventionnellement ce passage BT3).

A partir de ce moment, le récepteur DORIS et son Navigateur sont en fonctionnement nominal.

4.4 RATTACHEMENT DE ROUTINE DU TEMPS BORD TOUS AU TAI

Le rattachement fin du Temps Bord au TAI est effectué à bord du récepteur DORIS par le navigateur DIODE. Il est également effectué au sol par les logiciels sol de détermination des dates, ainsi que par les logiciels sol de restitution d'orbite.

A bord, les valeurs de rattachement entre les horloges des Balises de Temps et le TAI sont reçues par les récepteurs DORIS via les Balises de Téléchargements, sous la forme de Broadcasts de Temps. Elles sont ensuite stockées par les logiciels de vol.

La correspondance entre l'horloge bord et le TAI est ainsi connue en visibilité de chaque Balise de Temps :

- L'écart (horloge bord, horloge balise) est donné par le traitement des mesures de rattachement en temps (chapitre 5),
- L'écart (horloge balise, TAI) est donné par les informations contenues dans les Broadcasts de Temps (chapitre 6).

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 17/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

Hors de visibilité des Balises de Temps, l'écart (horloge bord, TAI) est extrapolé à partir de sa dernière valeur estimée. A bord, cette extrapolation est faite avec un modèle linéaire où la dérive de cet écart est la dernière estimée du biais de fréquence bord (qui est identifié par le traitement des mesures DORIS sur les BT).

Les résultats de ce traitement sont utilisés en routine pour :

- la datation des mesures de phase (Doppler),
- et la fonction bord « dateur ».

4.4.1 MAINTIEN DE LA SYNCHRONISATION BORD-SOL

Une fois la synchronisation acquise, les oscillateurs sol et bord n'étant pas parfaits, ce calage dérive au cours du temps.

Il est donc nécessaire de le maintenir et le surveiller.

En cas de désynchronisation, des actions de nature différentes seront menées, certaines à caractère temps réel, d'autres du domaine de la surveillance long terme. Plusieurs mécanismes sont donc installés à différents endroits du système.

4.4.1.1 *Maintien et surveillance de la synchronisation système à dix secondes*

Les récepteurs DORIS à partir de la génération « DGM » vérifient la cohérence du paramètre IN reçu des balises de 3^{ème} génération, avec la connaissance qu'ils ont de la date TAI courante (c'est-à-dire qu'ils vérifient le respect de la condition [C]) et signalent toute incohérence de dates par un message télémesuré au sol.

L'occurrence de tels messages doit être surveillée par le sol. Le message précise s'il s'agit d'une désynchronisation du bord auquel cas l'action de resynchronisation est réalisée par le récepteur de manière autonome, ou seulement d'une balise du réseau auquel cas il faudra une intervention sur cette balise.

4.4.1.2 *Maintien et surveillance de la synchronisation bord à dix millisecondes*

Tous les récepteurs DORIS quelle que soit leur génération vérifient la synchronisation de l'horloge bord par traitement des mesures de synchronisation des Balises de Correction de Temps. Sa condition de bon calage est toujours :

$TAI(SI, TDI) = \text{environ } -1.15 \text{ seconde} \pm 50 \text{ millisecondes}$ (en pratique 10 à 20 millisecondes)

Si le Top TDI est mal calé par rapport au TAI, le logiciel effectue une Correction de Temps Automatique (CTA), c'est-à-dire qu'il décale le compteur de temps bord. Ce décalage se fait par pas de 10 millisecondes bord.

Jusqu'à la génération DGM incluse, le segment sol peut également intervenir sur la synchronisation d'un récepteur, en exécutant une commande de Correction de Temps Directe sur l'instrument. En génération DGXX et au-delà, la Correction de Temps Directe a été supprimée.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 18/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

4.4.1.3 Maintien et surveillance des échelles de temps balises

Il s'agit ici de déterminer le séquençement bord-sol (c'est-à-dire le décalage entre le Top SI et le Top TDI) pour chacune des balises du système : cette opération a pour but de contrôler la synchronisation de l'ensemble des balises du réseau.

En cas de désynchronisation trop importante de l'échelle de temps SI de l'une des balises du réseau par rapport au TAI (à partir de 1 seconde, voir DR5), le Top SI est trop décalé par rapport au Top TDI des récepteurs en vol, ce qui présente deux risques :

- le message de la balise risque de ne plus être reçu entièrement par les instruments DORIS,
- la mesure de phase risque d'être perturbée par l'arrivée du message.

Un recalage en datation de la balise sera alors effectué sur le terrain.

Cette surveillance n'induisant pas d'action corrective à caractère temps réel ou urgent, elle est réalisée par le Centre de Mission DORIS par traitement des mesures de rattachement en temps de toutes les Balises.

On trouvera en Annexe 2 les limites réelles du séquençement DORIS (qui varient suivant les générations de récepteurs considérées, et selon les types de balise –maîtresse ou standard -).

Si une balise présente des dérives trop importantes et par conséquent des recalages trop fréquents, il y a lieu de corriger la fréquence de son oscillateur. Les anciens modèles d'oscillateurs balises étaient recalables en fréquence sur le terrain.

Par la suite, il a été montré que cette capacité de réglage était par ailleurs une source de perturbations (voir DR8). C'est pourquoi cette possibilité de réglage (liée à un potentiomètre) a été supprimée. Dans ce cas, il faut un retour du matériel vers le SAV.

Sur les oscillateurs les plus récents, cette capacité de réglage qui apportait par ailleurs d'autres perturbations a été supprimée.

4.4.2 DATATION DES MESURES DE PHASE (DOPPLER)

Les mesures réalisées par le récepteur sont par conception datées en temps bord TOUS. Pour les traiter, on aura besoin de connaître précisément leur date dans l'échelle de temps TAI.

La combinaison des deux informations (mesures IT3, TCH Broadcasts) ainsi que le maintien de la synchronisation du système permet au récepteur de calculer, pour chaque date exprimée en temps bord, la date TAI qui lui correspond. Le récepteur DORIS fournit les mesures de Phase (Doppler) datées en temps TOUS et en TAI.

La précision obtenue de cette datation est estimée à une microseconde environ actuellement, ce qui correspond à 7 millimètres sur le déplacement du satellite ou encore 0.7 millimètre en altitude pour une orbite circulaire basse.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 19/47
Titre :Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

Les traitements de datation de la mesure peuvent être refaits au sol pour calculer plus finement la date TAI de chaque mesure (CCI, SOD, Mordor/Pandor).

4.4.3 FONCTION BORD « DATEUR »

Grâce au mécanisme ci-dessus, les récepteurs DORIS maîtrisent à bord et en temps réel la correspondance date_TOUS / date_TAI.

Pour rendre ce service disponible à l'extérieur du monde DORIS (l'ensemble de la plateforme, éventuellement le segment sol du projet), une fonction bord « dateur » a été ajoutée pour les récepteurs de deuxième génération et suivants.

Cette fonction peut se traduire par deux configurations possibles :

- le récepteur DORIS reçoit un Top externe et fournit la date TAI de sa réception dans un bloc de télémessure,
- le récepteur DORIS fournit un Top à 1 pps synchrone de son OUS ainsi que la date TAI de son émission dans un bloc de télémessure.

Pour cela, il suffit au récepteur de :

- Dater les Tops (reçus ou émis) en temps TOUS (par un procédé électronique suffisamment précis),
- Utiliser sa connaissance du rattachement date_TOUS / date_TAI.

Le récepteur DORIS peut donc être utilisé par un système satellitaire, pour donner la date TAI de Tops bord, avec une précision de l'ordre de la microseconde.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 20/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

4.5 COMMENTAIRE SUR LA SYNCHRONISATION SYSTEME DE DORIS

Comme on vient de le voir, il y a par construction nécessité pour le système DORIS d'obtenir puis de maintenir les calages des récepteurs (Tops TDI) et des balises (Tops SI) à la seconde près : en ce sens, DORIS est un système synchronisé, c'est-à-dire qu'il a besoin d'une synchronisation correcte de ses horloges (les dizaines de secondes doivent être justes et le message doit être reçu intégralement par les récepteurs en vol). Une synchronisation à la seconde environ permet donc de garantir la réception des messages et la qualité des mesures de phase.

Par contre, et c'est un choix système, DORIS n'exige pas de la grande majorité des balises, une synchronisation meilleure qu'une ou deux secondes (certaines balises sont situées dans des endroits peu accessibles, comme l'Antarctique) : ce point est obtenu par le choix d'un système « montant » où les mesures sont réalisées et centralisées à bord.

DORIS n'a donc pas besoin de connaître les rattachements en temps de toutes les balises à mieux que une seconde (cf parag. 4.3.3). Pour comparaison, sur l'ancien système américain TRANSIT (Doppler descendant), les mesures étaient datées par les différentes stations sol, qui devaient donc être rattachées finement ensemble : ce design imposait des opérations et des traitements complexes.

NOTA 1

Les mesures de rattachement en temps pourraient permettre de se synchroniser encore plus finement (puisqu'on peut connaître la correspondance entre le temps bord et le TAI), avec une précision de l'ordre de quelques microsecondes. Cette possibilité (asservir le temps bord sur le TAI à quelques microsecondes près) n'est pas utile à DORIS aujourd'hui, et n'est donc pas réalisée par les récepteurs DORIS actuels.

NOTA 2

La précision des mesures de phase DORIS pourrait permettre une « datation » à la picoseconde. La difficulté réside dans la résolution de l'ambiguïté de 500 ps (période du signal 2 GHz). Si des applications le demandaient, on pourrait imaginer des solutions pour résoudre cette ambiguïté et avoir ainsi une fonction de datation beaucoup plus précise.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 21/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

5. LES MESURES DE RATTACHEMENT EN TEMPS DORIS

Par conception, les mesures de phase (Doppler) du système DORIS sont réalisées et datées à bord de chaque récepteur embarqué, en temps bord TOUS.

L'avantage de ce choix système est que pour chacun des récepteurs, l'échelle de temps est unique, et commune à toutes les mesures. Elle est générée par l'horloge bord du récepteur, un Oscillateur Ultra-Stable (OUS).

Pour pouvoir intercomparer DORIS avec les autres techniques de mesure (et aussi pour accéder à la position de la Terre, dont le mouvement n'est hélas pas tabulé en temps TOUS), ce choix impose de maîtriser le rattachement de l'échelle TOUS à une échelle de temps de Référence, le Temps Atomique International (le TAI).

Le système DORIS s'est donc doté d'un système rattachement, subdivisé en deux étapes :

- Les mesures de rattachement en temps, permettant de rattacher l'échelle de temps TOUS aux échelles de temps SI des Balises de Temps.
- Le rattachement des échelles de temps SI des Balises de Temps au Temps Atomique International TAI (en passant par les échelles des horloges atomiques de référence TAHR) est détaillé au chapitre 6.

Le principe de la « mesure IT3 » consiste à dater en temps bord un événement (appelé événement T3), dont on connaît par construction la date d'émission exacte en temps balise.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 22/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

5.1 PRINCIPE DE LA MESURE DE RATTACHEMENT EN TEMPS (OU MESURE IT3)

Un bit particulier du message balise (le bit de synchronisation) est émis à une date parfaitement connue dans l'échelle de temps de la balise. A sa réception à bord, l'arrivée de ce bit (nommée événement T3) est repérée par le récepteur DORIS et datée précisément dans l'échelle de temps bord (TOUS).

En tenant compte du temps de propagation du signal dans l'atmosphère, ainsi que des différents retards électroniques dans les circuits d'émission balise et les filtres de réception à bord, on arrive ainsi à mesurer finement l'écart entre l'horloge bord et l'horloge de la Balise de Temps.

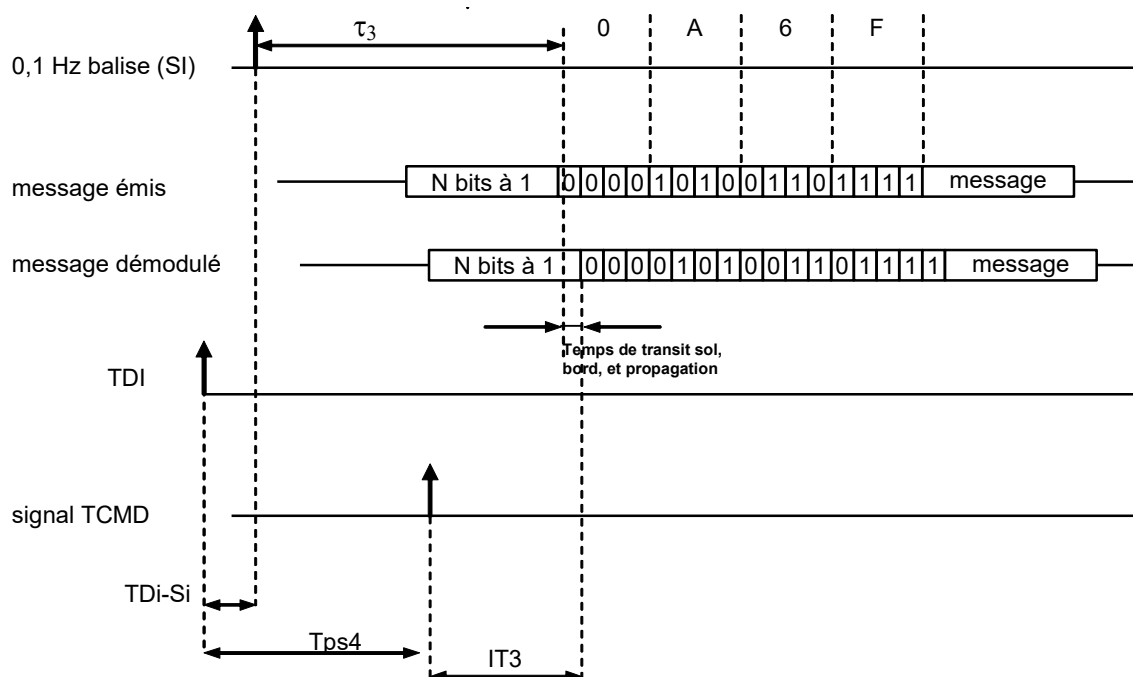


Figure 1 : Schéma de principe de la mesure IT3

Pour les instruments actuels (depuis 2GM inclus), la valeur de la mesure de rattachement en temps IT3 correspond à l'écart entre le top TCMD et le front montant du premier zéro du mot de synchronisation « 0A6F ».

Pour les instruments d'ancienne génération (jusqu'à 2G inclus), les événements encadrant la durée IT3 étaient le Top TDI et le dernier bit du mot de synchro, mais le principe reste le même.

τ_3 a pour valeur (en temps balise SI) :

2,7 s pour une balise de téléchargement (avec N=120 bits à 1)
5.3 s pour les autres balises

(durée d'émission d'un bit=5 millisecondes, quels que soient le type et la génération de balise)

$Tps4 = \text{écart entre le top TDI et le top TCMD} = 3 \cdot 10^7 / F_{\text{bord}} = 3 \text{ s TOUS}$



DIFFUSION LIMITEE DORIS



Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN
Version : 0.7
Date : **10/09/2019**
Page : 23/47

Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS

TDI – SI = écart entre le séquençement bord et le séquençement balise (TDI = Top de début des séquences 10s bord, SI Top de début des séquences balise)

Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS

On note TAHR le Temps de l'Horloge Atomique de Référence de chaque Balise de Temps (il y a autant d'échelles de temps TAHR que de Balises de Temps).

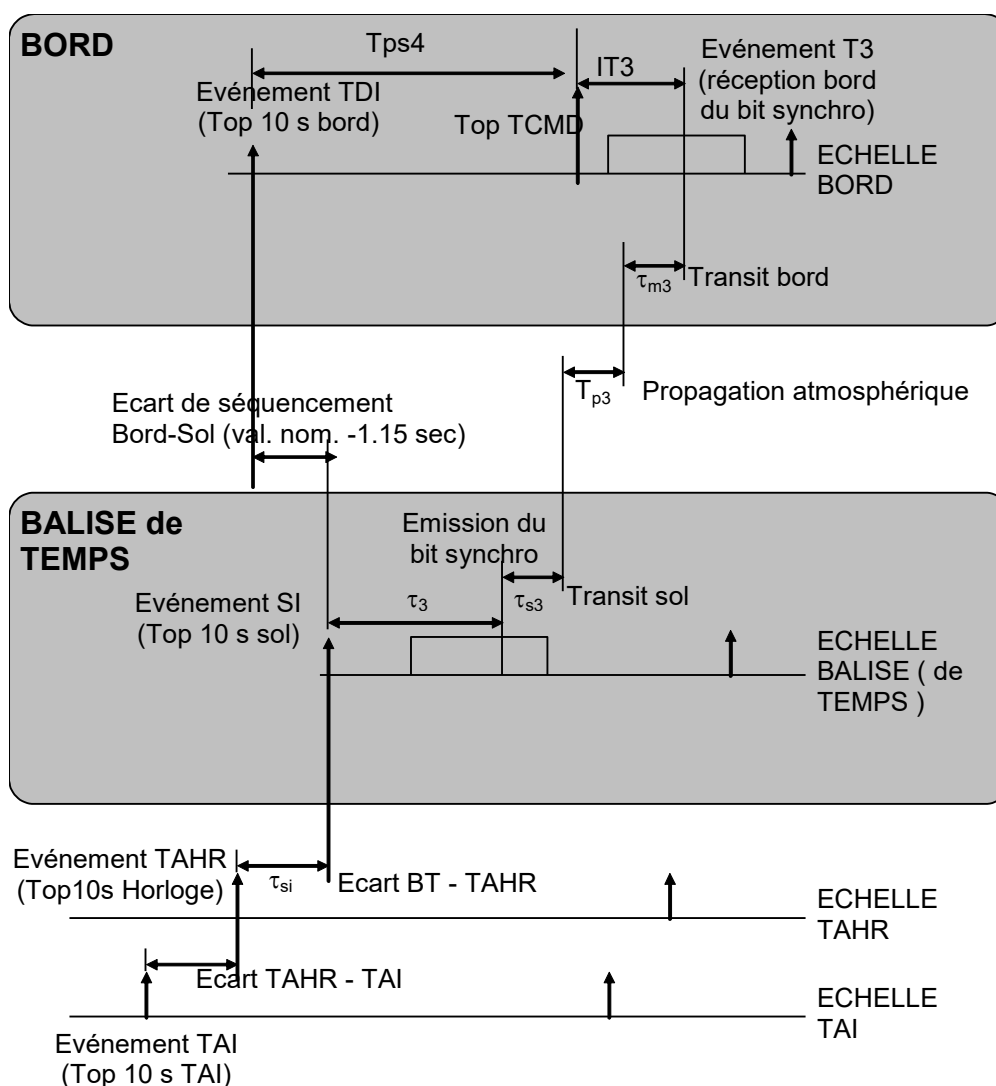


Figure 2 : Schéma détaillé de la mesure IT3

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 25/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

5.2 MODELISATION DE LA MESURE DE RATTACHEMENT EN TEMPS

La figure 1 montre que l'écart de temps TAI entre l'événement SI et l'événement T3 peut se calculer de deux façons :

$$\begin{aligned}
 TAI(SI, T3) &= TAI(\tau_3) + TAI(\tau_{s3}) + TAI(Tp3) + TAI(\tau_{m3}) \\
 &= TAI(\Delta T) + TAI(TDI, TCMD) + TAI(IT3)
 \end{aligned}$$

où :

- τ_3 est le délai d'émission du bit de synchronisation, dépendant du type de balise et du type de récepteur concerné. Sa valeur (dans l'échelle de temps SI de la balise) est spécifiée dans le document DR3, et rappelée en Fig. 1. Sa valeur en TAI se calcule d'après l'équation [A'] :

$$TAI(\tau_3) = SI(\tau_3) * \left(1 - \frac{\overline{\delta f_s(SI, EBS)}}{Fsol_{nom}} \right)$$

où EBS désigne l'événement « émission du bit de synchronisation ».

Le biais et la dérive de fréquence de la balise sont connus pour les balises de Temps (pour simplifier on suppose la fréquence constante pendant la séquence) : les récepteurs à partir de la génération DGM reçoivent cette information par les TCH Broadcast.

- τ_{s3} est le temps de transit sol. Valeur $\tau_{s3} = 0$ sur les deux voies pour les balises actuelles.
- $Tp3$ est par convention le temps de propagation entre le Centre de Phase de l'antenne sol et le Centre de Phase de l'antenne bord. Cette quantité varie au cours du passage du satellite au-dessus de la balise (avec un minimum au zénith de l'ordre de 3 à 4 millisecondes pour les orbites courantes) On trouvera des éléments pour sa modélisation dans le document DR2.
- τ_{m3} est le temps de transit bord pour le bit de synchronisation (voir ANNEXE 1).
- $TDi-Si$ est l'écart de séquençement bord-sol, valeur que l'on cherche à identifier ici (= $TAI(Tdi) - TAI(Si)$). Cette durée est maintenue en routine proche de -1.15 seconde pour les instruments de génération supérieure ou égale à 2.
- $TAI(TDI, TCMD)$ aussi noté $TAI(Tps4)$ sur les schémas précédents est égal, d'après l'équation [A'], à :

$$TAI(Tps4) = TOUS(Tps4) * \left(1 - \frac{\overline{\delta f_b(TDI, TCMD)}}{Fbord_{nom}} \right)$$

où $TOUS(Tps4)$ vaut par construction 3.0 secondes $TOUS$.

Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS

Le biais de fréquence bord est identifié par le traitement des mesures DORIS (on suppose la fréquence constante pendant la séquence)

- TAI(IT3) peut être calculé de manière similaire :

$$TAI(IT3) = TOUS(IT3) * \left(1 - \frac{\delta f_b(TCMD, T3)}{F_{bord_{nom}}} \right)$$

où TOUS(IT3) est la valeur mesurée par le récepteur DORIS (exprimée en secondes TOUS).

Là aussi, le biais de fréquence bord est identifié par le traitement des mesures DORIS (si on accepte de supposer la fréquence constante pendant la séquence).

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 27/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

6. LA CHAÎNE D'ÉLABORATION DES TCH BROADCAST DE TEMPS

6.1 FONCTION

Les Balises de Temps, comme on l'a vu dans le § 3.3, jouent le rôle de références de temps pour DORIS, au travers de la date TAI d'un bit qu'elles émettent.

Cependant, les horloges atomiques qui pilotent ces balises ne peuvent pas pour des raisons techniques être calées exactement sur le TAI. Les liaisons entre les horloges et les balises impliquent des délais de transmission qui s'ajoutent à cet écart de calage initial. De plus, la fréquence de ces horloges présente un biais qui, bien que faible ($< 10^{-12}$), induit une dérive de ce calage initial.

Si les mesures de phase (Doppler) étaient interprétées en ignorant le décalage entre le TAI et les Balises de Temps (dû aux marches des horloges de Référence, et aux temps de transit balise), c'est-à-dire en assimilant le Temps des Horloges de Référence au TAI, la datation finale des mesures serait entachée de cette erreur de calage.

Par exemple, pour la balise de Toulouse (BMT), en Septembre 2009 l'écart de datation entre l'horloge au Césium et la datation TAI était couramment de l'ordre de $10\mu s$ (depuis le Césium a été recalé) et le délai de transmission qui s'ajoute est de l'ordre de $17\mu s$; on arrivait au final à un écart entre la date d'un événement donnée dans l'échelle de temps SI de la balise de Toulouse, et sa date TAI réelle, de l'ordre de $27\mu s$.

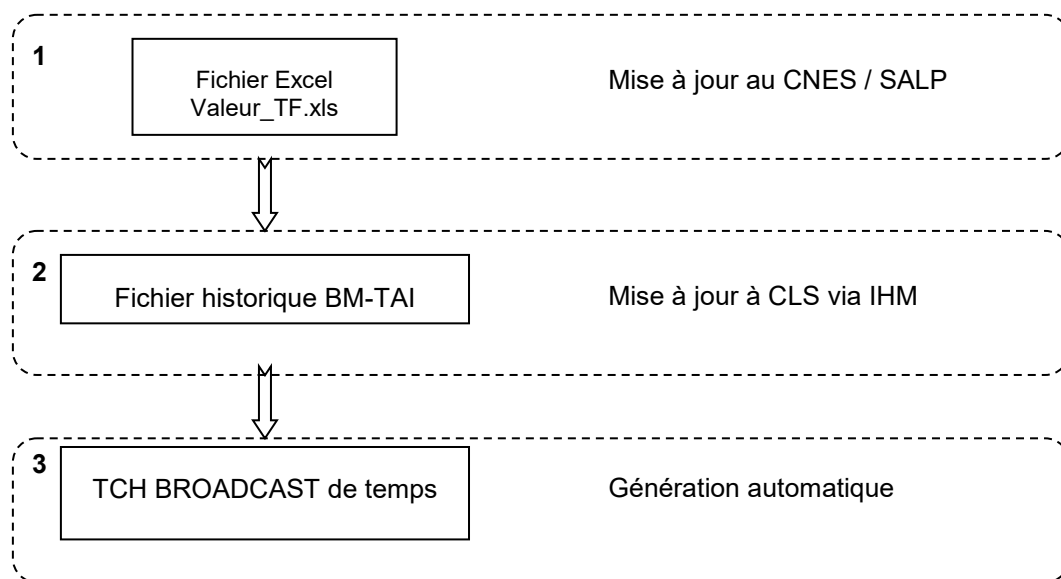
Négliger un retard de cet ordre de grandeur étant inacceptable, il est alors nécessaire de se donner les moyens de connaître dans l'ensemble du système DORIS les valeurs de calage des Balises de Temps, notamment à bord et en temps réel pour la navigation.

C'est pourquoi les informations de rattachement des échelles de temps SI des balises de Temps à l'échelle de temps TAI sont transmis aux récepteurs DORIS à l'aide des TCH BROADCASTS de Temps. Le format de ces TCH est décrit en DR3, c'est leur contenu qui est précisé ci-dessous.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 28/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

6.2 PROCESSUS DE GENERATION

Les TCH BROADCAST de Temps sont le résultat final d'un processus de génération qui se découpe en trois étapes :



A chacune de ces étapes, différents biais de datation et biais relatifs de fréquence sont identifiés.

Important :

- Les horloges des Balises-Maîtresses de Toulouse, de Kourou, d'Hartebeesthoek et de Papeete sont télé-surveillées grâce à un récepteur horaire.
- La Référence de Temps de la Balise-Maîtresse de Toulouse (BMT) se situe au laboratoire Temps – Fréquence du CNES Toulouse. Cette horloge participant à la génération du TAI, elle est surveillée par les experts de ce service, qui fournissent directement le calage de l'horloge par rapport au TAI.

Les informations en rapport avec le récepteur horaire ne sont donc pas présentes pour la BMT.

- Les horloges des balise de temps de YellowKnife et Terre Adélie ne sont pas télé-surveillées.

On note TAHR le Temps de l'Horloge de Référence de chaque Balise (dans le fichier Excel, cette quantité est notée TAC). Il y a autant d'échelles de temps TAHR que de Balises de Temps.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 29/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

6.3 PRECISION SUR LES CONVENTIONS DE SIGNE UTILISEES

Il est très important de noter que les conventions de signe utilisées dans les étapes 1 et 2 ci-dessus, sont exactement opposées à la convention prise dans le présent document, et dans les TCH Broadcasts de Temps.

Ainsi, avec les conventions du présent document, si l'événement EVT2 est postérieur à l'événement EVT1, on aura dans n'importe quelle base de temps BDT :

$$\text{BDT}(\text{EVT1}, \text{EVT2}) = \text{BDT}(\text{EVT2}) - \text{BDT}(\text{EVT1}) > 0$$

En particulier un retard instrumental (temps de transit) sera une durée positive.

On prêtera une grande attention au fait que dans les étapes « Fichier valeur_TF.xls » et « historique BM_TAI », les conventions de signe sont inverses et en particulier un retard de l'EVT2 par rapport à l'EVT1 se traduit par une valeur négative.

Ceci est dû au fait que les différentes bases de temps considérées sont suffisamment voisines pour s'autoriser des opérations entre des unités différentes mais très proches. En effet dans l'hypothèse ci-dessus : EVT2 postérieur à EVT1 et si on considère que ces événements sont des Tops qui caractérisent respectivement les BDT 1 et 2, au même instant I0, les dates de cet événement exprimées dans les deux échelles de temps seront telles que :

$$\text{BDT1}(\text{I0}) > \text{BDT2}(\text{I0})$$

Et si on s'autorise l'opération $\text{BDT2}(\text{I0}) - \text{BDT1}(\text{I0})$, on obtient le même résultat numérique que $\text{BDT2}(\text{EVT2}) - \text{BDT2}(\text{EVT1})$ ou encore que $\text{BDT1}(\text{EVT2}) - \text{BDT1}(\text{EVT1})$, mais avec un signe opposé.

Cette convention est couramment utilisée dans le domaine Temps/Fréquence pour comparer des échelles de temps proches.

6.4 ETAPE 1 : GENERATION DES FICHIERS BMTAI UNITAIRE

Les paragraphes suivants s'attachent uniquement à décrire les différentes méthodes de mise à jour du fichier BMTAI unitaire. La méthode à utiliser pour chaque BM/BT est indiquée dans le CR GECO.

6.4.1 GENERATION AUTOMATIQUE PAR L'OUTIL REG_BTEMPS (APPLICABLE UNIQUEMENT AUX BMS)

Ce fichier est mis à jour automatiquement par l'outil REG_BTEMPS sur la base des informations provenant de la télésurveillance des Balises Maîtresses.

L'outil détermine les valeurs des paramètres du fichier BMTAI unitaire de la manière suivante :

SI – TAHR : mise à jour avec la valeur donnée dans le fichier de configuration,

TAHR – TRH : mise à jour avec le résultat du calcul de l'outil : régression linéaire sur les valeurs de Btemps sur la période (paramétrable) prédéfinie en opération (1 semaine).

TRH – TAI : mise à jour avec la valeur donnée dans le fichier de configuration,

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 30/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

DERIVE : mise à jour avec le résultat du calcul de l'outil : régression linéaire sur les valeurs de Btemps sur la période (paramétrable) prédéfinie en opération (1 semaine).

Fichier de configuration :

Il contient 2 constantes : SI – TAHR ; TRH – TAI

Les valeurs de ces constantes se trouvent dans les dossiers de configuration de chaque BM.

6.4.2 GENERATION VIA LE FICHIER VALEUR_TF.XLS (APPLICABLE AUX BMS ET BT)

Ce fichier est mis à jour manuellement sur la base des informations provenant d'une mesure faite par le laboratoire Temps-Fréquence du CNES ou de la télésurveillance des Balises maîtresses ou de temps.

Il est également possible de le mettre à jour sur la base du résultat d'un traitement fin de datation sol (ZOOM ou Pandor/Mordor). Dans ce dernier cas, le contenu ci-dessous est réduit aux deux seules valeurs observées par PANDOR : Si-TAI, et dérive Si-TAI (voir par exemple le cas de YellowKnife, parag.6.4.6.3).

6.4.3 CONTENU

Ce fichier contient pour chaque Balise de Temps les informations suivantes :

SI – TAHR : retard du Top SI de la balise sur le Top 10 sec rondes de l'horloge de référence (c'est le délai de transition τ_{SI} de la Figure 2),

TAHR – TRH : écart entre le Top 1 sec de l'horloge de Référence et le Top 1 sec du récepteur horaire,

TRH – TAI : délai (retard) entre le Top 1 sec ronde TAI donné par le récepteur horaire et le Top 1 sec ronde TAI réel. Ce délai est calibré pour une longueur standard de câbles (entre le récepteur horaire et son antenne).

TAHR – TAI : écart entre le Top de l'horloge de Référence et le Top TAI, = 'TAHR–TRH' + 'TRH – TAI' pour la BMK, la BMH et la BMP,

SI – TAI : = 'SI – TAHR' + 'TAHR – TAI', écart entre le Top SI et le Top TAI,

Dérive TAHR – TRH : dérive de l'écart TAHR – TRH, calculée par rapport au point précédent. C'est également le biais moyen de fréquence sur la période considérée.

Dérive TAHR – TAI : applicable uniquement à la BMT, dérive de l'écart TAHR – TAI, mesuré depuis le dernier relevé.

Date_info : date à laquelle les informations ci-dessus sont valides.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 31/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

6.4.4 CONVENTIONS

Lorsque la mesure du récepteur horaire (Btemps) est effectuée à la sortie 1 Hz de la balise, elle représente directement la grandeur SI-TRH. Dans ce cas on choisit de positionner le paramètre SI-TAHR à 0 et TAHR-TRH égal à la mesure Btemps.

SI – TAHR : négatif (retard dû au délai de transition). Deux possibilités existent selon la configuration adoptée :

= 0 si le récepteur horaire est connecté en face avant de la Balise,

= A.D. entre -200 et 0 nanos si le récepteur horaire est connecté à l'horloge.

TAHR – TRH : négatif si le Top de l'horloge de Référence est en retard sur le Top du récepteur horaire, positif dans le cas contraire,

TRH – TAI : valeur fixe (en principe négative),

- mise à 0 dans le cas où les câbles (entre le récepteur horaire et son antenne) sont de longueur standard,
- égale à - 5 nanosecondes * (longueur de câble – longueur standard) sinon.

TAHR – TAI : négatif si le Top de l'horloge de Référence est en retard sur le Top TAI, positif dans le cas contraire,

SI – TAI : négatif si le Top SI est en retard sur le Top TAI, positif dans le cas contraire,

Dérive TAHR – TRH : Négative si la fréquence balise est inférieure à la fréquence nominale, positive dans le cas contraire.

Dérive TAHR – TAI, applicable BMT uniquement : Négative si la fréquence balise est inférieure à la fréquence nominale, positive dans le cas contraire.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 32/47
---	--	--

6.4.5 EXEMPLE DE FICHIER VALEUR_TF.XLS

GECO - VALEURS TEMPS/FREQUENCE DE RATTACHEMENT EN TEMPS DES BMs PAR RAPPORT AU TAI

Un temps retour de AD microsecondes est mesuré entre le TOP SI BMT et la laboratoire T/F. Une valeur moyenne (TOP SI - TOP Césium Toulouse) de -20,04 microsecondes est mesurée pour la 1.0 avant passage sur 3G le 20/11/2001 (délai plus court de 2,89 microsecondes pour la 3G). Le TOP SI est mesuré au niveau de la face avant des balises maîtresses. La différence entre le temps TAI et le temps GPS est maintenue inférieure à 100 ns, on prend TAI=GPS dans la pratique. Les valeurs données ci-après sont des différences entre des temps d'horloges modulo 1 seconde.

Code couleur

les cellules colorées correspondent aux valeurs à saisir au CCI dans le fichier BM_TAI

valeur générique

constante

variable

NB: les cellules non colorées correspondent à des résultats de calcul et ne sont pas à saisir au CCI

PARIS - Les Halles
SIÈGE
2, place Maurice Quentin
75039 Paris Cedex 01
☎ +33 (0)1 44 76 75 00

PARIS - Daumesnil
DIRECTION DES LANCEURS
52, rue Jacques Hillairet
75612 Paris Cedex
☎ +33 (0)1 80 97 71 11

TOULOUSE
CENTRE SPATIAL DE TOULOUSE
18, avenue Édouard Belin
31401 Toulouse Cedex 9
☎ +33 (0)5 61 27 31 31

GUYANE
CENTRE SPATIAL GUYANAIS
BP 726
97387 Kourou Cedex
☎ +594 (0)5 94 33 51 11

RCS Paris B 775 665 912
Siret 775 665 912 000 82
Code APE 731 Z
N° identification :
TVA FR 49 775 665 912

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 33/47
Titre :Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

Date Prise Info.	11/12/2006
------------------	------------

Temps système GPS-TAI					
Valeur générique applicable à toutes les balises	Valeur	Unité	Précision	Nouvelle Info (OUI/NON)	Date Info. TAI (jj/mm/aaaa hh:mm:ss)
GPS-TAI (<100 ns)	0,000E+00	s	± 1 ns	NON	NA (valeur par défaut)

BMT						
Différences Horloges	Valeur	Unité	Précision	Nouvelle Info (OUI/NON)	Date Info. TAI (jj/mm/aaaa hh:mm:ss)	Remise à Zéro Dérive
BMT Nominale 3G, N°CCD = 260						
TOP SI - TAC (Césium Toulouse)	-1,7150E-05	s	± 1 microsec	NON	29/11/2001 09:00:00	
TAC (Césium Toulouse) - TAI	-1,1450E-05	s	± 300 ns	OUI	11/12/2006 08:38:00	NON
TOP SI - TAI	-2,8600E-05	s		OUI	11/12/2006 08:38:00	
BMT Redondante 3G N°CCD = 259						
TOP SI - TAC (Césium Toulouse)	-1,7150E-05	s	± 1 microsec	NON	29/11/2001 09:00:00	
TAC (Césium Toulouse) - TAI	-1,1450E-05	s	± 300 ns	OUI	11/12/2006 08:38:00	NON
TOP SI - TAI	-2,8600E-05	s		OUI	11/12/2006 08:38:00	
Dérives Différences Horloges	Valeur	Unité	Précision	Nouvelle Info (OUI/NON)	Début Période (jj/mm/aaaa hh:mm:ss)	Fin Période (jj/mm/aaaa hh:mm:ss)
Dérive Cés. - TAI (mesuré depuis le dernier relevé)	-3,8073E-09	s/jour	± 10 ns/j	OUI	02/08/2004 08:00:00	11/12/2006 08:38:00

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 34/47
---	--	---

6.4.6 INFORMATIONS NECESSAIRES AU CENTRE DE MISSION DORIS POUR LE RATTACHEMENT DES BALISES DE TEMPS AU TEMPS TAI

Ce paragraphe a pour objectif d'expliquer comment sont remplis les différents champs des fichiers VALEUR_TF.xls, BM_TAI unitaire et Historique BM_TAI. On trouvera davantage de précisions dans le document DR4.

6.4.6.1 Rattachement des Balises reliées à une horloge télésurveillée par un récepteur horaire (Kourou, Hartebeesthoek, Papeete)

- SI – TAHR, TRH – TAI :

Ces valeurs sont fixes pour une configuration de la balise, elles sont mesurées à la mise en place de la balise, elles correspondent à des délais de transition dans les câbles de liaison.

- TAHR – TRH :

Dans le cas des Balises-Maîtresses de Kourou, d'Hartebeesthoek et de Papeete, le rattachement de l'horloge de Référence au TAI est suivi au moyen d'un récepteur horaire.

Ce récepteur donne une valeur (BTEMPS) de l'écart qu'il mesure entre son signal 1 Hz qui matérialise le TAI, et le Top de l'horloge de référence.

Au moyen d'un algorithme décrit et justifié dans DR4, cette valeur est transformée (automatiquement) pour donner la grandeur TAHR – TRH.

- TAHR – TAI, SI – TAI :

Ces valeurs sont obtenus par addition des valeurs précédentes.

- Dérive TAHR – TRH :

Cette valeur est obtenue simplement en faisant le rapport de la différence de la valeur de l'écart TAHR – TRH actuel et le précédent sur la durée écoulée entre les deux mises à jour.

Lors de l'installation d'une balise, ou après une coupure de l'horloge, aucune mesure précédente n'étant disponible, cette valeur est initialisée à 0.

6.4.6.2 Rattachement de la Balise-Maîtresse de Toulouse

- SI – TAHR, TRH – TAI :

Ces valeurs sont fixes pour une configuration de la BMT, elles sont mesurées à la mise en place de la BMT, elles correspondent à des délais de transition dans les câbles de liaison.



PARIS - Les Halles
SIÈGE
2, place Maurice Quentin
75039 Paris Cedex 01
☎ +33 (0)1 44 76 75 00

PARIS - Daumesnil
DIRECTION DES LANCEURS
52, rue Jacques Hillairet
75612 Paris Cedex
☎ +33 (0)1 80 97 71 11

TOULOUSE
CENTRE SPATIAL DE TOULOUSE
18, avenue Édouard Belin
31401 Toulouse Cedex 9
☎ +33 (0)5 61 27 31 31

GUYANE
CENTRE SPATIAL GUYANAIS
BP 726
97387 Kourou Cedex
☎ +594 (0)5 94 33 51 11

RCS Paris B 775 665 912
Siret 775 665 912 000 82
Code APE 731 Z
N° identification :
TVA FR 49 775 665 912

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 35/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

- TAHR – TAI, SI - TAI :

Dans le cas de la Balise-Maîtresse de Toulouse, le rattachement de l'horloge césium au TAI est fourni par le laboratoire T/F du CNES.

- Dérive TAHR – TRH :

Cette valeur est obtenue simplement en faisant le rapport de la différence de la valeur de l'écart TAHR – TRH actuel et le précédent sur la durée écoulée entre les deux mises à jour.

Lors de l'installation, aucune mesure précédente n'étant disponible, cette valeur est initialisée à 0.

6.4.6.3 Rattachement des Balises de Temps de Yellowknife et Terre Adélie

- SI – TAI , dérive Si - TAI

Cette valeur est ajustée en utilisant les résultats fournis par PANDOR, qui implémente la méthode des Broadcasts (voir parag. 7.4). Sur ces résultats, une régression linéaire est réalisée afin d'optimiser la modélisation par (biais, dérive sur un horizon de quelques semaines) et de réduire les bruits.

6.4.6.4 Surveillance et mise à jour des rattachements

Les TCH Broadcasts de Temps sont élaborés à une cadence hebdomadaire, à partir du contenu des fichiers BM_TAI.

Ceux-ci doivent être mis à jour :

- A chaque changement de calage d'une des horloges de Référence (recalage ou remise en route par exemple),
- Dès qu'un changement de la dérive long terme d'une des Références de Temps est constaté.

Les valeurs des rattachements des différentes Balises de Temps doivent être contrôlés très régulièrement, de façon hebdomadaire par un tracé du paramètre BTEMPS glissant sur les deux derniers mois.

Un changement brutal de calage de l'une des Balises de Temps peut être détecté par la surveillance de la datation bord Jason-1, un des outils de contrôle d'intégrité du système (cf parag. 7).

6.5 ETAPE 2 : FICHIERS HISTORIQUE BM TAI

Pour chaque Balise de Temps le segment sol maintient un fichier BM_TAI, qui contient l'historique des informations de calage du Top SI de la Balise par rapport au TAI.

Ce fichier est mis à jour :

- De façon « automatique » par utilisation, après acceptation en GECO, du fichier BMTAI unitaire produit au paragraphe 6.4.1
- Par l'exploitant SSALTO à chaque envoi par le CNES d'une nouvelle version des informations du fichier VALEUR_TF.xls.

Ce document est la propriété du CNES. Les informations contenues dans celui-ci ne peuvent être communiquées, publiées ou reproduites sans l'accord préalable du CNES.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 36/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

6.5.1 CONTENU

Pour chaque date « d'effet » ayant donné lieu à un relevé :

SI – TAHR : retard du Top SI de la balise sur le Top de l'horloge de référence (c'est le délai de transition τ_{SI} de la Figure 2),

TAHR – TRH : écart entre le Top de l'horloge de référence et le Top du récepteur horaire,

TRH – TAI : délai (retard) entre le Top 1 sec ronde TAI donné par le récepteur horaire et le Top 1 sec ronde TAI réel. Ce délai est calibré pour une longueur standard de câbles (entre le récepteur horaire et son antenne).

DERIVE : dérive de l'écart TAHR – TRH (voir parag. 6.4.1, même convention). Comme TRH – TAI = constante, la contribution de ce terme à la dérive est nulle. Donc la dérive TAHR-TAI est égale à celle de TAHR-TRH.

6.5.2 CONVENTIONS

Lorsque la mesure du récepteur horaire (Btemps) est effectuée à la sortie 1 Hz de la balise, elle représente directement la grandeur SI-TRH. Dans ce cas on choisit de positionner le paramètre SI-TAHR à 0 et TAHR-TRH égal à la mesure Btemps.

SI – TAHR : négatif (retard dû au délai de transition). Deux possibilités existent selon la configuration adoptée :

= 0 si le récepteur horaire est connecté en face avant de la Balise,

= A.D. entre -200 et 0 nanos si le récepteur horaire est connecté à l'horloge.

TAHR – TRH : négatif si le top de l'horloge de référence est en retard sur le top du récepteur horaire, positif dans le cas contraire,

TRH – TAI : valeur fixe (en principe négative),

- mise à 0 dans le cas où les câbles (entre le récepteur horaire et son antenne) sont de longueur standard,
- égale à - 5 nanosecondes * (longueur de câble – longueur standard) sinon.

DERIVE : Négative si la fréquence balise est inférieure à la fréquence nominale, positive dans le cas contraire.

6.6 CONTENUS DES TCH BROADCAST DE TEMPS

Les TCH BROADCASTS de temps sont générés automatiquement une fois par semaine, sur la base des données contenues dans le fichier BM_TAI.

Ils sont ensuite envoyés aux satellites grâce aux Balises de Téléchargement (actuellement, les Balises Maîtresses, voir DR5).

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 37/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

6.6.1 CONTENU

On ne donne ici que la description des données intervenant dans le calcul de la correspondance TOUS – TAI, le format et le contenu complet de ce TCH est décrit dans le document DR2.

BIAIS_T_BALISE : délai entre les Tops Si Balise et les Tops 10 sec rondes TAI,

BIAIS_F_BALISE : (l'opposé du) biais relatif de fréquence balise (par rapport à la fréquence nominale),

DERIVE_F_BALISE : (l'opposé de la) dérive de fréquence balise (par rapport à la fréquence nominale).

6.6.2 CONVENTIONS

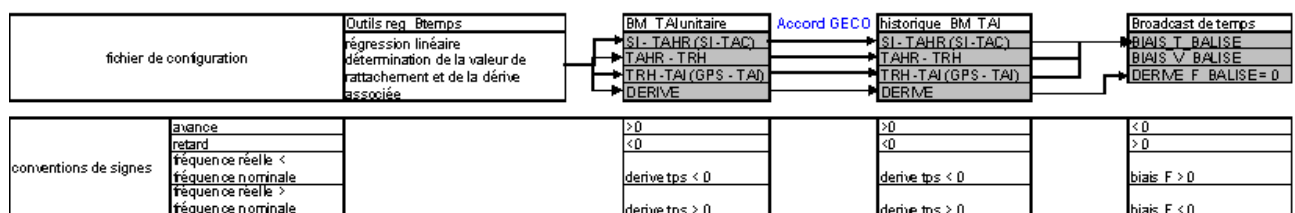
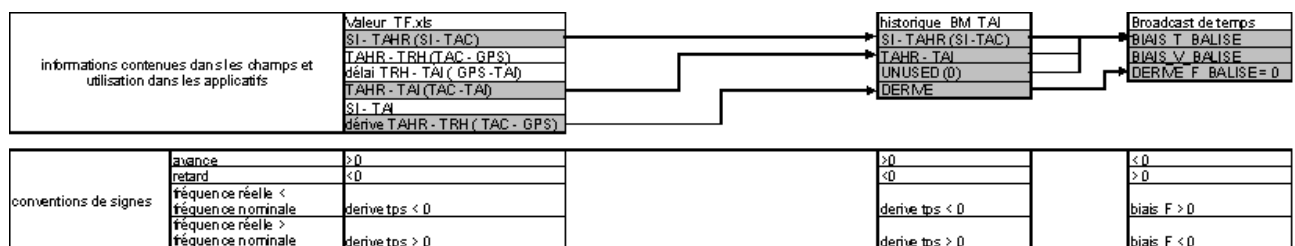
BIAIS_T_BALISE : Négatif si le temps balise est en avance sur le TAI, c'est-à-dire si l'événement Top SI est antérieur à l'événement Top 10s TAI, positif dans le cas contraire.

BIAIS_F_BALISE : Négatif si la fréquence balise est supérieure à la fréquence nominale (c'est l'opposé du biais relatif de fréquence), positif dans le cas contraire.

DERIVE_F_BALISE : mis à 0 : la dérive de fréquence des horloges actuelle est négligeable vis-à-vis de la précision requise ; si tel n'était pas le cas, on noterait ici (l'opposé de) la dérive de fréquence.

6.7 SCHEMA RESUME

Les données exploitées à chaque étape et leur convention de signe peuvent se résumer, selon les deux options (fichier Valeur_TF ou outil REG BTEMPs) comme suit :



	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 38/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

7. MOYENS DE SURVEILLANCE

En routine, la maîtrise de la correspondance TOUS / TAI est nécessaire (voir parag. 4.4) :

- Au maintien de la synchronisation bord-sol,
- A la datation des mesures de phase (Doppler),
- A la fonction bord « dateur ».

La datation des mesures de phase (Doppler) DORIS est utilisée pour la génération de plusieurs produits bord (bulletins dateurs, bulletins Navigateur) et sol (mesures altimétriques, imagerie, orbites précises DORIS).

La qualité finale de ces produits impose une certaine qualité de leur datation dans l'échelle TAI. Il est donc nécessaire de surveiller que la correspondance TOUS/TAI est fournie avec la précision requise.

7.1 SURVEILLANCE DE LA DATATION BORD JASON-1

L'un des outils de surveillance de l'intégrité du système DORIS est la comparaison avec les dates d'un récepteur GPS embarqué sur le même satellite qu'un récepteur DORIS, au travers des bulletins DORIS « dateurs ». Cette fonctionnalité n'existe aujourd'hui que sur Jason-1, qui possède à la fois un récepteur DORIS et un récepteur GPS.

La comparaison directe de dates DORIS-GPS est un traitement sol inclus dans la chaîne de suivi Système DORIS. On utilise le Bulletin Dateur DORIS, qui est la datation par le récepteur DORIS d'un TOP pps donné avec sa date TUC par le récepteur GPS à bord de Jason-1. Les deux dates (TAI DORIS et TUC GPS) de ce même Top sont donc transmises dans la télémesure, via le bulletin dateur.

L'écart TUC – TAI étant un nombre de secondes entières connu, on compare la date TAI DORIS du top PPS à sa date donnée par le récepteur GPS plateforme.

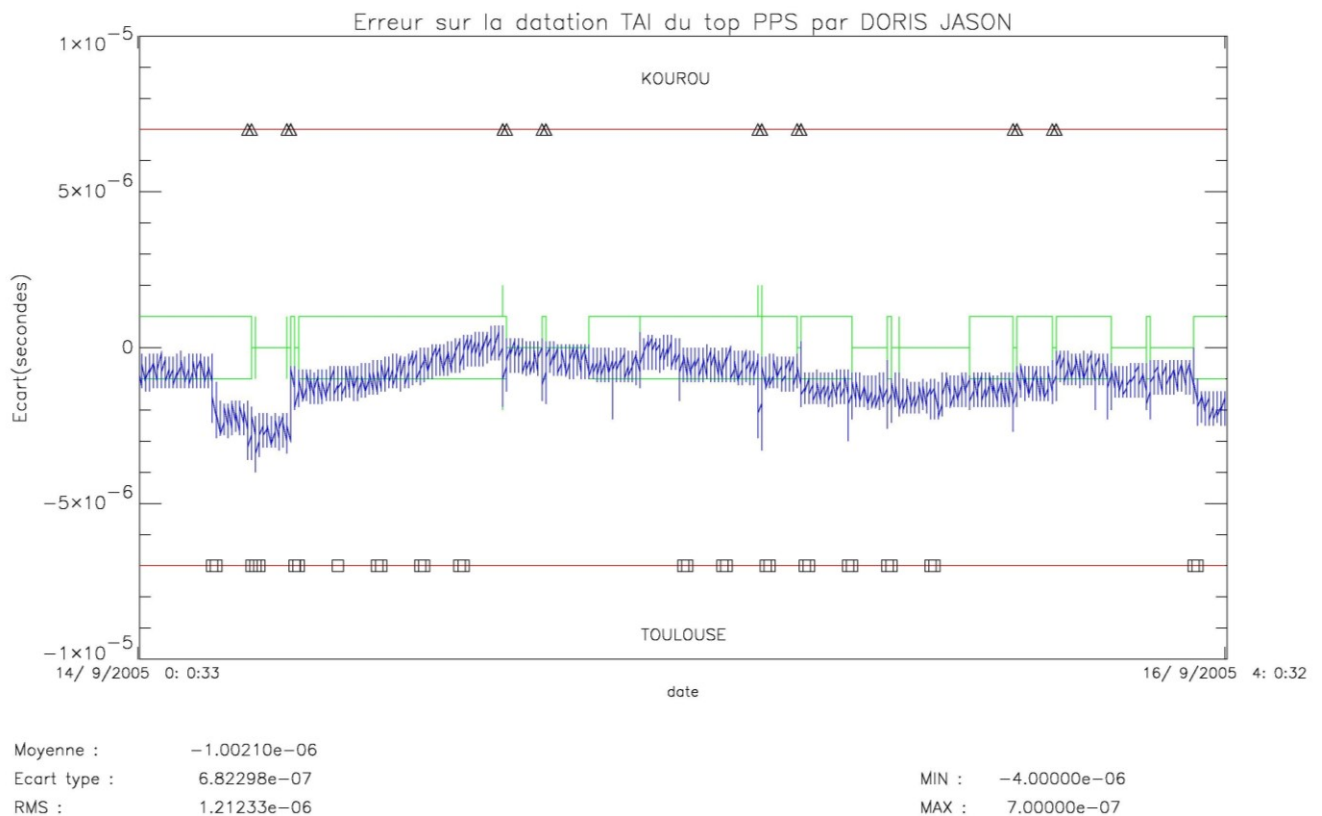
Cette surveillance passe outre les « anomalies » causées par le récepteur GPS :

- jitter de 1 microseconde dû à la conception du recalage du top 1 pps fourni par le récepteur sur le temps GPS,
- sauts du Top pps ou de sa datation GPS,

Dans la mesure où elles sont décorréliées des anomalies surveillées dans la datation DORIS. Celles-ci se caractérisent en effet soit par une dérive entre deux visibilité de Balises de Temps, soit par un saut sur une visibilité.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 39/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

Cet écart est suivi graphiquement au moyen de l'outil « suivi système DORIS » :



Courbe de surveillance de la datation Doris / Jason-1

Les écarts entre les deux échelles de temps (DORIS et GPS) sont typiquement de l'ordre de la microseconde (1,2 microsecondes RMS) comme c'est le cas sur ce tracé.

7.2 SURVEILLANCE DE LA DATATION BORD JASON-2

Idem

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 40/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

7.3 CALIBRATION DORIS-LASER

En l'absence du moyen ci-dessus (comme c'était le cas par exemple avant le lancement de Jason-1), on peut utiliser une calibration DORIS-Laser, sur les satellites équipés de réflecteur Laser.

Le traitement simultané de mesures DORIS et de mesures Laser dans une même restitution d'orbite permet en effet d'identifier un éventuel systématisme tangentiel entre les deux systèmes de mesure, dont l'origine peut être une erreur de datation des mesures.

Ce traitement est possible en routine sur les missions altimétriques qui disposent également d'un système de poursuite Laser. Cependant, un tel système implique l'utilisation d'un programme d'orbitographie précise et deux fonctions de mesures (DORIS et Satellite Laser Ranging), dont le paramétrage global est complexe.

7.4 VERIFICATION DE LA COHERENCE INTERNE

Les traitements Pandor implémentent la méthode « des Broadcasts », dont le principe est le suivant :

- Les traitement des mesures de rattachement en temps (IT3) de tous les récepteurs permet d'identifier les calages relatifs de chacune des balises (de 3^{ème} génération),
- La connaissance du calage absolu de l'une de ces Balises permet d'en déduire le calage absolu de l'ensemble de ces balises. On utilise pour cela les relevés périodiques sur la Balise de Toulouse, effectués par le labo T/F du CNES.

Ce traitement est effectué tous les jours, sur un horizon de quatre jours glissants. Les valeurs sont ajustées à la date de l'avant-veille (si les dernières données sont celles du jour). Il est nécessaire de les filtrer par une régression linéaire, pour

- Réduire les bruits de calcul,
- Minimiser l'effet de concavité, ou tout autre effet de modèle, possible mais non pris en compte dans les Broadcasts

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 41/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

ANNEXE 1 : TEMPS DE TRANSIT BORD DU BIT DE SYNCHRONISATION

In theory, τ_{m3} is a function of the Doppler shift, of the level received and of the temperature of the MVR. In practice, only the first effect is to be taken into account. The other two effects are measured by the manufacturer and are sufficiently low to be neglected.

We thus apply the following simplified formula:

$$\tau_{m3} = \tau_{m3_0} + \alpha * (F_d - DF) / F_0$$

in which :

τ_{m3_0} , the vacuum transit time, at f_0 , at the reference reception level (- 113 dBm), at 20°C, is a constant given in the Calibration Plan of each specific receiver,

$F_d = \Delta\Phi / TC$ where TC is the counting time in on-board time,

F_0 : théoretical central frequency on the considered channel,

DF : beacon frequency shift on the considered channel,

NB:

At the central frequency (null Doppler) an aberrant time-tagging (with an error of a few tens of microseconds) may occur.

The sensitivity to the Doppler shift has been stated in DR10.

The values of the coefficient for different satellites can be found in the Calibration Plan of each specific receiver. DR9 is the generic DORIS Calibration Plan.

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 42/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

ANNEXE 2 : LES LIMITES DU SEQUENCEMENT DORIS

(présentation faite en Groupe Performances DORIS le 11/06/2008)

DEFINITIONS :

- Top TAI : date TAI du top de séquençement toutes les 10s
- Top SI : Top balise généré toutes les 10s (s OUS balise)
- Top Tdi : top instrument généré toutes les 10s (s OUS bord)
- dtd : date de début d'émission du message (à partir du top SI)
- ltd : date de début de réception du message (à partir du top Tdi)
- dtf : date de fin d'émission du message (à partir du top SI)
- ltf : date de fin de réception du message (à partir du top Tdi)
- T3 : date d'émission de l'événement (début ou fin du mot de synchronisation 0A6F du message balise), à partir du top SI
- IT3 : date de réception de l'événement (début ou fin du mot de synchronisation 0A6F du message balise), à partir du top Tdi
- τ_p : temps de propagation du signal :
 - $\tau_{p_min} = 0.011s$ (altitude de 790km, ENVISAT)
 - $\tau_{p_max} = 0.015s$ (altitude de 1343km, Jason)
- $\Delta T_{si} = \text{Top TAI} - \text{Top SI}$: désynchronisation de la balise
- $\Delta T_{di} = \text{Top TAI} - \text{Top Tdi}$: décalage du Top Tdi / Top TAI (spécifié pour chaque instrument) ; donné à $\pm 50ms$, il varie entre :
 - $\Delta T_{di_min} = \Delta T_{di} + 50ms$
 - $\Delta T_{di_max} = \Delta T_{di} + 50ms$
- θ_1 : instant d'ouverture de la fenêtre de comptage pour les instruments 1G (à partir du Top Tdi)
- θ_2 : instant de fermeture de la fenêtre de comptage (à partir du Top Tdi)
- TCMD : top de début de comptage (à partir du Top Tdi), applicable aux instruments 2G, 2GM, 2GXX

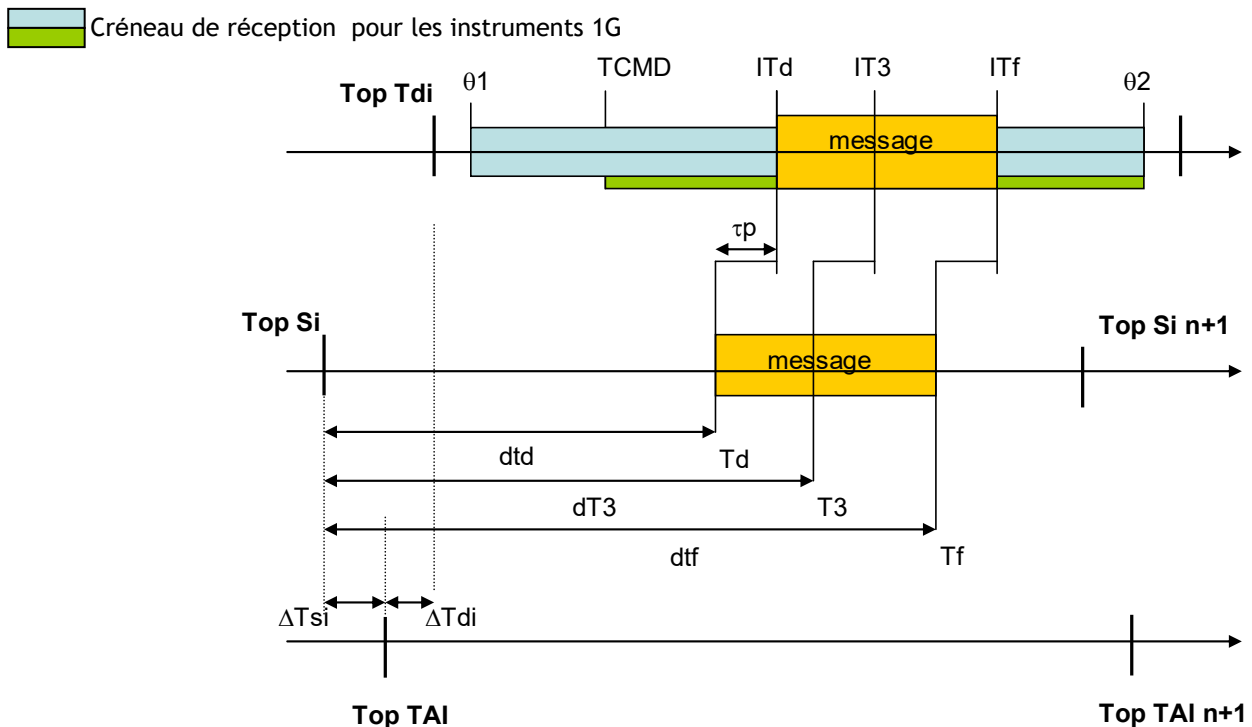
Objectif : recevoir le message balise pour pouvoir identifier la balise.

Le message balise doit arriver dans un créneau pour lequel l'instrument pourra le recevoir en entier : [Binf ; Bsup]

Ce document est la propriété du CNES. Les informations contenues dans celui-ci ne peuvent être communiquées, publiées ou reproduites sans l'accord préalable du CNES.

Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS

CALCUL DES VALEURS LIMITEES DE DESYNCHRONISATION BALISE // RECEPTION DU MESSAGE



LIMITES INFÉRIEURE : BINF

Le message doit arriver :

- après θ_1 après le Top Tdi pour les instruments 1G
- après TCMD après le Top Tdi pour les instruments 2G, 2GM, 2GXX

instrument 1G : $ITd > TOP TDi + \theta_1$

$$ITd = Top TAI + \Delta Tsi + dtd + \tau_p$$

$$Top TDi = Top TAI + \Delta Tdi$$

Cas dimensionnant pour cette contrainte : $\Delta Tdi = \Delta Tdi_{max}$ et $\tau_p = \tau_{p_min}$

$$\Rightarrow Top TAI + \Delta Tsi + dtd + \tau_{p_min} < Top TAI + \Delta Tdi_{max} + \theta_1$$

$$\Rightarrow \Delta Tsi > \Delta Tdi_{max} + \theta_1 - dtd - \tau_{p_min}$$

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 44/47
Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

instrument 2G, 2GM, 2GXX : ITd > TOP TDi + TCMD

$$ITd = \text{Top TAI} + \Delta T_{si} + dtd + \tau_p$$

$$\text{Top TDi} = \text{Top TAI} + \Delta T_{di}$$

Cas dimensionnant pour cette contrainte : $\Delta T_{di} = \Delta T_{di_max}$ et $\tau_p = \tau_{p_min}$

$$\Rightarrow \text{Top TAI} + \Delta T_{si} + dtd + \tau_{p_min} < \text{Top TAI} + \Delta T_{di_max} + TCMD$$

$$\Rightarrow \Delta T_{si} > \Delta T_{di_max} + TCMD - dtd - \tau_{p_min}$$

LIMITE SUPERIEURE : BSUP

Le message doit arriver avant θ_2 après le Top Tdi :

$$ITf < \text{Top Tdi} + \theta_2$$

$$ITf = \text{Top TAI} + \Delta T_{si} + dtf + \tau_p$$

$$\text{Top TDi} = \text{Top TAI} + \Delta T_{di}$$

Cas dimensionnant pour cette contrainte :

$$\Delta T_{di} = \Delta T_{di_min} \text{ et } \tau_p = \tau_{p_max}$$

$$\Rightarrow \text{Top TAI} + \Delta T_{si} + dtf + \tau_{p_max} < \text{Top TAI} + \Delta T_{di_min} + \theta_2$$

$$\Rightarrow \Delta T_{si} < \theta_2 + \Delta T_{di_min} - dtf - \tau_{p_max}$$

Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS

balise d'orbitographie	instrument	ΔT_{di_min}	$\Delta \tau_{di}$	ΔT_{di_max}	dtd/ Top SI	dtf/ Top SI	τ_{p_min}	τ_{p_max}	θ_1	θ_2	TCMD	valeur minimum du décalage Si / TAI (Δt_{Si} min)	valeur maximum du décalage Si / TAI (Δt_{Si} max)
Voie 400MHz	1G Spot2	-0.05	0	0.05	4.7	5.7	0.011	0.015	0.85	9.85		-3.811	4.085
	1G Spot4	0.95	1	1.05	4.7	5.7	0.011	0.015	0.85	7.85		-2.811	3.085
	2G,2GM,	-1.2	-1.2	-1.1	4.7	5.7	0.011	0.015	3	10	3	-2.811	3.085
	DGXX	-1.2	-1.2	-1.1	4.7	5.7	0.011	0.015	3	10	3	-2.811	3.085
Voie 2GHz	1G	pas de réception sur cette voie											
	1G												
	2G,2GM,	-1.2	-1.2	-1.1	4.7	6.02	0.011	0.015	3	10	3	-2.811	2.765
	DGXX	-1.2	-1.2	-1.1	4.7	6.02	0.011	0.015	3	10	3	-2.811	2.765

EXEMPLE : FUTUNA décalée de + 2.74 sec (en Septembre 2008)

Reçue sur tous les récepteurs

Balise maîtresse	instrument	ΔT_{di_min}	$\Delta \tau_{di}$	ΔT_{di_max}	dtd/ Top SI	dtf/ Top SI	τ_{p_min}	τ_{p_max}	θ_1	θ_2	TCMD	valeur minimum du décalage Si / TAI (Δt_{Si} min)	valeur maximum du décalage Si / TAI (Δt_{Si} max)
Voie 400MHz	1G Spot2	-0.05	0	0.05	2.1	3.1	0.011	0.015	0.85	9.85		-1.211	6.685
	1G Spot4	0.95	1	1.05	2.1	3.1	0.011	0.015	0.85	7.85		-0.211	5.685
	2G,2GM,	-1.2	-1.2	-1.1	2.1	3.1	0.011	0.015	3	10	3	-0.211	5.685
	DGXX	-1.2	-1.2	-1.1	2.1	3.1	0.011	0.015	3	10	3	-0.211	5.685
Voie 2GHz	1G	pas de réception sur cette voie											
	1G												
	2G,2GM,	-1.2	-1.2	-1.1	2.1	3.42	0.011	0.015	3	10	3	-0.211	5.365
	DGXX	-1.2	-1.2	-1.1	2.1	3.42	0.011	0.015	3	10	3	-0.211	5.365

EXEMPLE : TOULOUSE décalée de -1 seconde, sans passage en RS=1 (en Avril/Mai 2008)

Plus reçue sur SPOT4 ENVISAT Jason-1 SPOT5 etc

Toujours reçue sur SPOT2

	DIFFUSION LIMITEE DORIS 	Référence : CO-DJ-D0-EA-15777-CN Version : 0.7 Date : 10/09/2019 Page : 46/47
Titre :Principes de la synchronisation et de la datation DORIS		

ANNEXE 3 : LE SEQUENCEMENT INTERNE DU RECEPTEUR DORIS DGXX

(voir pièce jointe « datation_interne_recepteur_DGXX.JPG.15777.A3.ppt »)

Titre : Principes de la synchronisation et de la datation DORIS

DIFFUSION

Diffusion Interne

MANFREDI Cécile	DSO/OT /DOR
JAYLES Christian	DSO/OT /DOR
BUZON Pierre	DSO/OT /DOR
BENEZETH Jean-Michel	LOGIQUAL – DSO/AQ
DUMOND Olivier	DSO/OT /DOR
CHAUVEAU Jean-Pierre	CLS - DSO/OT
DUTREY Jean-François	DSO/OT /DOR
FERRAGE Pascale	DSO/OT/TA
GUERRY Agnès	DNO/OT/OC
GUINLE Thierry	DNO/OT/OC
HOURY Sabine	DSO/DV/OR
MERCIER Flavien	DSO/DV/OR
VIVIES Michel	CLS - DSO/OT

(dernière page du document)

