

LISACode

version 1.4.4

Un simulateur scientifique de LISA

Manuel utilisateur

Antoine Petiteau
(LISA France)

December 29, 2008

Contents

1	Introduction	5
2	Description du Code	5
3	Installation	8
3.1	Système requis	8
3.2	Sous Unix, Linux, Mac OS X	8
3.2.1	Installation	8
3.2.2	Option d'installation	10
3.2.3	Test de fonctionnement	10
3.3	Sous Windows	11
3.3.1	Installation	11
3.3.2	Test de fonctionnement	11
4	Utilisation de LISACode	12
4.1	Exécution du simulateur et des deux programmes annexes	12
5	Fichier de configuration	13
5.1	Généralités	13
5.2	Configuration par fichier ASCII	16
5.2.1	Configuration des temps	16
5.2.2	Configuration de l'interpolation	17
5.2.3	Approximation des retards dans l'application de TDI	17
5.2.4	Configuration des orbites et du temps de parcours	18
5.2.5	Configuration du detecteur	19
5.2.6	Configuration des fichiers de sorties	20
5.2.7	Configuration des ondes gravitationnelles	21
5.2.8	Configuration des bruits	25
5.2.9	Configuration des USOs	28
5.2.10	Configuration de TDI	28
5.3	Configuration par fichier XML	30
6	Problèmes connus	31
6.1	Installation	31
6.1.1	Erreur lors de l'installation	31
6.2	Fichier de configuration	31
6.2.1	Problème dans la lecture du fichier de configuration :	31

7 Support - Contact	31
7.1 A l'APC (AstroParticule et Cosmologie)	31
7.2 A l'AEI (Albert Einstein Institute)	31

1 Introduction

Ce document fournit une description du logiciel LISACode. LISACode simule le détecteur d'ondes gravitationnelles LISA. Il ne simule pas le détecteur dans le détail mais utilise les fonctions de réponse des principaux composants, notamment pour introduire le niveau de bruit dans la réponse du détecteur. Il comprend également une implementation de la technique TDI (*Time Delay Interferometry*) qui permet de réduire considérablement le bruit laser.

Les principales entrées et sorties de LISACode sont des séquences temporelles qui seront, en entrée, les contraintes des ondes gravitationnelles (OG) en fonction du temps et, en sortie, les réponse des phasemètres en fonction du temps et les résultats de leur traitement par les générateurs TDI.

Un certains nombres de forme d'OG peuvent être définies mais il est également possible d'utiliser le code en conjonction avec des simulateurs d'OG plus sophistiqué via des fichiers de données intermédiaires.

Ce documents décrit, dans la section 2, la structure du code, dans la section 3, l'installation et dans la section 4, l'utilisation de LISACode. La section 5 décrit le fichier de configuration ainsi que les différents paramètres qui configurent une simulation.

2 Description du Code

Ce simulateur est écrit en C++ de façon à utiliser la modularité de la programmation objet. La structure principale du code est illustré sur la figure 1. Cette structure comprend les principaux composants du détecteur LISA ainsi que les entrées physiques.

Il y a 9 modules :

- *Outils_Maths* : Objets utilisés comme outils par le programme : vecteurs, filtres, ...
- *Ondes_Gravit* : Modélisation **OG** (monochromatique, binaire, quelconque).
- *Orbitographie* : Modélisation des orbites des satellites.
- *Bruits* : Modélisation des bruits (bruit blanc, bruit filtré et bruit lu dans un fichier).
- *USO_Temps* : Modélisation des horloges ultra-stables.
- *Memoire* : Gestion des mémoires pour les sorties de chaque satellite.
- *Input_Data* : Lecture du fichier de configuration du simulateur.

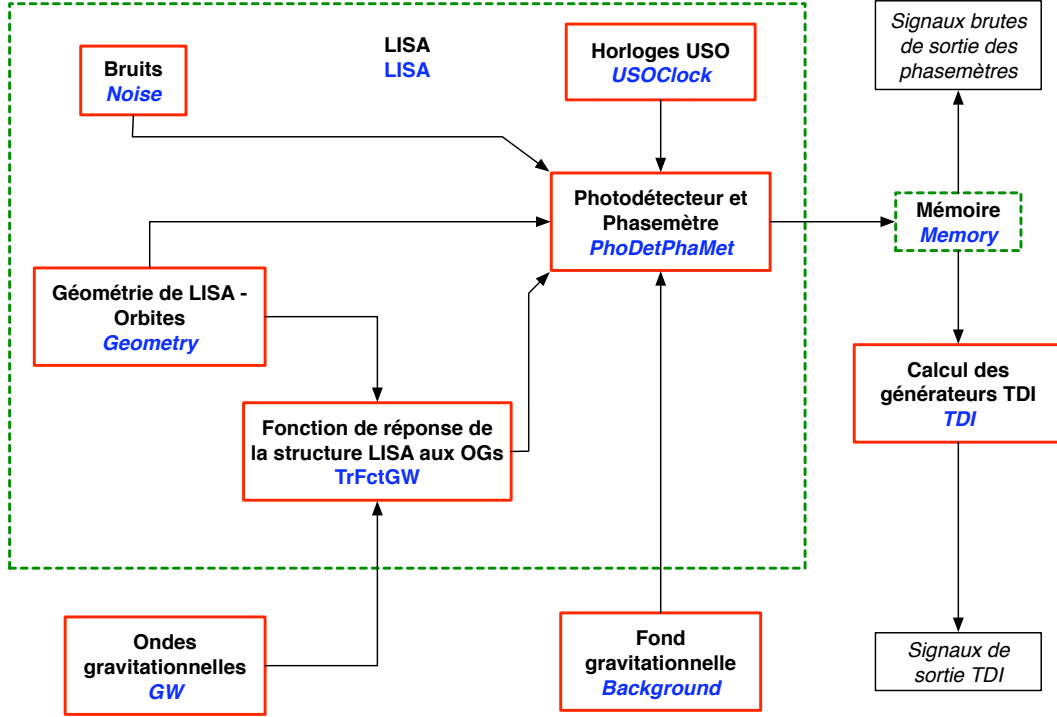


Figure 1: Structure du simulateur LISACode. Les boîtes rouge représentent les modules principaux et les boîtes en vert les modules d'interface. Le nom générique des modules est en bleu.

- *Detecteur* : Modelisation du détecteur LISA : Réponse des bras aux ondes gravitationnelles, fonction de réponse du phasemètre, interface et avancement temporel.
- *TDI* : Application des générateur TDI.

La figure 2 montre l'organisation des bibliothèques utilisées par LISACode.

La première entrée est les OG. Elles peuvent être définie en interne grâce à différents modèles qui produisent des signaux issues de sources monochromatiques, de système binaires avec une fréquence fixée ou de système binaire calculé dans l'approximation Post-Newtonienne (1 or 2.5 PN). L'OG peut également être entré via une séquence temporelle qui provient par exemple de code de simulation plus sophistiqué.

Les orbites de LISA sont générés en interne par le code. Ils correspondent à des orbites réalistes qui prennent en compte tant la respiration et la rotation de LISA que le mouvement autour du Soleil. Les paramètres de ces orbites peuvent être ajustées pour modifier la distance moyenne entre satellites ($5 \times 10^9 m$ nominale) ou pour fixer LISA à une certaine position. La position initial peut aussi être définie en entrée.

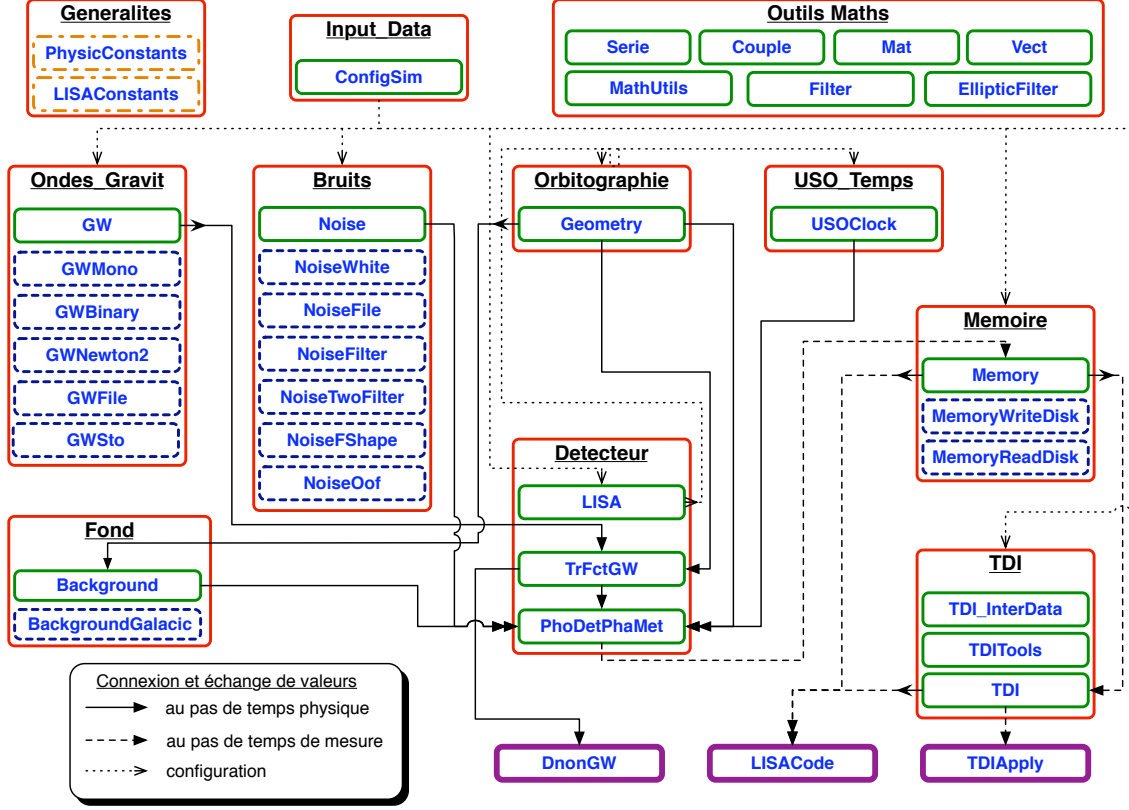


Figure 2: Organisation et dépendance des bibliothèques du simulateur. Les cadres en vert représentent les objets, en rouge les bibliothèques et en violet, les executables.

Un ingrédient important de la réponse de LISA et par conséquent des codes est la spécification de bruits de différente nature. Cela inclut le bruit optique du au *shot noise* aux éléments décrits dans le tableau 1. Le bruit des masses inertielles et le bruit laser peuvent aussi être définis en entrée. Normalement, ces bruits sont définis comme des bruits blancs dans une bande fréquentielle définie mais différentes formes peuvent être utilisées.

La réponse de LISA à des OGs est calculée en utilisant les orbites et la fluctuation relative de fréquence résultante (unités de $\frac{\Delta\nu}{\nu}$) est en entrée du Module Phasemètre. Celle-ci est combiné avec les différentes contribution de bruits pour produire le signal primaire des phasemètres qui est ensuite filtré par un filtre elliptique. Ce filtre est un filtre passe-bas qui coupe les fréquences à la moitié de la fréquence de mesure pour éliminer le repliement de spectre. Dans un cas standard, le signal primaire est à 0.5 Hz et la sortie, après filtrage, à 1 Hz.

Ce signal peut-être sauvegardé dans un fichier et/ou traité par le module TDI en utilisant les combinaisons TDI définis en entrée. Une description détaillée des générateur TDI

Table 1: Budget des erreurs basé sur le tableau 4.1 du [6]. La quatrième colonne donne les erreurs par défaut utilisées dans LISACode. Ces valeurs peuvent être modifiées par l'utilisateur. La dépendance fréquentielle de ces bruits est discutée dans 5.2.8

Source d'erreur	Erreur	LISACode	Entré LISACode (unité de $\frac{\delta\nu}{\nu}$)
Bruit de mesure			
Shot noise	$11 \times 10^{-12}\text{m.Hz}^{-\frac{1}{2}}$	11	$2.3 \times 10^{-19} \left(\frac{f}{1Hz} \right) \left(\frac{L}{5 \times 10^9\text{m}} \right) \sqrt{\frac{1W}{P}} . Hz^{-\frac{1}{2}}$
USO	$5 \times 10^{-12}\text{m.Hz}^{-\frac{1}{2}}$	16.5	$3.49 \times 10^{-19} \left(\frac{f}{1Hz} \right) . Hz^{-\frac{1}{2}}$
bruit résiduel du laser	$5 \times 10^{-12}\text{m.Hz}^{-\frac{1}{2}}$		
Instabilité du pointage	$10 \times 10^{-12}\text{m.Hz}^{-\frac{1}{2}}$		
Mesure de phase et offset	$5 \times 10^{-12}\text{m.Hz}^{-\frac{1}{2}}$		
Effet de lumière diffusée	$5 \times 10^{-12}\text{m.Hz}^{-\frac{1}{2}}$		
Autres effets	$8.5 \times 10^{-12}\text{m.Hz}^{-\frac{1}{2}}$		
Bruits d'accélération			
Bruit des masses inertielles	$3 \times 10^{-15}\text{m.s}^{-2} . \text{Hz}^{-\frac{1}{2}}$	3	$1.59 \times 10^{-24} \left(\frac{1Hz}{f} \right) . Hz^{-\frac{1}{2}}$

est donné par [13] et [15].

La description du code ci-dessus est seulement un bref résumé de ses capacités.

3 Installation

3.1 Système requis

Ce programme peut s'installer sur un système UNIX standard disposant d'un compilateur C++.

Il existe également un exécutable sous Windows (testé uniquement sous Windows XP).

3.2 Sous Unix, Linux, Mac OS X

3.2.1 Installation

L'installation se fait de la même manière qu'un programme "standard" sous UNIX. Les instructions à suivre sont les suivantes :

1. Télécharger le fichier lisacode-1.4.4.tar.gz
(sur le web : <http://www.apc.univ-paris7.fr/Downloads/lisa/LISACode/>)

et déplacer le fichier dans le répertoire (*MyDirectory* dans l'exemple) où vous souhaitez installer LISACode.

2. Décompresser la fichier :

```
tar xvzf lisacode-1.4.4.tar.gz
```

3. Aller dans le répertoire *LISA_Sim_Tdi* :

```
cd MyDirectory/lisacode-1.4.4
```

4. Exécuter le script de configuration, *configure*, pour créer les *makefile*, en tapant :

```
./configure
```

Il est possible d'ajouter des options de compilation et de spécifier le répertoire où les exécutable seront installés (voir la partie 3.2.2 ou le fichier *INSTALL* pour plus d'informations sur ces deux points techniques).

5. Exécuter le *makefile* pour compiler le code :

```
make
```

6. Si vous souhaitez installer le simulateur avec les exécutables de votre machine ou dans le répertoire spécifié, utilisez la commande :

```
make install
```

Si le programme s'est installé normalement, 3 exécutables se trouvent dans un répertoire *MyDirectory/lisacode-1.4.4/Main/Test*. Les 3 exécutables sont :

- *LISACode* : Le programme de simulation principal qui modélise les ondes gravitationnelles, les passe dans l'ensemble du détecteur et applique la pré-analyse TDI sur les données de sortie.
- *DnonGW* : Programme qui donne les variations relatives de fréquence des faisceaux induites par les seules ondes gravitationnelles.
- *TDIApply* : Application de générateurs TDI sur des données préalablement simulées.

Si vous utilisez *make install* pour la compilation, les 3 exécutables sont aussi dans le répertoire *bin* situé avec les exécutable de votre ordinateur ou dans le répertoire spécifié *MyExe/bin*. Ce répertoire comprend aussi plusieurs exécutables de test.

Pour plus de praticité, copiez les exécutables dans votre répertoire de travail (le répertoire où vous souhaitez effectuer les simulations de LISA).

3.2.2 Option d'installation

Les différentes options d'installation possibles sont détaillées dans le fichier *INSTALL* situé dans *MyDirectory/lisacode-1.4.4*.

IMPORTANT : Si à la configuration le chemin du répertoire contenant la **fftw3** n'est pas trouvé, il faut le spécifier explicitement en ajoutant les arguments :

```
CPPFLAGS=-I/cheminfftw3/include LDFLAGS=-L/cheminfftw3/lib
```

Les options de compilation doivent être spécifiées au moment de la configuration. Après le `./configure`, `CXXFLAGS=` suivi des options de compilation entre guillemets. Par exemple, pour optimiser la compilation sous un PowerPCG5, l'option est `-O3 -fast` d'où la commande suivante pour l'installation :

```
./configure CXXFLAGS="-O3 -fast -Wno-deprecated"
```

Il est également possible de spécifier le chemin du répertoire dans lequel les exécutables seront installés lors du `make install`. Pour cela, taper `--prefix=` suivi du chemin du répertoire entre guillemets. Par exemple, la commande pour la configuration sous PowerPCG5 avec les exécutables dans le répertoire *MyExe* est :

```
./configure CXXFLAGS="-O3 -fast -Wno-deprecated" --prefix="MyExe"
```

3.2.3 Test de fonctionnement

Pour tester le fonctionnement du simulateur, utilisez le fichier de configuration de référence *ConfigRefBase* avec les instructions suivantes :

1. Se placer dans ce répertoire d'installation.
2. Lancer le simulateur : *LISACode* suivi du nom du fichier de configuration puis de "123456" (graine du générateur aléatoire).

```
./LISACode MyDirectory/lisacode-1.4.4/Example_Input/ConfigRefBase
123456
```

Le programme met entre 10 secondes et 15 minutes pour exécuter les 10 000 s de la simulation. L'affichage final est :

```
...
9787 s (remaining time : 00:00:00) #0098 %
X = 1.54307511554625e-18
Y = 2.23380376286915e-18
Z = 2.03070569638376e-18
```

```
X2s1 = 3.84102728265182e-18
X2s2 = 7.30253602341876e-18
X2s3 = 6.49295628725497e-18
P1 = 1.66863806379042e-18
Zeta1 = 9.83725319837678e-19
A = 1.13116170136341e-18
E = 2.24813370548819e-18
T = 8.43890200220657e-19
Alpha = 1.33468352729959e-18
AlphaId = 1.33468352729959e-18
Alphaf2 = 2.66936705459917e-18
Final time : 10001 s
```

```
Closing ASCII file.
Closing ASCII file.
Closing ASCII file.
Closing ASCII file.
Closing ASCII file.
```

End

3.3 Sous Windows

Il faut utiliser Cygwin.

Sinon il existe un exécutable de LISACode sous Windows qui a été testé sous Windows XP mais qui n'est pas à jour !

3.3.1 Installation

Il n'y a pas d'installation à proprement parler ; il suffit juste de récupérer le fichier *LISACode_1.3_for_Windows.zip* à l'adresse :

<http://www.apc.univ-paris7.fr/Downloads/lisa/LISACode/version-1.3/>.

Décompresser le fichier et exécuter l'exécutable LISACode.exe.

3.3.2 Test de fonctionnement

Il est possible de tester le fonctionnement du simulateur en utilisant un fichier de configuration de référence (*ConfigRefBase*) situé dans le même répertoire que l'exécutable. La procédure à suivre est la suivante :

1. Ouvrir une console MS-DOS et se placer dans le répertoire où se trouve l'exécutable et le fichier de configuration *ConfigRefBase* (`cd ...`).
2. Lancer le simulateur : *LISACode* suivi du nom du fichier de configuration (*ConfigRefBase*) puis de "123456" (graine du générateur aléatoire) .
`LISACode.exe ConfigRefBase 123456`

On doit obtenir les mêmes résultats que ceux du chapitre 3.2.3.

4 Utilisation de LISACode

4.1 Exécution du simulateur et des deux programmes annexes

Le programme principal qui effectue toute la simulation (des ondes gravitationnelles à TDI) se nomme **LISACode**. Pour configurer la simulation, ce programme lit les informations contenues dans un fichier de configuration dont le détail est donné au paragraphe suivant. L'adresse des fichiers de sortie est spécifiée dans le fichier de configuration. Pour lancer la simulation la ligne de commande est :

`./LISACode fichier_de_configuration`
(si l'exécutable est dans le répertoire de travail)
ou
`../chemin/du/repertoire/d/installation/LISACode fichier_de_configuration`
(si l'exécutable n'est pas dans le répertoire de travail)

Il est également possible de spécifier la racine du générateur de nombre aléatoire (**RandomSeed**) et des options par la ligne de commande :

`./LISACode [Options] fichier_de_configuration RandomSeed`

Les options possibles sont :

- **-h** : Ajoute une en-tête dans les fichiers binaires.

Il existe deux autres exécutables qui lisent également les informations du fichier de configuration. Ces deux exécutables n'effectuent qu'une partie de la simulation :

- **DnonGW** : Ce programme effectue le calcul de la variation relative de fréquence des faisceaux lasers arrivant sur chaque phasemètre en tenant uniquement compte des ondes gravitationnelles (spécifiées dans le fichier de configurations). Il donne en sortie trois fichiers (dont le nom ne peut pas être spécifié) qui sont :
 - *DnGW_GW.txt* : Evolution temporelle du h_+ et du h_\times des ondes gravitationnelles.

- *DnGW_Position.txt* : Evolution temporelle des coordonnées écliptiques des trois satellites.
- *DnGW_TDelay.txt* : Temps de parcours des faisceaux le long des bras.
- *DnGW_SigFctTrGW.txt* : Variation relative des faisceaux lasers externes arrivant sur chaque photodiode.

Les paramètres temporelles de la simulation sont ceux spécifiés dans le fichier de configurations.

- **TDIApply** : Ce programme applique les générateurs TDI spécifiés dans le fichier de configuration, sur des fichiers de données brutes (sortie des phasemètres). Le fichier de sortie contient (comme pour la simulation complète) l'évolution temporelle de chaque générateurs TDI. Le nom de ce fichier est celui spécifié dans le fichier de configurations.

5 Fichier de configuration

5.1 Généralités

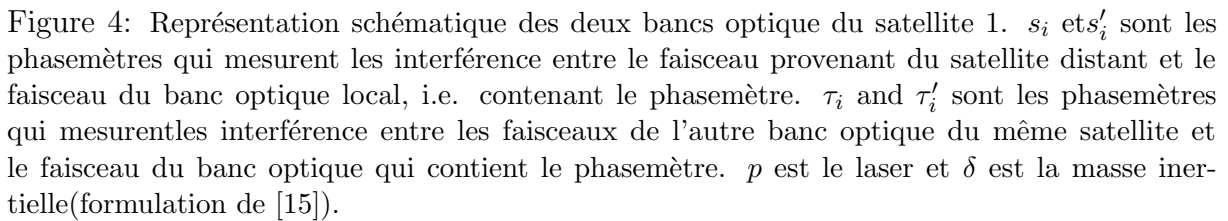
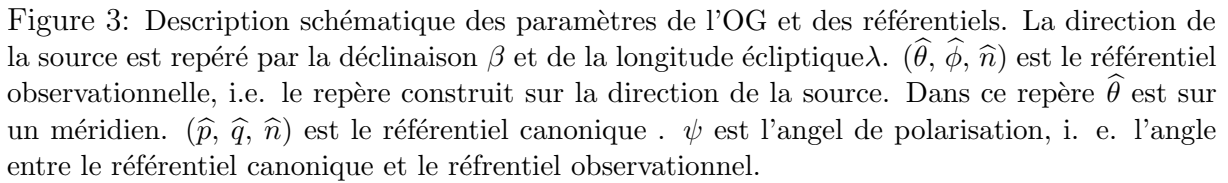
Ce fichier contient toutes les information pour configurer le simulateur. Il y a deux types de fichier possibles : ASCII (cf. 5.2) ou XML (cf. 5.3). Les tableaux 2 , 3, 4, 5, 6, 7, 8 , 9 and 10 listent les paramètres.

Table 2: Liste des paramètres utilisés pour configurer la simulation dont le type est **Time**.

Nom	Détails	Unités	Valeur standard
StepPhysic	Pas de temps utilisé pour modéliser des processus continu, avant filtrage.	secondes	0.5
StepMeasure	Pas de temps dans le fichier de sortie du signal des phasmètre, après filtrage.	secondes	1
Max	Durée totale de calcul.	secondes	de 1 s à an
DeltaTDIDelay	Erreur possible sur l'estimation des temps de parcours.	secondes	de 0 à 1e-5
StepDisplay	Pas de temps de l'affichage de l'avancement (pour suivre la simulation).	secondes	de 100 à 1e6

Table 3: Liste des paramètres utilisés pour configurer la simulation dont le type est **PrecisionTDI**.

Nom	Détails	Unités	Valeur standard
Interpolation	Type d'interpolation utilisé pour TDI		LAG 20
TDIDelayApprox	Si ON, les retards utilisés dans TDI sont ajoutés sinon sinon ils sont imbriqués	On/Off	Off



5.2 Configuration par fichier ASCII

LISACode peut lire les informations de configuration de la simulation dans un fichier de configuration ASCII. La syntaxe de ce fichier suit certaines règles très strictes :

- Toutes les lignes se terminent par un point virgule précédé d'un espace (;) que ce soit des lignes de commandes ou des lignes de commentaires.
- Chaque bloc de caracteres doit etre separe du suivant par un espace.
- Pour qu'une ligne soit en commentaire, il faut quelle commence par un "#" suivi d'un espace.
- C'est le premier mot d'une ligne (mot clé principal) qui renseigne sur l'information que contient la ligne. Il existe 9 mots clés principaux qui sont : **Time**, **Interpolation**, **TDIDelayApprox** , **Orbits**, **Detector**, **Record**, **GW**, **Noise**, **USO** et **TDI**. Le mot clé principal est toujours suivi de ":".
- La commande "END" stoppe la lecture du fichier de configuration.

5.2.1 Configuration des temps

Le mot clé principal d'une ligne de configuration d'un paramètre temporel est **Time**. Une liste des parametres est donnee dans la tableau 2. Les différents paramètres temporels et les lignes les configurant sont :

- *Pas de temps physique* : C'est le pas de temps le plus petit de la simulation. Il correspond à la simulation des phénomènes continus.
Ligne de configuration pour un pas de temps physique de 0.5 s :
`Time : StepPhysic 0.5 ;`
- *Pas de temps sur la prise de mesure* : C'est le pas de temps sur la prise des mesures par les phasemètres. Il correspond au pas de temps sur les données de sortie et donc sur les resultats de TDI.
Ligne de configuration pour un pas de temps sur la prise de mesure de 1 s :
`Time : StepMeasure 1 ;`
- *Durée de la simulation* : C'est le temps que dure la simulation.
Ligne de configuration pour une simulation de 10000 s :
`Time : Max 10000 ;`

- *Imprécision de l'information sur les temps de parcours* : Cette incertitude temporelle correspond à l'imprécision sur la connaissance du temps de propagation le long des bras de LISA. C'est une erreur ΔD ajoutée sur les temps de parcours exacts $D_{real} = L_{real}/c$ avant leur utilisation par TDI. Les temps de parcours utilisés dans TDI D_{TDI} sont donc :

$$D_{TDI} = D_{real} + \Delta D \quad (1)$$

Ligne de configuration pour une imprécision sur les retards de 10^{-6} s:

Time : DeltaTDIDelay 1e-6 ;

- *Pas de temps sur l'affichage* : Pas de temps sur l'affichage à l'écran. Il permet à l'utilisateur de suivre l'évolution de la simulation.

Ligne de configuration pour un pas de temps d'affichage de 1000 s:

Time : StepDisplay 1000 ;

5.2.2 Configuration de l'interpolation

Le mot clé principal d'une ligne de configuration de l'interpolation est **Interpolation**. Il existe pour l'instant un seul type d'interpolation : l'interpolation lagrangienne

- *Interpolation dans l'application de TDI* : C'est le type d'interpolation faite sur les données brutes de sorte des phasemetres lors de l'application des retards dans TDI. On interpole pour obtenir la valeur la plus réaliste possible entre 2 mesures. Pour l'interpolation lagrangienne, on précise l'ordre de l'interpolation.

Ligne de configuration pour définir l'interpolation dans l'application de TDI :

Interpolation : LAG 20 ;

5.2.3 Approximation des retards dans l'application de TDI

Il est possible d'accélérer le calcul de TDI en effectuant un calcul moins exact des retards. En effet lorsque l'on calcul le retard global à appliquer sur une mesure, il faut combiner les retards, en interpolant la valeur de chaque retard à partir des précédents. Par exemple le calcul normal d'un "pack TDI" est :

$$D_1 D_2 D_3 s_2 = s_2 \left(t - \left(\frac{L_1(t)}{c} + \frac{L_2 \left(t - \frac{L_1(t)}{c} \right)}{c} + \frac{L_3 \left(t - \left(\frac{L_1(t)}{c} + \frac{L_2 \left(t - \frac{L_1(t)}{c} \right)}{c} \right)}{c} \right) \right) \right) \quad (2)$$

Lorsque l'on simplifie le calcul, les retards sont simplement pris à t et sommés sans interpolation. Soit pour l'exemple précédent :

$$D_1 D_2 D_3 s_2 = s_2 \left(t - \left(\frac{L_1(t)}{c} + \frac{L_2(t)}{c} + \frac{L_3(t)}{c} \right) \right) \quad (3)$$

L'accélération vient du fait que l'on a beaucoup moins d'interpolation à calculer.

- *Delay approximation* : La ligne de configuration pour effectuer un calcul approximatif rapide de TDI est :

TDIDelayApprox : off ;

5.2.4 Configuration des orbites et du temps de parcours

Le mot clé principal d'une ligne de configuration des orbites est **Orbits**. Une liste des paramètres est donnée dans la tableau 4.

- *Longueur des bras* : Spécifie la longueur nominale des bras de LISA.
Ligne de configuration pour définir une longueur de bras nominal de $5 \times 10^9 m$:
Orbits : Armlength 5e9 ;
- *Temps initial des orbites* : Ce paramètre temporel permet de démarrer la simulation avec une position des satellites différentes de la configuration de base. La configuration de base correspond à la position du tableau 12 soit le satellite 1 sur l'axe x et en dessous du plan de l'écliptique et satellite 2 et 3 au dessus avec 2 en $y < 0$ et 3 en $y > 0$.
Ligne de configuration pour définir un temps de démarrage des orbites de $5 \times 10^6 s$ après la configuration initiale :
Orbits : StartTime 5e6 ;
- *Phase initial de rotation du triangle* : Ce paramètre temporel permet de changer la position au temps 0 des satellites (temps courant + temps initial des orbites) par rapport à la configuration de base définie dans la tableau 12. Elle correspond à un angle (en radians) de rotation dans le plan par rapport à la configuration de base.
Ligne de configuration pour définir un angle de rotation de $\pi/6$ par rapport à la configuration de base :
Orbits : InitialRotation 0.523598776 ;
- *Type d'orbites* : Ce paramètre **Type** permet de spécifier le type d'orbites utilisés :

- **LISACode** : orbites définies par le laboratoire ARTEMIS [11].
- **MLDC** ou **Pseudo_LISA** : orbites définies par le Mock LISA Data Challenge [16].
- **ESA** : orbites issues d'un calcul de l'ESA prenant en compte des éphémérides pour les autres corps du système solaire (lu dans le fichier 'Orbit_ESA.input.txt').

Ligne de configuration pour définir une simulation utilisant les orbites définies par le laboratoire ARTEMIS [11] :

```
Orbits : Type LISACode ;
```

- *Approximation dans le calcul des orbites* : Ce paramètre **Approx** permet de spécifier le type d'orbites utilisés :

- **Static** : Satellites fixes.
- **Rigid** : Satellites en mouvement avec une configuration rigide si les orbites du MLDC sont utilisés.
- **Eccentric** : Satellites en mouvement avec une configuration rigide si les orbites du MLDC sont utilisés (identique à **Eccentric** si les orbites sont du type **LISACode** ou **ESA**).

Ligne de configuration pour définir une simulation utilisant les orbites définies par le laboratoire ARTEMIS [11] :

```
Orbits : Approx Eccentric ;
```

- *Ordre dans le calcul des temps de propagation* : Ce paramètre spécifie la précision avec lequel est fait le calcul du temps de parcours des photons entre satellites. Le parametre est a 0 pour un calcul classique considerant uniquement la distance entre satellite. Il est a1 pour un calcul tenant compte de l'effet Sagnac du a la rotation du triangle c'est-a-dire que le long d'un meme bras les temps parcours different. Il est 2 pour un calcul tenant compte des effets de la relativité générale. Si les satellites sont fixes (**Move Off**), on ne peut pas spécifier un autre ordre que 0.

Ligne de configuration pour définir un calcul relativiste des temps de propagation :

```
Orbits : Order 2 ;
```

5.2.5 Configuration du detecteur

Le mot clé principal d'une ligne de la configuration du détecteur est **Detector**. Cette configuration concerne des éléments spécifiques du détecteur comme la puissance laser ou le filtre du phasemètre. Une liste des parametres est donnee dans la tableau 5.

- *Puissance Laser* : Spécifie la puissance des faisceaux à la sortie des lasers.
Ligne de configuration pour définir une puissance de laser de 1 *Watt* :
`Detector : LaserPower 1 ;`
- *Filtre du phasemètre* : Spécifie si on filtre ou non les signaux dans les phasemètres par un filtre passe-bas elliptique s'adaptant au pas de temps physique et au pas de temps de mesure. Ce filtre évite un repliement de spectre lors du sous-échantillonnage. On met `Off` pour rendre le filtre inactif et `On` pour le rendre actif.
Ligne de configuration pour filtrer les signaux dans le phasemètre :
`Detector : PhaMetFilter On ;`
- *Paramétrisation du filtre elliptique du phasemètre* : Il y a 4 paramètres pour définir le filtre du phasemètre : l'atténuation en décibels caractérisée par le mot-cle `attenuation`, l'oscillation en bande passante en décibels caractérisée par le mot-cle `oscillation`, la fréquence de coupure haute définie comme un facteur (inférieur à 1) de la fréquence de mesure caractérisée par le mot-cle `FactFmesForHighFreq` et la fréquence de coupure basse définie comme un facteur (inférieur à 1) de la fréquence de mesure caractérisée par le mot-cle `FactFmesForLowFreq`.
Ligne de configuration pour un filtre (filtre par défaut) d'atténuation de 180 dB, d'oscillation en bande passante de 0.1 dB, de fréquence de coupure haute égale à 0.1 fois la fréquence de mesure et de fréquence de coupure basse égale à 0.3 fois la fréquence de mesure :
`Detector : PhaMetFilterParameters : attenuation 180 oscillation 0.1 FactFmesForHighFreq 0.1 FactFmesForLowFreq 0.3 ;`
- *Phasemètres interne dans les fichiers de sorties* : Spécifie si les données des phasemètres internes sont dans les fichiers de sorties dans le cas sans bruit. Deux valeurs possibles : `Always`, les données sont toujours écrites; `IfNoises`, les données sont écrites seulement si les bruits sont considérés dans la simulation (puisque dans ce cas ils ne sont pas nuls !). Exemple : `Detector : InternalPhasemeters IfNoises ;`

5.2.6 Configuration des fichiers de sorties

Le mot clé principal d'une ligne de configuration d'un fichier de sortie est `Record`. Il existe 4 types de fichiers de sortie. Les sorties pour lesquels aucun fichier n'est spécifié ne sont pas enregistrés mais cela n'empêche pas l'exécution du programme. Une liste des paramètres est donnée dans la tableau 6.

- *Fichier de sortie des données d'un satellite* : Fichier dans lequel sont stockées les données en sortie des 4 phasemètres d'un satellite. Ce fichier comporte 5 colonnes (voir la figure 4 pour la position des phasemetres) : temps , phasemetre s_i , phasemetre s'_i , phasemetre τ_i , phasemetre τ'_i .

Ligne de configuration pour définir lenregistrement de la sortie du satellite 1 dans le fichier de nom "*SigPhaMetSC1.txt*" :

Record : SignalSC 1 SigPhaMetSC1.txt ;

- *Fichier d'enregistrement des temps de parcours* : Fichier dans lequel sont stockées les 6 temps de parcours entre satellites. Ce fichier comporte 7 colonnes : temps , 3 temps de parcours dans le sens direct (L_1/c L_2/c L_3/c) , 3 temps de parcours dans le sens indirect (L'_1/c L'_2/c L'_3/c).

Ligne de configuration pour définir l'enregistrement des temps de parcours dans le fichier de nom "*DelayTDI.txt*" :

Record : Delay DelayTDI.txt ;

- *Fichier d'enregistrement des positions des satellites* : Fichier dans lequel sont stockées les 3 coordonnées cartésiennes dans le referentiel ecliptique des satellites. Ce fichier comporte 10 colonnes : temps , x_1 , x_2 , x_3 , y_1 , y_2 , y_3 , z_1 , z_2 , z_3 .

Ligne de configuration pour définir l'enregistrement des positions dans le fichier de nom "*SCPos.txt*" :

Record : Position SCPos.txt ;

- *Fichier d'enregistrement des générateurs TDI* : Fichier dans lequel sont stockées les résultats des générateurs TDI spécifiés (voir 5.2.10). Ce fichier comporte une colonne pour le temps + une colonne par générateur TDI spécifié.

Ligne de configuration pour définir l'enregistrement générateurs TDI dans le fichier de nom : "*SignalTDI.txt*" :

Record : TDI SignalTDI.txt ;

5.2.7 Configuration des ondes gravitationnelles

Le mot clé principal d'une ligne de configuration d'une onde gravitationnelle est **GW**. Une liste des parametres est donnee dans la tableau 7. More scientific information on LISACode gravitational waves are available in article of A.Petiteau [14]. Il existe 4 types d'onde gravitationnelle possibles dans le simulateur. Chaque paramètre est défini, en précédant la valeur, d'un mot clé correspondant au paramètre. Pour tous les types d'onde, on précise juste après "GW", la direction de la source en coordonnées

écliptiques ($\beta \in [-90^\circ, 90^\circ] \rightarrow \{\text{Bet}\}$, $\lambda \in [0^\circ, 360^\circ] \rightarrow \{\text{Lam}\}$) et l'angle de polarisation $\Psi \in [0^\circ, 360^\circ] \rightarrow \{\text{Psi}\}$. Ces 3 angles sont schematisés sur la figure 3. Attention ils sont définis en degrés. Par exemple pour une onde dont la source est à $\beta = 27^\circ$ et $\lambda = 297^\circ$ et dont l'angle de polarisation $\psi = 229^\circ$, le début de la ligne de configuration est :

GW : Bet 27.0 , Lam 297.0 , Psi 229.0 : ... ;

- *Onde gravitationnelle monochromatique* **{Mono}** : Onde gravitationnelle monochromatique dont on définit la fréquence $\{f\}$, l'amplitude de chaque composante de polarisation (h_{+0} **{hp}** et $h_{\times 0}$ **{hc}**) et la phase initiale (en radians) de chaque composante de polarisation (Φ_{+0} **{Phi0hp}** et $\Phi_{\times 0}$ **{Phi0hc}**). L'évolution temporelle des contraintes gravitationnelles de l'onde dans le référentiel propre de l'onde (CFR : Canonical Reference Frame) $h_{CFR+}(t)$ et $h_{CFR\times}(t)$ correspond à :

$$\begin{cases} h_{CFR+}(t) &= h_{0+} \sin(2\pi f t + \phi_{0+}) \\ h_{CFR\times}(t) &= h_{0\times} \sin(2\pi f t + \phi_{0\times}) \end{cases} \quad (4)$$

Ligne de configuration pour définir une onde gravitationnelle monochromatique dont la direction de la source est $\beta = 50^\circ$ et $\lambda = 230^\circ$, l'angle de polarisation $\psi = 15^\circ$, la fréquence $f = 10^{-4}$, l'amplitude des composantes $h_{+0} = 10^{-21}$ et $h_{\times 0} = 0$ et la phase initiale des composantes de polarisation $\Phi_{+0} = 0$ et $\Phi_{\times 0} = 0$:

GW : Bet 50 , Lam 230 , Psi 15 : Mono : f 1e-4 , hp 1e-21 , hc 0.0 , Phi0hp 0.0 , Phi0hc 0.0 ;

- *Onde gravitationnelle d'une binaire de fréquence fixée* **{Binary}** : Onde gravitationnelle issue d'une source binaire de fréquence fixée pour laquelle on définit les masses des deux astres m_1 **{M1}** et m_2 **{M2}** en masse solaire, la fréquence orbitale f_{orb} **{forb}** en Hz, l'angle d'inclinaison i **{inc}** en degrés, la phase initiale ϕ_0 **{Phi0}** entre 0 et 2π et la distance entre la source et le détecteur r **{r}** en kpc. L'évolution temporelle des contraintes gravitationnelles de l'onde dans le référentiel propre de l'onde (CFR : Canonical Reference Frame) $h_{CFR+}(t)$ et $h_{CFR\times}(t)$ correspond à :

$$\begin{cases} h_{CFR+} &= A (1 + \cos^2 i) \cos(4\pi f_{orb} t + \phi_0) \\ h_{CFR\times} &= -2A \cos i \sin(4\pi f_{orb} t + \phi_0) \end{cases} \quad (5)$$

avec

$$m_{tot} = m_1 + m_2 \quad (6)$$

$$R = \left(\frac{G m_{tot}}{(2\pi f_{orb})^2} \right)^{1/3} \quad (7)$$

$$A = \frac{2G^2 m_1 m_2}{c^4 R r} \quad (8)$$

Ligne de configuration pour définir une onde gravitationnelle issue d'une binaire de direction $\beta = 37.34^\circ$, $\lambda = 350^\circ$, langle de polarisation $\psi = 141.06^\circ$, de masses $M1 = 0.5M_S$ et $M2 = 0.033M_S$, de fréquence $f = 9.72044 \times 10^{-4}$, d'inclinaison $i = 88^\circ$, de phase initiale $\psi_0 = 0^\circ$ et de séparation $r = 0.1$ kpc :

GW : Bet 37.34 , Lam 350 , Psi 141.06 : Binary : M1 0.5 , M2 0.033 , forb 9.72044e-4 , inc 88 , phi0 0 , r 0.1 ;

- *Onde gravitationnelle d'une binaire spiralante* {PostNewtonBinary} : Onde gravitationnelle issue d'une source binaire calculée dans l'approximation Post-Newtonienne à 1 PN ou 2.5 PN pour laquelle on définit les masses des deux astres m_1 {M1} et m_2 {M2} en masse solaire, le temps de coalescence t_{coal} {tcoal} en seconds, l'angle d'inclinaison i {inc} en degrees, la phase initiale ϕ_0 {Phi0} entre 0 et 2π et la distance entre la source et le détecteur r {r} en kpc. L'ordre Post-Newtonien du calcul est de 1 PN lorsque le paramètre {type} est à 1 ou de 2.5 PN lorsque le paramètre {type} est à 2. Pour le calcul à 2.5 PN, il faut préciser 3 paramètres qui sont : une phase initiale arbitraire {omega0}, la phase à l'entrée du détecteur {taud0} et un paramètre Post-Newtonien {gw} égal à 1 dans la plupart des cas. Le calcul de l'évolution temporelle des contraintes gravitationnelles de l'onde dans le référentiel propre de l'onde (CFR : Canonical Reference Frame) $h_{CFR+}(t)$ et $h_{CFR\times}(t)$ est basé sur des articles [10], [7], [8] et [9]

Ligne de configuration pour définir une onde gravitationnelle issue d'une binaire de direction $\beta = 37.34^\circ$, $\lambda = 350^\circ$, langle de polarisation $\psi = 141.06^\circ$, de masses $M1 = 0.5M_S$ et $M2 = 0.033M_S$, de fréquence $f = 9.72044 \times 10^{-4}$, d'inclinaison $i = 88^\circ$, de phase initiale $\psi_0 = 0^\circ$ et de séparation $r = 0.1$ kpc :

GW : Bet 37.34 , Lam 352.0 , Psi 141.06 : PostNewtonBinary : M1 1.0e6 , M2 1.0e6 , tcoal 9676800.0 , inc 90 , phase 1.2 , r 1e5 , type 2 , omega0 1.0 , taud0 10.0 , gw 1.0 ;

- *Onde gravitationnelle d'une binaire spiralante BH-BH avec spin* {FastSpinBBH} : Onde gravitationnelle d'une binaire spiralante composée de deux trous noirs avec prise en compte du spin. Le calcul de la précession du plan orbital est réalisée par une intégration avec la méthode Runge-Kutta d'ordre 6. L'amplitude est calculée dans l'approximation Post-Newtonienne avec un ordre pouvant aller jusqu'à 2 PN {PN}. On définit les masses des deux astres m_1 {M1} et m_2 {M2} en masse solaire, le temps de coalescence t_{coal} {tcoal} en secondes, la phase initiale ϕ_0 {phase} entre 0 et 2π et la distance entre la source et le détecteur r {r} en kpc. On spécifie également l'amplitude des spins, {S1, S2}, entre 0 et 1, leur angle polaire {polS1, polS2} et leur angle azimutal {polS1, polS2}. On spécifie également la direction initiale du moment orbital par son angle polaire {polL} et son angle azimutal {azL}. Le calcul de l'évolution temporelle des contraintes gravitationnelles de l'onde dans le référentiel barycentrique (BRF : Barycentric Reference Frame) $h_{B+}(t)$ et $h_{B\times}(t)$

est basé sur les articles [5] et [1].

Ligne de configuration pour définir une onde gravitationnelle issue d'une binaire de trous noirs spiralante avec spin de direction $\beta = 37.0^\circ$, $\lambda = 285.9^\circ$, de masses $M1 = 1465580.0 M_S$ et $M2 = 868710.0 M_S$, de temps de coalescence $3.1e7 s$, de phase initiale $1.1 rd$, de distance $1.0e6 kpc$, d'angle polaire moment orbital initial 162.0° et d'azimut 328.9° , de spin de l'objet 1 d'intensité 0.077 , d'angle polaire 160.0° , d'azimut 130.6° et de spin de l'objet 2 d'intensité 0.27 , d'angle polaire 239.0° , d'azimut 162.0° (amplitude calculée à l'ordre 2 PN):

```
GW : Bet 37.0 , Lam 285.9 , Psi 0.0 : FastSpinBBH : M1 1465580.0
, M2 868710.0 , tcoal 3.1e7 , phase 1.1 , r 1.0e6 , S1 0.077 , S2 0.27
, polS1 160.0 , polS2 130.6 , azS1 0.8 , azS2 239.0 , polL 162.0 , azL
328.9 , PN 2 ;
```

- *Onde gravitationnelle quelconque (lecture d'un fichier) {File}* : Onde gravitationnelle quelconque dont les évolutions temporelles des composantes de polarisation exprimées dans le référentiel canonique de l'onde (h_{S+} $h_{S\times}$) sont lues dans un fichier. Il y a quatre format de fichier possible :

- Fichier ASCII à 3 colonnes : $temps$, h_{S+} $h_{S\times}$: Ligne de configuration pour lire le fichier ASCII à 3 colonnes *GWFile.txt*¹ (direction de la source $\{\beta = 50^\circ, \lambda = 230^\circ\}$ et polarisation $\psi = 15^\circ$) :

```
GW : Bet 50 , Lam 230 , Psi 15 : File : GWFile.txt ;
```

- Fichier ASCII à 2 colonnes : h_{S+} $h_{S\times}$ avec le temps initial t_0 et le pas de temps Δt spécifiés dans le fichier de configuration : Ligne de configuration pour lire le fichier ASCII à 2 colonnes *GWFile2.txt*² dont le temps initial $t_0 = -900s$ et le pas de temps $\Delta t = 15s$ (direction de la source $\{\beta = 50^\circ, \lambda = 230^\circ\}$ et polarisation $\psi = 15^\circ$).

```
GW : Bet 50 , Lam 230 , Psi 15 : File : GWFile2.txt ASCII -900 15
;
```

- Fichier binaire à 2 colonnes : h_{S+} $h_{S\times}$ avec la longueur N_D (nombre d'enregistrement ou lignes) et le nombre de type de données N_R (*records* ou colonnes), le temps initial t_0 et le pas de temps Δt spécifiés dans le fichier de configuration : Ligne de configuration pour lire le fichier binaire à 2 colonnes *GWFile3.bin*³ dont la longueur $N_D = 4194304$, le nombre de colonne $N_R = 2$, le temps initial

¹ L'extension du fichier est quelconque excepté *.xml* qui est réservé pour les fichiers XML de données du MLDC

²cf. note 1

³cf. note 1

$t_0 = -900s$ et le pas de temps $\Delta t = 15s$ (direction de la source $\{\beta = 50^\circ, \lambda = 230^\circ\}$ et polarisation $\psi = 15^\circ$).

GW : Bet 50 , Lam 230 , Psi 15 : File : GWFile3.bin BINARY 4194304 2 -900 15 ;

- Fichier binaire à 2 colonnes : h_{S+} $h_{S\times}$ décrit par un fichier XML au format du Mock LISA Data Challenge : Ligne de configuration pour lire un fichier binaire à 2 colonnes décrit par le fichier XML *GWFile4.xml*⁴ (direction de la source $\{\beta = 50^\circ, \lambda = 230^\circ\}$ et polarisation $\psi = 15^\circ$).

GW : Bet 50 , Lam 230 , Psi 15 : File : GWFile4.xml ;

5.2.8 Configuration des bruits

Le mot clé principal d'une ligne de configuration des bruits est **Noise**. Une liste des parametres est donnee dans la tableau 8. La configuration d'un bruit se fait ensuite en deux étapes : la localisation du bruit puis sa nature. La localisation du bruit se fait par le mot clé correspondant à la situation du bruit : **Laser** pour le bruit issu d'un laser - **Mass** pour le bruit sur une masse inertielle - **Shot** pour le bruit de "shot noise" - **OOPN** pour le bruit des autres bruits de chemin optique (autre que le "shot noise"). Le mot clé de localisation est suivi du numéro du satellite (1, 2 et 3) puis le "sens" du banc : 0 si le banc est dans le "sens direct " (1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1), 1 s'il est dans le "sens indirect" (1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1). On spécifie ensuite la nature du bruit :

- *Bruit blanc* {**White**}: Modélisation d'un bruit blanc de densité spectrale de puissance donnée.

Ligne de configuration pour définir un bruit blanc de densité spectrale de puissance 10^{-13} (sans dimension car exprimé en variation relative de fréquence) sur le laser du banc optique du satellite 1 en vis-à-vis avec le satellite 2 :

Noise : Laser 1 0 : White 1.0e-13 ;

- *Bruit filtré pour une évolution en $1/f$ de l'amplitude (ou \sqrt{PSD})* {**Filter_1of**}: Modélisation d'un bruit dont l'amplitude évolue en $1/f$. La seule valeur à spécifier est le niveau du bruit $A_{\delta\nu/\nu}$ en $Hz^{1/2}$ c'est-à-dire l'amplitude (ou \sqrt{PSD}) tel que $PSD_{\delta\nu/\nu} = A_{\delta\nu/\nu}^2 f^{-2}$. Les coefficients sont ensuite automatiquement calculés par rapport au pas de temps⁵.

Par exemple, le bruit d'une masse inertielle est generalement exprime comme un

⁴Pour ce type de fichier l'extention .xml est indispensable.

⁵Les coefficients du filtre pour un bruit en $PSD_{\delta\nu/\nu} = A_{\delta\nu/\nu}^2 f^{-2}$ sont : $\alpha_1 = 1$ et $\beta_0 = \beta_1 = A_{\delta\nu/\nu} \pi \Delta t$

bruit d'accélération en $m.s^{-2}.Hz^{-1/2}$: $\sqrt{S_{\Delta a, MI}} = 3 \times 10^{-15} m.s^{-2}.Hz^{-1/2}$. Le calcul du $A_{\delta\nu/\nu, MI}$ est alors :

$$A_{\delta\nu/\nu, MI} = \frac{1}{2\pi c} \sqrt{S_{\Delta a, MI}} = 1.59 \times 10^{-24} Hz^{1/2} \quad (9)$$

Ligne de configuration pour définir un bruit de densité spectrale de puissance $PSD_{\delta\nu/\nu} = (1.59 \times 10^{-24} Hz^{1/2})^2 f^{-2}$ sur les masses inertielles du banc optique du satellite 2 en vis-à-vis avec le satellite 1 :

Noise : Mass 2 1 : Filter_1of 1.59e-24 ;

- *Bruit filtré pour une évolution en f de l'amplitude (ou \sqrt{PSD})* {Filter_f}: Modélisation d'un bruit dont l'amplitude évolue en f . La seule valeur à spécifier est le niveau du bruit $A_{\delta\nu/\nu}$ en $Hz^{-3/2}$ c'est-à-dire l'amplitude (ou \sqrt{PSD}) tel que $PSD_{\delta\nu/\nu} = A_{\delta\nu/\nu}^2 f^2$. Les coefficients sont ensuite automatiquement calculés par rapport au pas de temps⁶. Par exemple, le bruit de chemin optique dans les bancs est généralement exprime comme un bruit en $m.Hz^{-1/2}$: $\sqrt{S_{\Delta a, OOPN}} = 16.7 \times 10^{-12} m.Hz^{-1/2}$. Le calcul du $A_{\delta\nu/\nu, OOPN}$ est alors :

$$A_{\delta\nu/\nu, OOPN} = \frac{2\pi}{c} \sqrt{S_{\Delta a, OOPN}} = 3.49 \times 10^{-19} Hz^{-3/2} \quad (10)$$

Ligne de configuration pour définir un bruit de densité spectrale de puissance $PSD_{\delta\nu/\nu} = (3.49 \times 10^{-19} Hz^{-3/2})^2 f^2$ sur les bruits de chemin optique du banc optique satellite 3 en vis-à-vis avec le satellite 2 :

Noise : OOPN 3 1 : Filter_f 3.49e-19 ;

- *Bruit filtré pour une évolution en f de l'amplitude (ou \sqrt{PSD}), proportionnel à la longueur des bras et inversement proportionnel à la puissance laser* {Filter_fLoSP}: Modélisation d'un bruit dont l'amplitude évolue en f et est proportionnelle à la longueur des bras et inversement proportionnelle à la puissance laser. La seule valeur à spécifier est le niveau du bruit $A_{\delta\nu/\nu}$ en $Hz^{-3/2}$ c'est-à-dire l'amplitude (ou \sqrt{PSD}) tel que $PSD_{\delta\nu/\nu} = A_{\delta\nu/\nu}^2 f^2 \left(\frac{L}{5 \times 10^9 m}\right)^2 \left(\frac{1 W}{P}\right)$. Les coefficients sont ensuite automatiquement calculés par rapport au pas de temps⁷.

⁶Les coefficients du filtre pour un bruit en $PSD_{\delta\nu/\nu} = A_{\delta\nu/\nu}^2 f^2$ sont : $\alpha_1 = -1$, $\beta_0 = \frac{A_{\delta\nu/\nu}}{\pi \Delta t}$ et $\beta_1 = -\frac{A_{\delta\nu/\nu}}{\pi \Delta t}$

⁷Les coefficients du filtre pour un bruit en $PSD_{\delta\nu/\nu} = A_{\delta\nu/\nu}^2 f^2 \left(\frac{L}{5 \times 10^9 m}\right)^2 \left(\frac{1 W}{P}\right)$ sont : $\alpha_1 = -1$, $\beta_0 = \frac{A_{\delta\nu/\nu}}{\pi \Delta t} \left(\frac{L}{5 \times 10^9 m}\right) \sqrt{\left(\frac{1 W}{P}\right)}$ et $\beta_1 = -\frac{A_{\delta\nu/\nu}}{\pi \Delta t} \left(\frac{L}{5 \times 10^9 m}\right) \sqrt{\left(\frac{1 W}{P}\right)}$

Ligne de configuration pour définir un bruit de densité spectrale de puissance $PSD_{\delta\nu/\nu} = (2.30 \times 10^{-19} Hz^{-3/2})^2 f^2 (\frac{L}{5 \times 10^9 m})^2 (\frac{1W}{P})$ sur le "shot noise" du banc optique satellite 3 en vis-à-vis avec le satellite 2 :

Noise : Shot 3 1 : Filter_fLosP 2.30e-19 ;

- *Bruit filtré quelconque*: Modélisation d'un bruit filtré quelconque défini par les coefficients récurrents α {alpha} et directs β {beta} du filtre à réponse impulsionnelle infinie (IIR). On peut également préciser le temps nécessaire à la stabilisation du filtre {stablization}. S'il y a plusieurs coefficients d'un même type, il faut les séparer par des virgules.

Ligne de configuration pour définir un bruit filtré dont les coefficients du filtre sont $\alpha = \{1\}$ et $\beta = \{5 \times 10^{-24}, 5 \times 10^{-24}\}$ (bruit d'accélération en f^{-2} sur la densité spectrale de puissance) sur la masse inertielle du banc optique du satellite 2 en vis-à-vis avec le satellite 1 :

Noise : Mass 2 1 : FilterCoef : alpha 1.0 beta 5e-24 , 5e-24 ;

Ligne de configuration pour définir un bruit filtré dont les coefficients du filtre sont $\alpha = \{3.9939806575, -5.9819996369, 3.9820571154, -0.9940381365\}$ et $\beta = \{0.0000510993, -0.0002040002, 0.0003058023, -0.000204002, 0.0000510993\}$ sur la masse inertielle du banc optique du banc optique du satellite 3 en vis-à-vis avec le satellite 2 (attention ce bruit n'a strictement aucune réalité physique et est juste présenté à titre d'exemple de syntaxe):

Noise : Bench 3 1 : FilterCoef : alpha 3.9939806575 , -5.9819996369 , 3.9820571154 , -0.9940381365 beta 0.0000510993 , -0.0002040002 , 0.0003058023 , -0.000204002 , 0.0000510993 stablization 10000 ;

- *Bruit lu dans un fichier*: Modélisation d'un bruit à partir des valeurs d'un fichier (2 colonnes : temps bruit). Le programme charge l'ensemble des valeurs est commence à lire les valeurs à partir d'un point quelconque du fichier. Une fois que la dernière donnée est lue, la lecture recommence à la première donnée.

Ligne de configuration pour définir un bruit lu dans le fichier *NoiseOB.txt* contenant des données de variation de fréquence, d'où le facteur multiplicatif de normalisation à $1/f_0 = 3.5491 \times 10^{-15}$ pour passer en unités de variation relative de fréquence. Ce bruit est attribué au banc optique du satellite 1 en vis-à-vis avec le satellite 2 :

Noise : Laser 1 0 : File NoiseOB.txt 3.5491e-15;

5.2.9 Configuration des USOs

Le mot clé principal d'une ligne de configuration d'un oscillateur ultra-stable est **USO**. Une liste des parametres est donnee dans la tableau 8. Il faut tout d'abord définir le satellite auquel l'USO appartient : pour cela on précède le numéro du satellite du mot clé **SC**. On peut ensuite définir 3 paramètres pour un oscillateur ultra-stable (USO) : un offset **[offset]** en seconde, une dérive dans le temps en seconde par seconde **[derivs]** et le σ d'un bruit blanc gaussien **[noise]** en seconde. Ces paramètres sont spécifiés en précédant la valeur par le mot clé correspondant. Si l'on ne définit pas un USO, celui-ci est supposé parfait.

Ligne de configuration pour définir l'oscillateur du satellite 2 avec un offset de 0.006 s, une dérive de $10^{-6} s.s^{-1}$ et un bruit de sigma $10^{-7} s$:

USO : SC 2 : offset 0.006 derivs 1e-6 noise 1e-7 ;

5.2.10 Configuration de TDI

Le mot clé principal d'une ligne de configuration d'un générateur TDI est **TDI**. Le mot clé est suivi du nom du générateur puis de sa description. Le générateur est décomposé en un ensemble de "packs" écrits les uns à la suite des autres et séparés par un espace. Un pack correspond à l'application de retards sur la mesure d'un phasemetre ; par exemple $-D_{2'}D_2D_3D_{3'}D_3D_{3'}s_{1'}$ est un pack qui se code par -5236364. Le dernier chiffre correspond à la mesure du phasemtre code selon le tableau 13 . Les autres chiffres aux retards que l'on applique sur la mesure. La correspondance entre un bras et un chiffre du codage est donné par le tableau 14

Ligne de configuration pour définir le générateur TDI Michelson de deuxième génération

Z2: TDI : Z2Man 3 , 24 , 256 , 2542 , 25416 , 254142 , 2541413 , 25414124 , -6 , -42 , -413 , -4124 , -41253 , -412524 , -4125256 , -41252542 ;

Il est également possible d'associer à chaque pack du générateur, un facteur⁸. Dans la syntaxe, ce facteur suit le nombre entier décrivant le pack, séparé de celui-ci par un **x**, avec toujours un espace entre chaque groupe de caractères.

+ Ligne de configuration pour définir le générateur TDI à bruit non-corrélé E_b ⁹ :

TDI : EMan 2 x 0.577350269 , 16 x 0.577350269 , 145 x 0.577350269 , 1461 x 0.577350269 , -5 x 0.577350269 , -61 x 0.577350269 , -632 x 0.577350269 , -6316 x 0.577350269 , 3 x -0.577350269 , 24 x -0.577350269 , 256 x -0.577350269 , 2542 x -0.577350269 , -6 x -0.577350269 , -42 x -0.577350269 , -413 x -0.577350269 , -4124 x -0.577350269 ;

⁸Indispensable par exemple pour définir A,E et T. [17]

⁹Le générateur E est défini comme $E = \frac{Y-Z}{\sqrt{3}}$

Pour un certain nombre de générateurs, l'ensemble de packs est predefinis dans LISACode.
Pour ces generateurs listes dans les tableaux 10 et 11, le nom du generateur suffi.

+ Ligne de configuration pour définir le générateur TDI Michelson de deuxième génération
 X^{2nd} :

TDI : X2 ;

5.3 Configuration par fichier XML

LISACode peut également se configurer à partir d'un fichier XML. La structure du fichier XML est celle utilisée dans le Mock LISA Data Challenge (cf. articles [3, 2, 4] et site web [12]).

6 Problèmes connus

6.1 Installation

6.1.1 Erreur lors de l'installation

- Vérifier que le système possède bien une version de fftw3 et si nécessaire spécifier son emplacement en moment de la configuration comme par exemple :
`CPPFLAGS=-I/cheminfftw3/include LDFLAGS=-L/cheminfftw3/lib`
- Vérifier que le système possède bien une version d'automake 1.8 ou plus récente car dans certaine installtion, il peut être nécessaire d'utiliser automake.

6.2 Fichier de configuration

6.2.1 Problème dans la lecture du fichier de configuration :

- Vérifier qu'il y ait bien un point virgule à la fin de chaque ligne de commande et de commentaire.
- Vérifier qu'il n'y ait pas de ligne vide à la fin de votre fichier de configuration. La dernière ligne doit comporter une commande ou un commentaire. Elle peut également comporter l'instruction END.

7 Support - Contact

7.1 A l'APC (AstroParticule et Cosmologie)

Antoine PETITEAU :

7.2 A l'AEI (Albert Einstein Institute)

Antoine PETITEAU : Antoine.Petiteau@aei.mpg.de - +49 (331) 567-7134

References

- [1] Theocharis A. Apostolatos, Curt Cutler, Gerald J. Sussman, and Kip S. Thorne. Spin-induced orbital precession and its modulation of the gravitational waveforms from merging binaries. *Phys. Rev. D*, 49:6274–6297, Jun 1994.
- [2] K. A. Arnaud and *al.* Report on the first round of the Mock LISA Data Challenges. In *Proceedings report from GWDAW 11*, page 13, 2007.

- [3] Keith A. Arnaud, Stanislav Babak, John G. Baker, Matthew J. Benacquista, Neil J. Cornish, Curt Cutler, Shane L. Larson, B. S. Sathyaprakash, Michele Vallisneri, Alberto Vecchio, and Jean-Yves Vinet. A how-to for the Mock LISA Data Challenges. In *Sixth International LISA Symposium*, 2006.
- [4] Keith A. Arnaud, Stanislav Babak, John G. Baker, Matthew J. Benacquista, Neil J. Cornish, Curt Cutler, Shane L. Larson, B. S. Sathyaprakash, Michele Vallisneri, Alberto Vecchio, and Jean-Yves Vinet. An overview of the second round of the Mock LISA Data Challenges. In *Proceedings report from GWDAW 11*, 2007.
- [5] Stanislav Babak, John G. Baker, Matthew J. Benacquista, Neil J. Cornish, Jeff Crowder, Shane L. Larson, Eric Plagnol, Edward K. Porter, Michele Vallisneri, Alberto Vecchio, Keith Arnaud, Leor Barack, Arkadiusz Blaut, Curt Cutler, Stephen Fairhurst, Jonathan Gair, Xuefei Gong, Ian Harry, Deepak Khurana, Andrzej Krolak, Ilya Mandel, Reinhard Prix, B. S. Sathyaprakash, Pavlin Savov, Yu Shang, Miquel Trias, John Veitch, Yan Wang, Linqing Wen, and John T. Whelan. The mock lisa data challenges: from challenge 1b to challenge 3. *gr-qc*, 08062110, 2008.
- [6] P. Bender and *al.* *LISA Pre-Phase A report*. Max-Planck Institut für Quantenoptik, July 1998.
- [7] Luc Blanchet. Gravitational-wave tails of tails. *Classical Quantum Gravity*, 15:113, 1998.
- [8] Luc Blanchet, Guillaume Faye, Bala R. Iyer, and Benoit Joguet. Gravitational-wave inspiral of compact binary systems to $7/2$ post-newtonian order. *Phys. Rev. D*, 65(6):061501, Feb 2002.
- [9] Luc Blanchet, Guillaume Faye, Bala R. Iyer, and Benoit Joguet. Erratum: Gravitational-wave inspiral of compact binary systems to $7/2$ post-newtonian order [phys. rev. d 65, 061501(r) (2002)]. *Physical Revue D*, 71(129902), 2005.
- [10] Luc Blanchet, Bala R Iyer, Clifford M Will, and Alan G Wiseman. Gravitational waveforms from inspiralling compact binaries to second-post-newtonian order. *Classical Quantum Gravity*, 13:575–584, 1994.
- [11] S. V. Dhurandhar, K. Rajesh Nayak, S. Koshti, and Jean-Yves Vinet. Fundamentals of the LISA stable flight formation. *gr-qc*, 0410093, 2004.
- [12] Task Force MLDC. Site web du Mock LISA Data Challenges. <http://astrogravs.gsfc.nasa.gov/docs/mldc/>, 2007.
- [13] K. Rajesh Nayak and Jean-Yves Vinet. Algebraic approach to time-delay data analysis for orbiting LISA. *Physical Revue D*, 70(102003), 2003.

- [14] Antoine Petiteau, Gerard Auger, Hubert Halloin, Olivier Jeannin, Eric Plagnol, Sophie Pireaux, Tania Regimbau, and Jean Yves Vinet. LISACode: A scientific simulator of LISA. *Phys. Rev. D*, 77(023002):11, Jan 2008.
- [15] M. Tinto, F. B. Estabrook, and J. W. Armstrong. Time-delay interferometry for LISA. *Physical Review D*, 65(082003), 2002.
- [16] Michele Vallisneri. Synthetic LISA: Simulating time delay interferometry in a model LISA. *Physical Review D*, 71(022001), 2005.
- [17] Michele Vallisneri, Jeff Crowder, and Massimo Tinto. Sensitivity and parameters-estimation for alternate lisa configurations. *Classical and Quantum Gravity*, 25:065005, 2008.

Table 4: Liste des paramètres utilisés pour configurer la simulation dont le type est **Orbits**.

Nom	Détails	Unités	Valeur standard
Armlength	Longueur de bras nominal entre les satellites de LISA	mètres	5e9
StartTime	Temps de départ qui définit la position de LISA sur son orbite au démarrage du calcul.	secondes (de 0 à 1 an)	0
InitialRotation	Phase initial de la configuration du triangle de LISA (0 : satellite 1 en bas)	radians	0
Move	0 : les satellites de LISA sont fixés , 1: orbites ARTEMIS, 2: orbites MLDC	0 / 1 / 2	1
Order	Ordre du calcul des temps de vol : 0 - temps calculé à partir des positions des satellites , 1 - effet Sagnac , 2 - effet de relativité générale.	0 / 1 / 2	2

Table 5: Liste des paramètres utilisés pour configurer la simulation dont le type est **Detector**.

Nom		Détails	Unités	Valeur standard
LaserPower		Puissance laser.	Watt	1
PhaMetFilter		Active ou désactive le filtre du phasemètre.	On/Off	On
PhaMetFilter-Parameters	attnuation	Atténuation du filtre	dB	180
PhaMetFilter-Parameters	oscillation	Oscillations en bande passante du filtre	dB	0.1
PhaMetFilter-Parameters	FactFmes-ForHighFreq	Factor pour la fréquence de transition haute (fréquence de transition haute sur la fréquence de mesure)		0.1
PhaMetFilter-Parameters	FactFmes-ForLowFreq	Factor pour la fréquence de transition basse (fréquence de transition basse sur la fréquence de mesure)		0.3

Table 6: Liste des paramètres utilisés pour configurer la simulation dont le type est **Records**.

Nom	Détails	Valeur standard
SignalSC 1	Défini le nom du fichier de sortie qui contient les données brutes des phasmètres du satellite 1.	SC1.txt
SignalSC 2	Défini le nom du fichier de sortie qui contient les données brutes des phasmètres du satellite 2.	SC2.txt
SignalSC 3	Défini le nom du fichier de sortie qui contient les données brutes des phasmètres du satellite 3.	SC3.txt
Delay	Défini le nom du fichier de sortie qui contient les 6 temps de vol en secondes.	Delay.txt
Position	Défini le nom du fichier de sortie qui contient les coordonnées écliptique des 3 satellites en mètres.	Delay.txt
TDI	Défini le nom du fichier de sortie qui contient les flux de données des générateurs TDI.	TDI.txt

Table 7: Liste des paramètres utilisés pour configurer la simulation dont le type est **GW** (voir la figure 3) **Mono** défini une onde monochromatique, **Binary** défini un système binaire avec une fréquence fixée et **PostNewtonBinary** défini un système binaire qui est calculé dans l'approximation Post-Newtonienne.

GW Type	Nom	Détails	Unités	Valeur standard
All	Bet	Latitude éclipitique (déclination) de la direction de la source (du Sun à source)	degrées	de -90 à 90
All	Lam	Longitude éclipitique (déclination) de la direction de la source (du Sun à source)	degrées	de 0 à 360
All	Psi	Polarisation de la source : angle angle entre le référentiel d'observation et le référentiel de la source	degrées	de 0 à 360
Mono	f	Fréquence de la source	Hertz	
Mono	hp	Amplitude de la composante + .	rien	1e-21
Mono	hc	Amplitude de la composante \times .	rien	1e-21
Mono	Phi0hp	Phase initiale de la composante +.	radians	0 à 2π
Mono	Phi0hc	Phase initiale de la composante \times .	radians	0 à 2π
Binary	M1	Masse du premier objet	masse solaire	
Binary	M2	Masse du second objet	masse solaire	
Binary	forb	Fréquence orbital du système binaire.	Hertz	
Binary	inc	Inclination : angle between angular momentum and source's direction	degrees	de -90 à 90
Binary	phi0	Phase initial du système binaire.	radians	0 à 2π
Binary	r	Distance détecteur - source.	KiloParsec	
PostNewtonBinary	M1	Masse du premier objet	masse solaire	
PostNewtonBinary	M2	Masse du second objet	masse solaire	
PostNewtonBinary	tcoal	Temps de coalescence (à 0 au début de la simulation).	secondes	
PostNewtonBinary	inc	Inclinaison : angle entre le moment angulaire et la direction de la source	degrées	de -90 à 90
PostNewtonBinary	phase	Phase initiale du système binaire.	radians	0 to 2π
PostNewtonBinary	r	Distance détecteur - source.	KiloParsec	
PostNewtonBinary	type	Type de calcul Post-Newtonian : 1 pour 1 PN et 2 pour 2.5 PN.	1 / 2	2
PostNewtonBinary	omega0	Phase Post-Newtonian arbitraire.	degrées	1
PostNewtonBinary	taud0	Phase Post-Newtonienne sur le détecteur.		10
PostNewtonBinary	gw	Facteur Post-Newtonien.		1

Table 8: Liste des paramètres utilisés pour configurer la simulation dont le type est **Noise** (see figure 4 for localization).

Parameter type	Nom	Détails	Unités	Valeur standard
Localization	Laser i j	Bruit du laser associé au banc optique du satellite i pointant vers le satellite i+1 si j = 0 et vers le satellite i-1 si j = 1.		
Localization	Mass i j	Bruit de la masse inertielle situé dans le banc optique i j (i.e. banc optique du laser i j).		
Localization	Shot i j	Shot noise du phasemètre qui mesure l'interférence entre le faisceau du satellite distant le faisceau local du banc optique i j (i.e. banc optique du laser i j).		
Localization	OOPN i j	Autres bruits sur le chemin optique situé dans le banc optique i j (i.e. banc optique du laser i j).		
Type	White	Bruit blanc au niveau spécifié.	$\frac{\Delta\nu}{\nu} \cdot Hz^{-1/2}$ unit	1e-13
Type	Filter_1of	Bruit filtré en 1/f au niveau spécifié.	$\frac{\Delta\nu}{\nu} \cdot Hz^{-1/2}$ unit	1.59e-24
Type	Filter_f	Bruit filtré en f au niveau spécifié.	$\frac{\Delta\nu}{\nu} \cdot Hz^{-1/2}$ unit	3.49e-19
Type	Filter_fLosP	Bruit filtré en f au niveau spécifié proportionnel à la longueur des bras et inversement proportionnelle à la racine carrée de la puissance.	$\frac{\Delta\nu}{\nu} \cdot Hz^{-1/2}$ unit	2.30e-19
Type	FilterCoef - alpha - beta - stabiliza- tion	Bruit filtré où les coefficients du filtre sont spécifié explicitement : Coefficient reccursif Coefficient direct Nombre de données nécessaire à la stabilisation du filtre	pas	10000

Table 9: Liste des paramètres utilisés pour configurer la simulation dont le type est **USO**. Il y a un UltraStable Oscillateur par satellite specified by **SC** followed by the spacecraft number

Nom	Détails	Unités	Valeur standard
offset	Offset de l'USO par rapport au temps courant	secondes	0.006
derivs	Derive de l'USO par rapport au temps courant en seconde par seconde	secondes	1e-7
noise	Bruit gaussien de l'USO par rapport au temps courant avec le σ spécifié	secondes	1e-7

Table 10: Liste des générateurs prédéfinis dans LISACode ; type **TDI**.

Nom	Détails	Pack Value (in LISACode)
<i>Any name</i>	Générateur TDI	à définir après le nom
X or Xf or X1s1	Michelson de génération 1.5 centré sur SC1	1 , 35 , 364 , 3653 , -4 , -53 , -521 , -5235
Y or Yf or X1s2	Michelson de génération 1.5 centré sur SC2	2 , 16 , 145 , 1461 , -5 , -61 , -632 , -6316
Z or Zf or X1s3	Michelson de génération 1.5 centré sur SC3	3 , 24 , 256 , 2542 , -6 , -42 , -413 , -4124
X2 or Xf2 or X2s1	Michelson seconde génération centré sur SC1	1 , 35 , 364 , 3653 , 36524 , 365253 , 3652521 , 36525235 , -4 , -53 , -521 , -5235 , -52361 , -523635 , -5236364 , -52363653
Y2 or Yf2 or X2s2	Michelson seconde génération centré sur SC2	2 , 16 , 145 , 1461 , 14635 , 146361 , 1463632 , 14636316 , -5 , -61 , -632 , -6316 , -63142 , -631416 , -6314145 , -63141461
Z2 or Zf2 or X2s3	Michelson seconde génération centré sur SC3	3 , 24 , 256 , 2542 , 25416 , 254142 , 2541413 , 25414124 , -6 , -42 , -413 , -4124 , -41253 , -412524 , -4125256 , -41252542
Alpha or alpha	Générateur de génération 1.5 α	-1 , -32 , -133 , 4 , 455 , 56
Beta or beta	Générateur de génération 1.5 β	-121 , -2 , -13 , 64 , 5 , 566
Gamma or gamma	Générateur de génération 1.5 γ	-21 , -232 , -3 , 464 , 45 , 6
P1	Générateur Beacon sans faisceau reçu sur SC1	25 , -63 , -22 , 66 , 642 , -216 , 1463 , -1425
Q1	Générateur Beacon sans faisceau reçu sur SC2	36 , -41 , -33 , 44 , 453 , -324 , 2541 , -2536
R1	Générateur Beacon sans faisceau reçu sur SC3	14 , -52 , -11 , 55 , 561 , -135 , 3652 , -3614
E1	Générateur Moniteur sans faisceau émis sur SC1	542 , 56 , -316 , -32 , -144 , 141 , 4 , -1
F1	Générateur Moniteur sans faisceau émis sur SC2	653 , 64 , -124 , -13 , -255 , 252 , 5 , -2
G1	Générateur Moniteur sans faisceau émis sur SC3	461 , 45 , -235 , -21 , -366 , 363 , 6 , -3

Table 11: Suite du tableau 10; type **TDI**.

Nom	Détails	Pack Value (in LISACode)
U1	Générateur Relay sans faisceau de SC3 à SC1 et de SC1 à SC2	145 , 1464 , -5 , -64 , 16 , 2 , -6542 , -656
V1	Générateur Relay sans faisceau de SC1 à SC2 et de SC2 à SC3	256 , 2545 , -6 , -45 , 24 , 3 , -4653 , -464
W1	Générateur Relay sans faisceau de SC2 à SC3 et de SC3 à SC1	364 , 3656 , -4 , -56 , 35 , 1 , -5461 , -545
A ou Aa ou AX	Générateur à bruit non-corrélé	$[X] \times -1/\sqrt{2}$, $[Z] \times 1/\sqrt{2}$
E ou Ea ou EX	Générateur à bruit non-corrélé	$[X] \times 1/\sqrt{6}$, $[Y] \times -2/\sqrt{6}$, $[Z] \times 1/\sqrt{6}$
T ou Ta ou TX	Générateur à bruit non-corrélé	$[X] \times 1/\sqrt{3}$, $[Y] \times 1/\sqrt{3}$, $[Z] \times 1/\sqrt{3}$
Ab ou AMLDC	Générateur à bruit non-corrélé	$[X] \times 2/3$, $[Y] \times -1/3$, $[Z] \times -1/3$
Eb ou EMLDC	Générateur à bruit non-corrélé	$[Y] \times -1/\sqrt{3}$, $[Z] \times 1/\sqrt{3}$
Tb ou TMLDC	Générateur à bruit non-corrélé	$[X] \times -\sqrt{2}/3$, $[Y] \times -\sqrt{2}/3$, $[Z] \times -\sqrt{2}/3$

Table 12: Orbits basic configuration : Position, X, Y, Z (in meters) of the three spacecraft at different times (in seconds) for a nominal armlength of $5 \cdot 10^6$ km.

Time of year (sec)	0	7865000	15730000	23595000
X_1	148139203885	-2145093689	-151008051907	-5067293342
Y_1	0	149589286122	1447675865	-149546915581
Z_1	-2467045747	35723456	2514822292	84388495
X_2	150301280330	2186867586	-148868371398	-748229640
Y_2	-2478588950	148328221452	-1034018214	-150818789722
Z_2	1287273238	-2121040808	-1224681458	2168940029
X_3	150301280330	2150754223	-148843921432	-760789288
Y_3	1287273238	150818900689	3970806949	-148327868749
Z_3	1286809645	2193080836	-1182122299	-2145580218

Phasemeter	Phasemeter SC	SC en vis-a-vis du banc optique	Code
s_1	1	2	1
s_2	2	3	2
s_3	3	1	3
s'_1	1	3	4
s'_2	2	1	5
s'_3	3	2	6

Table 13: Tableau donnant le codage utilisé dans TDI pour les bras.

Opérateur	Bras	Emetteur \rightarrow Récepteur	Code
D_1	1	$3 \rightarrow 2$	1
D_2	2	$1 \rightarrow 3$	2
D_3	3	$2 \rightarrow 1$	3
D'_1	1'	$2 \rightarrow 3$	4
D'_2	2'	$3 \rightarrow 1$	5
D'_3	3'	$1 \rightarrow 2$	6

Table 14: Tableau donnant la correspondance entre les chiffres du pack et le bras concerné par l'opérateur de retard.