NOTICE INDIVIDUELLE

François Vernotte

22 février 2007

Table des matières

CURRICULUM VITAE **3**

1 ENSEIGNEMENT **5**
1.1 EXPÉRIENCE PRÉLIMINAIRE . . . 5
1.1.1 Animation scientifique . . . 5
1.1.2 Expérience de Maître d'Internat . . . 5
1.2 ENSEIGNEMENT A L'UFR SCIENCES DE BESANÇON . . . 5
1.2.1 Monitorat de l'Enseignement Supérieur (1989-1991) . . . 5
1.2.2 Poste d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (1991-1992) . . . 6
1.2.3 Poste de Maître de Conférences (1992-2002) puis de Professeur (depuis 2002) . . . 6
1.2.4 Tutorat . . . 6
1.2.5 Commission de physique de l'UFR ST . . . 7
1.2.6 Projet de Master Recherche Européen "Temps et Fréquences" : . . . 7
1.2.7 Grand public . . . 7

2 RESPONSABILITÉS ADMINISTRATIVES **8**

3 RECHERCHE **10**
3.1 INTRODUCTION . . . 10
3.2 EXPÉRIENCE PRÉLIMINAIRE . . . 12
3.2.1 Astronomie amateur . . . 12
3.2.2 Stage de DEA . . . 12
3.2.3 Expérience professionnelle . . . 13
3.3 TRAVAUX RÉALISÉS À L'OBSERVATOIRE DE BESANÇON . . . 15
3.3.1 Thèse : Mesure de la stabilité temporelle des oscillateurs (1989-1991) . . . 15
3.3.2 La méthode multivariance (1991-1993) . . . 18
3.3.3 Étude d'un banc de mesure de stabilité temporelle à références multiples (depuis 1995) 20
3.3.4 Mesure des niveaux de bruit et des dérives d'un signal mal échantillonné (depuis 1992) 21
3.3.5 Étude de la stabilité temporelle des pulsars milliseconde (1992-1997) . . . 24
3.3.6 Collaborations internes . . . 26
3.3.7 Collaborations extérieures . . . 28
3.4 ENCADREMENT . . . 31
3.4.1 Stages d'IUT . . . 31
3.4.2 Stages de maîtrise/master 1 . . . 31
3.4.3 Stage de DESS/master professionnel . . . 31
3.4.4 Stage de DEA/master recherche . . . 32
3.4.5 Thèses . . . 32
3.4.6 Séjours post-doctoraux . . . 32
3.5 RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE . . . 33
3.5.1 Collaborations scientifiques . . . 33
3.5.2 Comités de lecture de revues internationales . . . 33
3.5.3 Conférences invitées et présidence de sessions . . . 33
3.5.4 Jurys de thèses et d'HDR . . . 33

3.5.5 Evaluation de structures universitaires 33
3.5.6 Relations avec le monde industriel - Contrats 34
3.5.7 Diffusion de la culture scientifique 34
3.6 PERSPECTIVES 36
3.6.1 HOROM : Réalisation d'horloge de référence à oscillateurs multiples. Application aux échelles de temps physique 36
3.6.2 Pulsars milliseconde et références spatio-temporelles 36
3.6.3 ACES 36

PUBLICATIONS **37**
A - Publications dans des revues internationales à comité de lecture 37
B - Autres publications, livres et ouvrages collectifs à comité de lecture 38
C - Articles publiés dans des actes de colloques internationaux 38
D - Mémoires universitaires 42

CURRICULUM VITÆ

François VERNOTTE

Né le 21 Octobre 1961 à Dole (Jura)
Marié, trois enfants

Adresse professionnelle :
Observatoire de Besançon
41 bis, avenue de l'Observatoire - B. P. 1615
25010 BESANÇON Cedex
Tél. : 03.81.66.69.00 (standard)
Tél. : 03.81.66.69.22 (ligne directe)
Fax : 03.81.66.69.44
E-mail : francois.vernotte-at-obs-besancon.fr

Adresse personnelle :
44, rue Georges Clémenceau
25000 BESANÇON
Tél. : 06.XX.XX.XX
E-mail : xxxxxxxxxxxxxxxxx@free.fr

Professeur des Universités de 2ème classe en 34ème section du CNU.
Directeur de l'Observatoire de Besançon.
Chargé de mission pour la diffusion de la culture scientifique à l'Université de Franche-Comté

DIPLÔMES

1980	Baccalauréat série C, Dole
1984	DEUG A, UFR Sciences et Techniques, Besançon
1985	Licence de Physique (Besançon), mention Assez Bien
1986	Maîtrise de Physique (Besançon), mention Assez Bien
1987	DEA Acousto-Opto-Electronique et Vibrations (Besançon), mention Très Bien
1991	Doctorat de l'Université de Franche Comté en Sciences pour l'Ingénieur, mention Très Honorable, soutenue le 14 Février 1991. Sujet : "***Stabilité temporelle des oscillateurs : nouvelles variances, leurs propriétés, leurs applications***". Directeur de thèse : Jean-Jacques Gagnepain.
1998	Habilitation à Diriger des Recherches, soutenue à l'Université de Franche-Comté (UFR Sciences et Techniques, Besançon) le 16 Janvier 1998.

EMPLOIS

1981-1987	Maître d'Internat (à Lons-le-Saunier, Mouchard et Besançon)
1987-1989	Ingénieur en Imagerie Médicale (société CARRAR, Saint-Germain-en-Laye)
1989-1991	Moniteur de l'Enseignement Supérieur à l'UFR Sciences et Techniques de Besançon
1991-1992	ATER à l'UFR Sciences et Techniques de Besançon
1992-1996	Maître de Conférences de 2ème classe à l'UFR Sciences et Techniques de Besançon, 34ème section du CNU
1996-2002	Maître de Conférences de 1ère classe à l'UFR Sciences et Techniques de Besançon, 34ème section du CNU
1998-2002	Expert à la Commission Permanente d'Accréditation Temps-Fréquence du COmité FRançais d'ACcréditation (COFRAC)
Depuis 2002	Professeur des Universités de 2ème classe à l'UFR Sciences et Techniques de Besançon, 34ème section du CNU

ENSEIGNEMENT

- Responsabilité de modules d'enseignement : "***électromagnétisme***" en DEUG MIAS 1ère année (jusqu'à 240 étudiants), "***traitement du signal***" dans le DEA 3I, "***exploitation statistique des mesures***" dans le DESS SMTII puis dans le master ELO 2ème année, "***astrophysique***" pour les PLC2 (compléments disciplinaires pour les titulaires du CAPES Physique-Chimie), "***physique relativiste***" en licence de sciences physiques 3ème année, "***physique et évolution stellaire***" en maîtrise de physique, "***théorie du signal et du bruit***" dans le DEA OM2S (filière microsystèmes), "***métrologie du temps et des fréquences***" dans le master ELO 2ème année.
- TD et TP en 1er et 2ème cycle dans les principaux domaines de la physique : mécanique, électricité, électromagnétisme, électronique, optique, thermodynamique, astrophysique, mesure.
- Création de nouveaux TP et informatisation d'anciennes manipulations. Gestion du matériel.
- Encadrement de 13 stagiaires (IUT, maîtrise, DESS, master).
- Diffusion de la culture scientifique dans le cadre de l'Université Ouverte, du Projet Aurore, de l'Observatoire et maintenant de l'Université de Franche-Comté. Nombreuses visites et séances d'observation à l'Observatoire de Besançon. Participation à l'enseignement d'astronomie en ligne (internet) de l'Observatoire de Besançon. Portage d'un projet de centre de diffusion de la culture scientifique dans le parc de l'Observatoire.

ACTIVITÉS ADMINISTRATIVES

Direction de l'Observatoire de Besançon (depuis le 29 avril 2002), direction de l'UMR UFC/CNRS 6091 (de 2004 à 2006), Conseil Scientifique de l'Université de Franche-Comté (de 1994 à 1998 puis à partir de 2002), Conseil de l'UFR Sciences et Techniques de Besançon (de 1996 à 2000 et depuis 2004), Commission de Spécialistes des sections 28, 30 et 34 de l'UFC (vice-président de 1998 à 2001, assesseur de 2001 à 2002), secrétaire de la Commission de Physique de l'UFR ST (de 1999 à 2001), Conseil de Laboratoire de l'Observatoire de Besançon (depuis 1991), chargé de mission pour la diffusion de la culture scientifique à l'Université de Franche-Comté (depuis 2006).

RECHERCHE

- Stabilité temporelle des oscillateurs : recherche de nouvelles méthodes d'analyse
- Réalisation d'une horloge de référence à oscillateurs multiples
- Participation à la réalisation de l'observatoire Auger (rayons cosmiques d'énergie extrême)
- Étude de la stabilité temporelle des pulsars millisecondes

Encadrement de 7 stages de DEA/master recherche, 6 thèses et 2 séjours post-doctoraux.
17 publications dans des revues internationales à comité de lecture, 6 participations à des livres et ouvrages collectifs et 47 articles dans des actes de congrès internationaux.

DIVERS

- Anglais lu, parlé, écrit. Notions d'allemand
- Notions d'administration système sous unix (linux)
- Programmation en C, perl, tcl-tk, fortran, basic et assembleur (6502 et 80386)
- Connaissance des logiciels Matlab et Mathematica
- Bonne maîtrise de la création de documents sous LaTeX et en html

Chapitre 1

ENSEIGNEMENT

1.1 EXPÉRIENCE PRÉLIMINAIRE

1.1.1 Animation scientifique

Passionné depuis longtemps l'astronomie, j'ai créé, avec quelques amis partageant le même intérêt, le Jura Astronomique Club de Champvans (J.A.C.C.) en 1978. Nous avons été en mesure, par l'intermédiaire de ce club, de mener à bien un certain nombre de projets (voir §3.2.1 page 12). Nous avons aussi assuré des activités de vulgarisation auprès d'un public plus large.

De plus, j'ai été employé à partir de 1980 par l'Association Nationale Sciences Techniques Jeunesse pour animer des camps d'astronomie pour les adolescents, ainsi que des stages de spécialisation du Brevet d'Aptitude à la Fonction d'Animateur.

J'ai aussi animé pendant deux ans un club d'informatique à Saint-Aubin (Jura), village dont je suis originaire.

1.1.2 Expérience de Maître d'Internat

J'ai été Maître d'Internat à temps complet pendant 6 années consécutives (d'octobre 1981 à septembre 1987). J'ai exercé cette activité dans divers lycées du Jura et du Doubs, tout en effectuant mes études (indiquées entre parenthèses dans la liste suivante) :

1981-1982	LEP Bâtiment, Lons-le-Saunier (première année de DEUG A)
1982-1983	LEP Bâtiment, Lons-le-Saunier (première année de DEUG A)
1983-1984	LEP Bâtiment, Lons-le-Saunier (deuxième année de DEUG A)
1984-1985	Lycée du Bois, Mouchard (Licence de Physique)
1985-1986	Lycée Jules Haag, Besançon (Maîtrise de Physique)
1986-1987	LEP Graviers Blancs, Besançon (DEA AOEV)

1.2 ENSEIGNEMENT A L'UFR SCIENCES DE BESANÇON

1.2.1 Monitorat de l'Enseignement Supérieur (1989-1991)

J'ai obtenu un poste de Moniteur de l'Enseignement Supérieur en Physique à l'UFR Sciences de Besançon en Décembre 1989 (tuteur : Guy Moreels). Ce poste, que j'ai conservé pendant deux années universitaires consécutives, m'a permis d'enseigner en :

DEUG B 1	TD et TP d'Optique
DEUG MPC 2	TP de Mécanique
Licence de Physique	TP de Mécanique
Préparation au CAPES de Physique	Manipulations de l'oral du CAPES.

1.2.2 Poste d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (1991-1992)

A la suite du monitorat, j'ai été recruté sur un poste d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (section 27-03 de l'ancienne classification du CNU) à l'UFR Sciences de Besançon. Je suis intervenu en :

DEUG B 1	TD et TP d'Optique, TD et TP d'Electricité
DEUG B 2	Cours et TD d'Electromagnétisme
DEUG MPC 2	TP de Mécanique
Licence de Physique	TP de Mécanique, TP d'Optique
IUFM 2ème année	Cours d'Astronomie (compléments disciplinaires)

1.2.3 Poste de Maître de Conférences (1992-2002) puis de Professeur (depuis 2002)

J'ai été nommé Maître de Conférences ($34^{ème}$ section du CNU : astronomie et astrophysique) à l'UFR Sciences de Besançon en Septembre 1992. J'ai conservé une grande partie des enseignements que j'assurais en tant qu'ATER. Cependant, après la réforme des DEUG de 1993, un certain nombre de modules nouveaux étant apparus, on m'a confié la responsabilité d'un module de Physique du DEUG MIAS $1^{ère}$ année. J'ai assuré ou assure encore des enseignements en :

DEUG B 1 (1989-1992)	TD et TP d'Optique
DEUG B 2 (1992-1994)	Cours et TD d'Electromagnétisme
DEUG MPC 2 (1992-1994)	TP de Mécanique
DEUG SPI 2 (1992-1994)	TP d'Electricité
DEUG MIAS 1 (1993-2001)	Cours, TD et TP d'Electromagnétisme (240 étudiants)
DEUG TI 1 (1993-2000)	Cours et TD d'Astrophysique
DEUG SM-PC 2 (1994-1999)	TP de Mécanique
DEUG SM-P 2 (1994-1995)	TP de Physique de la Mesure
DEUG SM-P 2 (1995-1996)	TP de Mécanique informatisés
DEUG SM 2 (2000-2004)	TD et TP de thermodynamique
DEUG TI 2 (1996-2001)	TP de Thermodynamique
DEUG 2 (2002-2004)	Cours d'épistémologie
Licence de Physique (1990-1993)	TP d'Optique
Licence de Physique (1992-2001)	TP de Mécanique
Prépa CAPES Physique (1990-1991)	Manipulations de l'oral du CAPES.
IUFM 2ème année (1993-2001)	Cours d'Astronomie
DESS SMTII (1997-2001)	Cours, TD et TP d'Exploitation Statistique des Mesures
DEA OM2S (2001-2004)	Cours et TD de métrologie du temps et des fréquences
DEA 3 I (1995-2001)	Cours et TD de Traitement du Signal

Depuis le passage au LMD (2004) :

Licence PC 2 (2004-)	Cours d'histoire des sciences
Licence PC 2 (2004-)	Cours d'astrophysique
Licence P-PC 3 (2004-)	Cours et TD de physique relativiste
Master ELO 2 (2004-)	Cours et TD de métrologie du temps et des fréquences
Master ELO 2 (2006-)	Cours, TD et TP d'Exploitation Statistique des Mesure
Master 3I 2 (2005-)	Cours et TD de Traitement du Signal

1.2.4 Tutorat

De 1993 à 1996, j'ai été tuteur d'un Allocataire Moniteur Normalien, Gilles Zalamansky, qui a effectué sa thèse à l'Observatoire de Besançon et qui enseignait à l'UFR Sciences de Besançon.

1.2.5 Commission de physique de l'UFR ST

J'ai été élu au bureau de la commission de physique de l'UFR ST en 1997 et secrétaire en 1999.
La commission de physique est une instance de l'UFR ST chargée d'organiser la répartition des enseignements de physique de cette composante. En particulier, nous avions recensé tous les enseignements, envoyé des fiches de voeux à tous les intervenants potentiels et instauré des règles permettant de trancher lorsque plusieurs enseignants désiraient effectuer le même cours. Cette commission a malheureusement été dissoute en 2001 faute de nouveaux candidats, lorsque notre mandat a expiré.

1.2.6 Projet de Master Recherche Européen "Temps et Fréquences" :

Je suis initiateur de ce projet depuis 1999.
La recherche bisontine dans le domaine du Temps-Fréquence, représentée dans 3 laboratoires (Femto/Laboratoire de Chronométrie Électronique et Piézoélectricité, Femto/Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs et Observatoire de Besançon) est une activité reconnue comme étant un pôle d'excellence. Cependant, cette discipline est actuellement peu représentée dans les troisièmes cycles de Besançon. Il est à noter qu'il n'existe d'ailleurs pas de diplôme de ce type en France, ni même à plus grande échelle. L'objectif de ce projet est de combler cette lacune en créant un master recherche d'ouverture européenne qui proposerait une formation de très haut niveau, comprenant les bases théoriques et les applications du Temps-Fréquence. L'Université d'York (UK) et de Neuchâtel (Suisse) sont partenaires de ce projet et accueilleront chacune un semestre de formation, de même que l'UFC. Le $4^{ème}$ semestre sera consacré à un stage de recherche dans un laboratoire temps-fréquence européen. Depuis 2004, ce projet s'appuie sur une version locale à Besançon : le parcours temps-fréquence du master ELectronique et Optique (ELO).

1.2.7 Grand public

Depuis mon arrivée à l'Observatoire de Besançon en 1989, j'ai présenté plusieurs conférences de vulgarisation en Astronomie dans le cadre de l'Université Ouverte :

- un cycle de cours d'astronomie à l'Observatoire (Concepts de base, la Terre mobile et le Temps, les planètes, la cosmologie, etc ...) ;
- des conférences ponctuelles dans les diverses antennes de l'Université Ouverte (Besançon, Dole, Gray, Vesoul, Exincourt, Lons-le-Saunier, Saint-Claude) ainsi que pour des associations (Société Astronomique de Bourgogne, Société d'Histoire Naturelle de Besançon, etc...).

Par ailleurs, j'anime fréquemment des visites de l'Observatoire pour des scolaires ainsi que des séances d'observation.

Enfin, j'ai participé à l'élaboration du cours d'astronomie en ligne (par internet) de l'observatoire de Besançon. Je suis responsable de l'introduction au module de découverte intitulée "Échelles et structures dans l'univers".

Pour de plus amples détails sur ma participation à la diffusion de la culture scientifique, on peut se reporter à la partie "Rayonnement scientifique" dans le chapitre "Recherche" (section 3.5.7).

Chapitre 2

RESPONSABILITÉS ADMINISTRATIVES

- **Directeur de l'Observatoire de Besançon :** nommé en 2002.
  L'observatoire de Besançon est un Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU). À ce titre, et conformément aux décrets 85-657 et 85-1243 relatifs aux OSU, il possède une double tutelle : l'Université de Franche-Comté, dont il est une composante au même titre que les UFR et IUT (article 33 de la loi 84-52), et l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) qui est un des instituts du CNRS. C'est grâce à son statut d'OSU que l'observatoire de Besançon peut accueillir des astronomes-adjoints et astronomes.

- **Directeur du Laboratoire d'Astrophysique de l'Observatoire de Besançon (LAOB), UMR CNRS/UFC 6091 :** de 2004 à 2006.
  Jusqu'au 31 décembre 2006, l'UMR 6091 était le seul laboratoire de recherche de l'observatoire de Besançon. Elle était constituée de 40 membres se répartissant pour moitié entre les chercheurs et les IATOS. L'UMR 6091 était structurée en 3 équipes de recherche : Astrophysique des Grands Relevés, Dynamique et Photophysique des Milieux Dilués, Temps-Fréquence. Depuis le 1er janvier 2007, cette UMR a été dissoute par fusion dans l'institut UTINAM, UMR 6213 (voir ci-dessous).

- **Conseil de l'UFR Sciences et Techniques :** élu en 1996 et en 2004.
  Je suis membre de la *commission recherche* de l'UFR ST.

- **Commission de physique de l'UFR ST :** élu au bureau en 1997 et secrétaire en 1999.
  Voir la partie enseignement (section 1.2.5).

- **Commission de Spécialistes des sections 28, 30 et 34 du CNU :** élu en 1995, 1998, 2001 et 2004
  J'ai été vice-président de la CSE 28-30-34 de 1998 à 2001 et assesseur de 2001 à 2002.

- **École Doctorale Louis Pasteur :** de 2004 à 2006.
  J'ai représenté le LAOB à l'ED Louis Pasteur qui regroupe les laboratoires de mathématiques, physique, chimie et économie de l'UFC.

- **Conseil Scientifique de l'Université de Franche-Comté :** élu en 1994, en 2002 et en 2006.
  À ce titre, j'ai été membre de diverses commissions :
  – *Commission des moyens*, dont le but est de définir des indicateurs pertinents de priorité des équipes en matière de recrutement et de financement.
  – *Commission internationale*, visant à promouvoir la politique internationale de l'Université de Franche-Comté.
  – *Commission diffusion de la culture scientifique et technique*, qui devrait à terme déboucher sur la création d'un service à part entière, doté d'un budget et de personnel.

- **Chargé de mission pour la diffusion de la culture scientifique à l'Université de Franche-Comté :** nommé en 2006.
  L'Université de Franche-Comté a pris la mesure de l'enjeu considérable que représente la diffusion de la culture scientifique, en terme d'image, et d'attractivité pour les futurs étudiants. C'est pour mener à bien cette double tâche que j'ai été nommé chargé de mission avec pour objectif d'offrir une offre culturelle alléchante pour le grand public et de présenter une vitrine des recherches réalisées dans notre Université.

- **Participation à la création de l'institut UTINAM (UMR 6213) par fusion des LCMI, LPM et LAOB :**
  La volonté affichée par le CNRS d'aller vers des laboratoires de taille plus importante a suscité de nombreuses réflexions sur l'organisation de la recherche à tous les niveaux. À Besançon, dans le domaine des sciences fondamentales par exemple, deux projets parallèles ont vu le jour : le premier, à l'initiative des directeurs des laboratoires impliqués, concernait la fusion du Laboratoire de Physique Moléculaire (LPM, UMR CNRS/UFC 6624) et du Laboratoire de Chimie des Matériaux et Interfaces (LCMI, EA UFC 474) pour former une UMR unique ; le second, à l'initiative de chercheurs du LPM et du LAOB, visait à établir des collaborations fortes entre les thèmes de recherche de ces deux laboratoires afin de définir des axes communs. Rapidement, l'intérêt scientifique que ces deux projets ont suscité a supplanté la motivation initiale de ce regroupement qui était surtout la réponse à l'incitation des tutelles. Récemment, ces deux pistes ont fusionné en un projet unique d'UMR en sciences fondamentales, regroupant l'ensemble du LCMI, du LPM et du LAOB, soit environ 120 membres.
  Sans vouloir m'attribuer la paternité de ce projet ambitieux, j'ai néanmoins la prétention de croire y avoir joué un rôle important. Je résumerais mon action en quatre points :
  – En premier lieu, je pense être celui qui a convaincu Georges Jolicard, professeur au LAOB, d'être le porteur de ce projet. En effet, physico-chimiste travaillant à l'observatoire depuis plus de 10 ans sur des molécules d'intérêt astrophysique, chercheur de renommée internationale, reconnu également pour ses qualités humaines, j'étais persuadé qu'il présentait toutes les qualités pour exercer cette fonction et qu'il saurait représenter toutes les sensibilités des trois laboratoires. Un vote de confiance à plus de 83 % a confirmé mon choix.
  – En second lieu, je pense également être pour beaucoup dans la reconnaissance de la pertinence scientifique du projet par nos instances de tutelle (UFC et CNRS) aussi bien que par les collègues des trois laboratoires.
  – Ensuite, Georges Jolicard et moi avons œuvré à convaincre nos collègues qui n'étaient pas concernés par les projets transverses, de l'intérêt que présentait ce projet pour eux aussi. Il s'agit effectivement d'asseoir les travaux interdisciplinaires sur des spécificités fortes et reconnues en chimie, physique et astronomie.
  – Enfin, j'ai eu à cœur de m'assurer de la pérennité de la structure "Observatoire des Sciences de l'Univers" dans ce cadre. Ainsi, si l'observatoire ne peut pas contenir l'ensemble du nouveau laboratoire pour des raisons de thématiques scientifiques, nous étudions la possibilité qu'il devienne une fédération des équipes de recherche autour de l'astronomie et de l'environnement.

  Je suis plus que jamais convaincu par ce projet scientifique et suis confiant dans l'avenir de l'institut UTINAM.

Chapitre 3

RECHERCHE

3.1 INTRODUCTION

Les activités de recherche que j'ai entreprises, bien que très différentes dans leurs applications avant et après mon arrivée à l'Observatoire de Besançon, reposent néanmoins sur une même méthodologie et sur l'utilisation des outils du traitement du signal : modélisation, simulation, traitement statistique des données, problème inverse.

Je mentionne dans les pages suivantes les projets que nous avons réalisés dans le cadre d'un club d'Astronomie amateur (de 1980 à 1986), car, sans être à proprement parler de la recherche, elles ont joué en ce qui me concerne un rôle important d'initiation à la démarche scientifique. Nous avons en effet été amenés à définir pour chaque projet un objectif scientifique et une méthodologie à suivre, à acquérir des mesures puis à les exploiter. Le projet d'étude de morphologie des galaxies nous a même permis d'utiliser du matériel professionnel (un télescope de l'Observatoire du Pic du Midi), avec des astronomes professionnels, et de développer nous-même un système de numérisation d'images photographiques.

C'est lors de mon stage de DEA (1987) que j'ai été intégré dans une équipe de recherche. Ce stage, réalisé au Laboratoire d'Optique P. M. Duffieux de Besançon, avait pour but d'appliquer la transformation de Karhunen-Loève à la mesure de largeur de traits sur circuits intégrés.

J'ai ensuite travaillé comme ingénieur en traitement d'image dans une société privée, spécialisée dans le développement de systèmes d'imagerie médicale (1987-1989). Au cours de cette période, j'ai développé des algorithmes notamment d'extraction de contour et de filtrage numérique.

Depuis Février 1989, date où j'ai commencé ma thèse, j'effectue mon travail de recherche au service Temps-Fréquence de l'Observatoire de Besançon. Le sujet de ma thèse, que j'ai réalisée sous la direction de Jean-Jacques Gagnepain, portait sur la mesure de la stabilité temporelle des oscillateurs. J'ai été amené à travailler sur les variances, qui sont les outils statistiques habituellement utilisés pour identifier les différents types de bruit et en mesurer le niveau. J'ai développé une méthode entièrement originale de mesure de bruits : la méthode à variances multiples. Cette méthode est basée sur l'utilisation sur un même signal d'autant de variances qu'il y a de types de bruit à mesurer. Les niveaux de bruit sont alors obtenus par la résolution d'un système linéaire. J'ai pu montrer que cette méthode possédait à la fois une meilleure sensibilité et une meilleure dynamique que la méthode à variance unique.

Après ma thèse, j'ai amélioré cette méthode en développant l'analyse multivariance dont la méthode précédente est un cas particulier de même que la méthode à variance unique. L'analyse multi- variances utilise un nombre quelconque de variances et plusieurs temps d'intégration différents. Le résultat est l'ensemble des niveaux de bruit les plus probables au sens des moindres carrés. Le principal avantage de cette méthode réside dans le fait qu'elle fournit, en plus de la mesure des niveaux de bruit, une estimation du domaine d'incertitude lié à chacune de ces mesures. Cette nouvelle technique peut être considérée comme une méthode d'analyse spectrale du bruit des oscillateurs.

Les suites de ce travail s'ouvrent sur deux directions : une continuité directe dans l'étude de la stabilité temporelle des oscillateurs, avec notamment le développement d'une horloge de référence à oscillateurs multiples et une contribution à Galileo, et une volonté de s'ouvrir sur des applications plus astrophysiques telles que l'étude de la stabilité temporelle des pulsars milliseconde et l'observatoire Auger. L'intersection entre ces deux thèmes est constitué par le traitement du signal et l'analyse statistique. Par exemple, la mesure des niveaux

de bruit de signaux mal échantillonnés s'applique aussi bien aux horloges qu'aux données reçues des pulsars. De même, l'analyse bayésienne des données a été utilisée pour les oscillateurs classiques, les pulsars milliseconde et sera utilisée pour confirmer ou infirmer l'isotropie de la provenance des rayons cosmiques détectés par l'observatoire Auger.

Depuis que je suis à l'Observatoire, j'ai aussi été amené à collaborer avec d'autres équipes de cet établissement, à développer des liens interlaboratoires locaux étroits, des collaborations nationales (avec le CNES, pour Galileo) et internationales (Auger, projet HOROM).

Ces travaux ont donnés lieu à 17 publications dans des revues internationales, 6 participations à des livres et ouvrages collectifs à comité de lecture et 47 communications dans des congrès internationaux.

3.2 EXPÉRIENCE PRÉLIMINAIRE

3.2.1 Astronomie amateur

Avec trois amis, passionnés comme moi par l'astronomie, nous avons créé en 1978 le Jura Astronomique Club de Champvans (JACC). Outre des activités de vulgarisation (voir §1.1.1 page 5) nous avons réalisé deux projets : la mise en évidence de la duplicité de l'étoile Algol et une étude de la morphologie des galaxies en fonction du type spectral des étoiles les composant.

Duplicité d'Algol (1980-1982)

Algol est une étoile double spectroscopique, c'est à dire que ses deux composantes ne peuvent être séparées visuellement mais que son spectre montre qu'il est la somme du spectre de deux étoiles de type spectral différent. La première phase du projet a consisté à réaliser un spectrographe à partir d'un télescope de 200 mm de diamètre prêté par la Fédération des Oeuvres Laïques du Jura. Ensuite, nous avons profité de la campagne astronomique organisée en 1981 par l'Association Nationale Science Technique Jeunesse, dont le JACC était adhérent, pour l'acquisition de nos mesures. Cette campagne nous a permis de bénéficier de l'infrastructure (hébergement, fournitures, conseils d'astronomes professionnels, etc...) mise à la disposition des clubs participants, dans un site de très bonne qualité observationnelle (Esteng, Alpes Maritimes). En plus des différents spectres d'Algol que nous avons réalisés, nous avons étudié la courbe photométrique d'Algol (Algol est une variable à éclipses). Nous avons ainsi pu mettre en évidence qu'Algol était composée de deux étoiles de type K0 et B8, tournant l'une autour de l'autre en 2,8 jours. Nous avons aussi pu mesurer sa distance, la température des étoiles, leur masse et le rayon de leur orbite. Cette étude a été primée lors du prix scientifique Philips de 1982.

Morphologie de galaxies (1982-1986)

Grâce à la dotation du prix Philips 1982 (5000 F), nous avons décidé de consacrer cette somme à une deuxième étude dont le but était de chercher des corrélations entre la forme des galaxies (sphériques, elliptiques, spirales, barrées, irrégulières) et la répartition des divers types d'étoiles les composant. Pour mener à bien ce projet, il était nécessaire de disposer d'un télescope de diamètre important afin de pouvoir étudier un nombre suffisant de galaxies d'une part, et d'avoir une résolution suffisante d'autre part. Nous avons eu la chance d'obtenir en 1984 une semaine de temps de télescope à l'observatoire du Pic du Midi (télescope de 60 cm de diamètre à la disposition des amateurs). L'acquisition a consisté à réaliser des clichés d'une dizaine de galaxies à l'aide de filtres différents (UV, bleu et vert), l'étalonnage ayant été réalisé sur deux amas ouverts dont les étoiles ont des types spectraux connus. Les photographies ainsi réalisées grâce à un système que j'avais conçu et réalisé (le courant de sortie d'une photodiode, mesurant l'opacité d'une région du film, était numérisé puis stocké sur disquette ; le micro-ordinateur commandait deux moteurs pas à pas pour le balayage de l'image photographique). Ce système nous a permis de réaliser une carte d'indice de couleur des différentes galaxies. Nous avons pu mettre en évidence que les galaxies sphériques, elliptiques ainsi que le noyau des galaxies spirales étaient composés d'étoiles vieilles, tandis que les bras des galaxies spirales étaient constitués d'étoiles jeunes. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que, une fois le gaz des bras condensé en étoiles, les galaxies auraient tendance à se concentrer en une forme sphérique ou elliptique.

3.2.2 Stage de DEA

"***Application de la transformation de Karhunen-Loève à la mesure de largeur de traits sur circuits intégrés.***" (réalisé en 1987 au Laboratoire d'Optique P. M. Duffieux, Besançon).

Les problèmes liés à la miniaturisation et à l'augmentation de la rapidité des circuits intégrés nécessitent la mise en oeuvre d'une métrologie adaptée, permettant des mesures précises des motifs gravés sur les substrats. Dans ce domaine, le Laboratoire d'Optique P. M. Duffieux (Besançon) s'est vu confier l'étude théorique d'un système de mesure automatique de largeur de traits sur circuits intégrés. Le sujet de ce stage s'inscrivait dans ce cadre et consistait en l'analyse statistique des données recueillies sur un même objet suivant différentes techniques d'acquisition.

Les données étaient obtenues expérimentalement par la lecture d'une barrette CCD (1024 $\times$ 1 pixels) dans le plan image d'un microscope. Elles étaient ensuite stockées et traitées par un micro-ordinateur. Le but du stage était d'étudier l'intérêt du traitement de ces données par la transformation de Karhunen-Loève pour augmenter la précision sur les mesures de largeur de traits. Proche de l'analyse en composantes principales, cette méthode consiste à traiter N différentes images (unidimensionnelles dans ce cas) d'une même scène, acquises différemment (pour différentes longueurs d'onde d'éclairage, pour différentes régions d'un même trait, pour différentes défocalisations). Ensuite, considérant chaque pixel comme étant un vecteur dont les N composantes sont les intensités de ce pixel dans chacune des N images, on effectue un changement de base de façon à obtenir N nouvelles images, appelées canaux, combinaisons linéaires des images de départ, mais ayant pour particularité d'être totalement décorrélées entre elles (diagonalisation de la matrice des covariances des N images). De plus, la quantité d'information portée par chacun de ces canaux est très différente et peut être facilement quantifiée grâce aux valeurs propres du système matriciel conduisant au changement de base : on ordonne ainsi les canaux suivant leur quantité d'information décroissante. Le bruit, complètement décorrélé d'une image à l'autre, est donc rejeté sur les derniers canaux contenant très peu d'information, alors que l'information utile est concentrée sur les premiers canaux (premier canal, éventuellement premier et deuxième canaux). Deux opérations sont donc simultanément réalisées : une amélioration notable du rapport signal sur bruit et une compression des données.

Les résultats obtenus au cours de ce stage ont confirmé l'intérêt de cette méthode pour cette application et cette procédure a été intégrée dans un algorithme de mesure automatique de largeur de traits.

De plus, cette étude a donné lieu à la rédaction d'un article (Ref. A.1).

3.2.3 Expérience professionnelle

Traitement d'images médicales en angiographie numérisée.
(poste d'ingénieur à la société CARRAR, Saint-Germain en Laye, 1987- 1989)

Logiciel de quantification de sténoses :

Le but de ce travail était d'implanter dans un système d'imagerie médicale existant, un logiciel permettant de mesurer des diamètres de veines ou d'artères, sur une longueur donnée, afin de détecter et de mesurer d'éventuels rétrécissements des vaisseaux (sténose).

En angiographie numérisée, pour visualiser les vaisseaux sanguins en lumière X, on injecte un produit de contraste, opaque aux rayons X, dans la veine ou l'artère à étudier. Ensuite, pour éliminer les structures osseuses, on soustrait l'image obtenue avant injection de l'image après injection. De plus, en effectuant la soustraction du logarithme de chacune de ces images (logarithme de l'intensité de chaque pixel), on obtient une image résultante dont les intensités sont proportionnelles, à une constante additive près, à la quantité de produit de contraste traversée, donc au diamètre du vaisseau (voir figure 3.1).

FIG. 3.1 - Image soustraite en angiographie numérisée. Une sténose est nettement visible sur l'artère rénale à gauche de l'aorte.

Il est évident qu'un tel procédé ne peut être mis en oeuvre qu'en imagerie numérique. Le matériel utilisé était un processeur d'images 512 $\times$ 512 pixels relié à un mini-ordinateur. L'algorithme se décomposait en deux parties : la recherche du contour du vaisseau entre deux points choisis par l'utilisateur en utilisant une technique de seuillage associée à une recherche des gradients maxima de l'image d'une part, et, d'autre part, le calcul des diamètres et des épaisseurs du vaisseau représentés en fin de calcul (temps de calcul inférieur à 5 secondes) sous la forme d'un graphe et d'une représentation tridimensionnelle mettant en évidence les sections minimales et maximales, ainsi que l'obstruction correspondante.

Ce logiciel a été intégré aux produits ICAR, MDR2 et MERCURE commercialisés par la société CARRAR et fonctionne en routine dans divers hôpitaux et cliniques.

Logiciel d'imagerie médicale haute définition (1024 $\times$ 1024 pixels) :

Le travail effectué a été surtout centré sur la création d'une bibliothèque de sous-programmes bas-niveaux sur un nouveau processeur d'images 1024 $\times$ 1024 pixels (co-développé avec la société américaine MEGAVISION) afin de créer un système interactif d'angiographie numérisée haute définition.

Le travail a consisté à développer de nouveaux algorithmes d'optimisation du contraste des images (en particulier en soustraction logarithmique), de manipulation des histogrammes (équalisation linéaire et gaussienne des images) et de filtrage des images (Laplacien, Sobel, passe-haut, passe- bas, ...).

Ce système est commercialisé depuis le début de l'année 1989 et fonctionne notamment à hôpital de Lariboisière (Paris), où il a été en partie développé depuis Novembre 1988.

3.3 TRAVAUX RÉALISÉS À L'OBSERVATOIRE DE BESANÇON

3.3.1 Thèse : Mesure de la stabilité temporelle des oscillateurs (1989-1991)

"***Stabilité temporelle des oscillateurs : nouvelles variances, leurs propriétés, leurs applications.***"
(réalisée à l'Observatoire de Besançon, sous la direction de J. J. Gagnepain)

Les oscillateurs subissent des fluctuations de phase et de fréquence qui limitent leur stabilité. Ces fluctuations sont dues à des sources de bruits d'origine interne (agitation électronique dans le résonateur ou dans les autres composants) ou externe (environnement thermique, mécanique, électrique, magnétique, ...).

On modélise généralement le bruit présent dans le signal délivré par un oscillateur par une densité spectrale en lois de puissances. On peut ainsi caractériser les différentes sources de bruit, chacune de ces sources correspondant à une loi de puissance particulière. La mesure de la contribution de ces sources est nécessaire pour connaître leur origine et y remédier afin d'améliorer les performances des oscillateurs.

Habituellement, on obtient une estimation des différents types de bruits présents dans un signal par l'utilisation d'une variance (variance de Allan, variance de Picinbono, ...). Les variances sont des outils statistiques définis dans le domaine temporel par leur séquence de calcul et dans le domaine des fréquences par leur fonction de transfert (qui est la transformée de Fourier de leur séquence de calcul). En faisant varier le temps d'intégration t de la variance, on obtient une courbe. Cette courbe est caractéristique du type de bruit présent dans le signal : un bruit en f^{α} donne une courbe de variance en τ^{μ} avec, généralement, $\mu = -1 - \alpha$ (voir table 3.1). L'avantage d'étudier une courbe de variance plutôt que d'étudier directement la densité spectrale, réside dans le fait que les courbes de variance sont déterministes alors que la densité spectrale présente un caractère purement aléatoire (voir figure 3.2). En effet, c'est seulement l'espérance mathématique de la densité spectrale réalisée sur une infinité de processus qui est déterministe et suit le modèle en lois de puissances. Cependant, la sensibilité de la variance utilisée, qui diffère pour chaque type de bruit, limite cette méthode.

$S_y(f)$	$h_{-2}f^{-2}$	$h_{-1}f^{-1}$	$h_0 f^0$	$h_{+1}f^{+1}$	$h_{+2}f^{+2}$
$\sigma_y^2(\tau)$	$\frac{2\pi^2 h_{-2}\tau}{3}$	$2\ln(2)h_{-1}$	$\frac{h_0}{2\tau}$	$\frac{h_{+1}\left[1.038 + 3\ln(2\pi f_h \tau)\right]}{4\pi^2\tau^2}$	$\frac{3h_{+2}f_h}{4\pi^2\tau^2}$

TAB. 3.1 – Réponse de la variance de Allan pour les différents types de bruit.

Simulation de bruits

La première étape de ce travail de recherche a consisté à développer un algorithme de génération des divers types de bruit afin de mesurer la précision des résultats obtenus par les différentes variances. La base utilisée a été le générateur pseudo-aléatoire du compilateur C. Ce générateur donne un entier entre 0 et 32767 avec

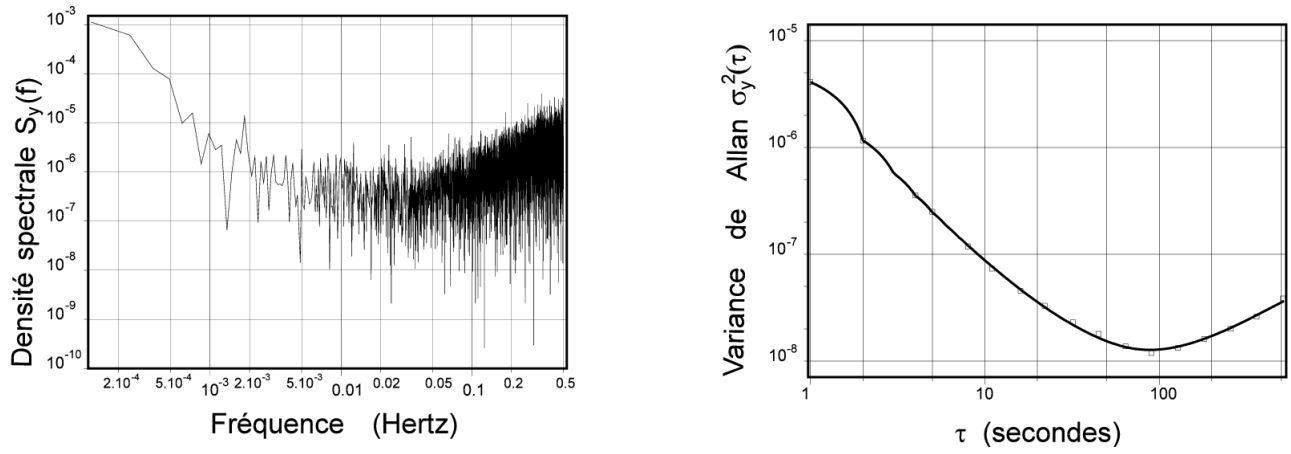

FIG. 3.2 – Densité spectrale (à gauche) et courbe de variance (à droite) d'un signal contenant plusieurs types de bruit.

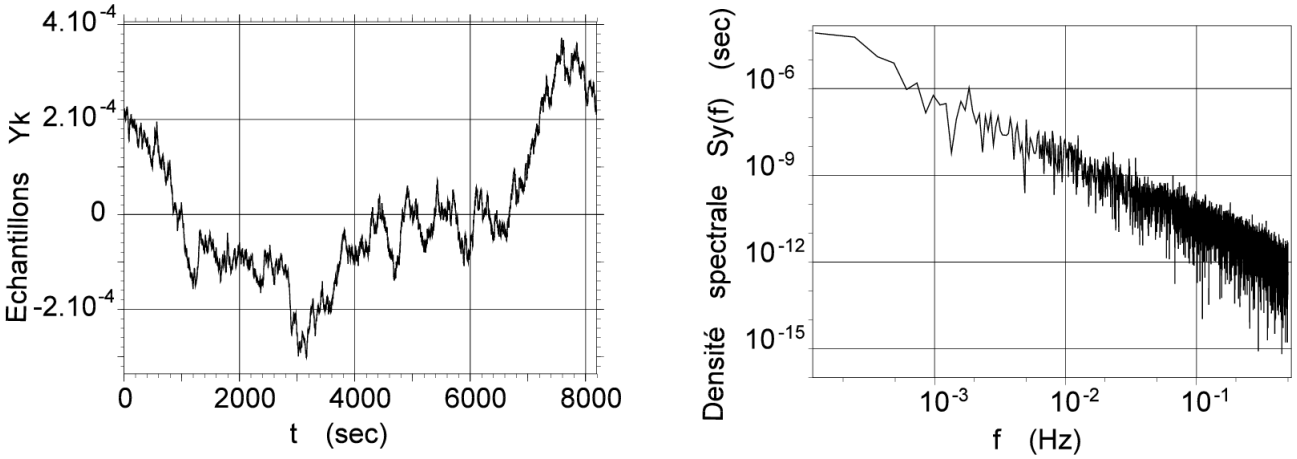

FIG. 3.3 – Simulation d'un bruit de fréquence en f^{-2} représenté dans le domaine temporel (à gauche) ainsi que sa densité spectrale (à droite).

une distribution uniforme. Afin d'obtenir un nombre gaussien, chaque échantillon est en fait la moyenne de 8 valeurs données par le générateur du C. On leur soustrait ensuite 16384 afin d'obtenir une variable gaussienne centrée, et on normalise la séquence obtenue de manière à avoir un écart type unitaire. La séquence obtenue est alors une séquence de bruit blanc gaussien de coefficient 1 ($S_y(f) = 1$ s). Afin d'obtenir un bruit en loi de puissance avec un exposant différent, la méthode utilisée a été de calculer la transformée de Fourier de cette séquence et de la filtrer avec la dépendance en f^α désirée (voir figure 3.3). En effectuant la transformée de Fourier inverse du spectre filtré, on obtient une séquence de bruit en f^α. On peut de même obtenir des bruits composés de plusieurs lois de puissance avec des coefficients différents.

Nouvelles variances

Un certain nombre de nouvelles variances ont aussi été définies afin de pallier les défauts des variances classiques. La variance de Allan, par exemple, sépare mal les bruits de fréquence en f et en f^2 (dépendance en τ^{-2} dans les deux cas), alors qu'elle distingue bien les bruits de fréquence en f^{-1} et en f^{-2} (dépendance respectivement en τ^0 et en τ). Nous avons donc eu l'idée de filtrer les données avec un filtre du premier ordre (fonction de transfert en f^{-2}). Ce filtrage, qui peut être réalisé numériquement ou analogiquement, associé à

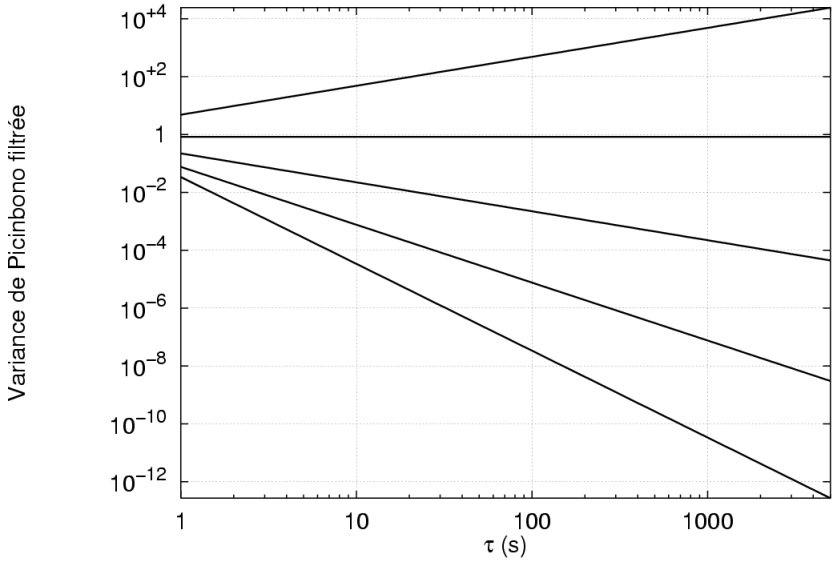

FIG. 3.4 – Réponse de la variance de Picinbono filtrée pour les divers types de bruit (du bruit en f^{-2} en haut au bruit en f^{+2} en bas).

la variance de Allan, peut être considéré comme une nouvelle variance : sa réponse pour un bruit en f^{α} est la même que celle de la réponse de la variance de Allan utilisée seule pour un bruit en $f^{\alpha-2}$. Cette nouvelle variance présente donc l'avantage de séparer les bruits de fréquence en f et en f^2.

Malheureusement, cette nouvelle variance ne converge plus pour les bruits basse fréquence si l'on ne fait pas intervenir une fréquence de coupure basse. Afin d'obtenir une variance plus "universelle", nous avons réalisé le même filtrage sur la variance de Picinbono, qui présente l'avantage de converger même pour des bruits très basse fréquence (f^{-3} et f^{-4}). Nous avons ainsi défini une nouvelle variance qui sépare les bruits en f et en f^2 tout en convergeant pour les bruits en f^{-1} et en f^{-2} (voir figure 3.4). De plus, j'ai pu montrer que cette variance est très proche de la variance de Allan modifiée.

Ces travaux ont fait l'objet d'une communication dans un congrès international (réf. C.1).

Utilisation de plusieurs variances

Cependant, l'originalité de ce travail concerne la mise au point d'une nouvelle méthode de mesure des différents types de bruit. En effet, l'utilisation simultanée de plusieurs variances, chacune étant plus particulièrement sensible à un type de bruit, permet d'améliorer notablement la précision des mesures. La méthode qui a été développée, utilise autant de variances différentes qu'il y a de types de bruit à mesurer. Par exemple pour connaître la contribution des 5 types de bruit pouvant exister dans un signal, on utilise 5 variances différentes avec le même temps d'intégration τ. La contribution des différents types de bruit est alors obtenue par la résolution d'un système de 5 équations (les réponses des 5 variances) à 5 inconnues (les 5 niveaux de bruit).

Le premier avantage de cette méthode est la possibilité d'obtenir une mesure des différents niveaux de bruit pour chaque valeur du temps d'intégration τ alors qu'une méthode à variance unique nécessite une interpolation sur plusieurs mesures obtenues pour des valeurs de τ différentes.

Le deuxième avantage concerne le fait que l'on peut choisir les variances qui vont intervenir dans le calcul. Dans le cas général, on devra choisir des variances sensibles aux bruits basse fréquence associées à des variances sensibles aux bruits haute fréquence afin d'avoir une sensibilité importante pour tous les types de bruit. Dans un deuxième temps, une connaissance a priori du signal (obtenue par la méthode du cas général par exemple) peut nous amener à nous intéresser à un type particulier de bruit et à privilégier les variances plus particulièrement sensibles à ce bruit. Afin de comparer cette méthode à variances multiples avec la méthode classique à variance unique, nous avons appliqué ces deux méthodes aux mêmes signaux simulés dont les niveaux de bruit, entrés pour la simulation étaient connus.

Résultats

Bien que la méthode à variances multiples autorise théoriquement le calcul de tous les niveaux de bruit h_{α} pour une seule valeur du temps d'intégration τ, nous avons calculé ces niveaux pour différentes valeurs de t afin d'étudier les résultats obtenus en fonction du temps d'intégration.

La figure 3.5 montre un exemple de résultats obtenus sur un signal simulé contenant trois types de bruit (bruit blanc de fréquence, $h_0 = 10^4$ s ; bruit de fréquence en f^{-1}, $h_{-1} = 10^3$; bruit de fréquence en f^{-2}, $h_{-2} = 1\ \mathrm{s}^{-1}$) en utilisant trois variances (variance de Allan, variance passe-haut, variance passe-bande). Les mesures des coefficients h_{α} que montre la figure 3.5 ne sont pas constantes en fonction du temps d'intégration :

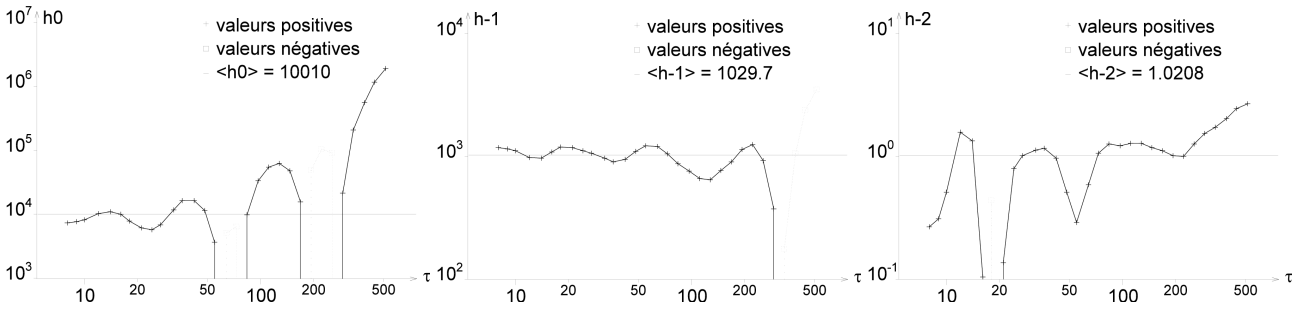

FIG. 3.5 – Mesures des coefficients h_0 (à gauche), h_{-1} (au centre) et h_{-2} (à droite) en fonction de τ obtenus par la méthode à variance multiple sur un signal simulé ($h_0 = 10^4$ s, $h_{-1} = 10^3, h_{-2} = 1\ \mathrm{s}^{-1}$)

Valeurs entrées			Valeurs mesurées					
h_0	h_{-1}	h_{-2}	h_0	$\frac{\Delta h_0}{h_0}$	h_{-1}	$\frac{\Delta h_{-1}}{h_{-1}}$	h_{-2}	$\frac{\Delta h_{-2}}{h_{-2}}$
10^4	10	1	8950	10,5 %	70	600 %	0,803	20 %
10^4	10^3	1	9253	7,5 %	1099	10 %	0,742	25 %
10^4	10^4	1	10660	6,6 %	10520	5,2 %	0,354	65 %

TAB. 3.2 – Résultats obtenus par la variance de Allan sur des signaux simulés.

pour de faibles valeurs de τ (analyse des hautes fréquences) les mesures des coefficients de bruit basse fréquence présentent une forte dispersion (ils sont noyés par les bruits haute fréquence), de même que les mesures des niveaux de bruit haute fréquence pour les fortes valeurs de τ.

Cependant, la valeur moyenne de ces mesures reste très proche des valeurs entrées pour la simulation. La précision sur la détermination des niveaux de bruit est meilleure que 5 % alors qu'elle est de l'ordre de 10 % avec la méthode à variance unique.

Les tables 3.2 et 3.3 résument les résultats obtenus avec une méthode à variance unique (variance de Allan) et la méthode à trois variances présentée ci-dessus, sur des signaux contenant trois types de bruit. Nous avons été amenés à définir un concept nouveau dans ce domaine, la dynamique, comme l'échelle dans laquelle peut varier un coefficient de bruit sans noyer les autres bruits ni être noyés par eux. La variation du niveau de bruit en f^{-1} montre que la dynamique de la méthode à variance unique est de l'ordre de 15 dB alors qu'elle atteint 30 dB avec la méthode à trois variances. Cette méthode permet donc, en fonction du choix des variances, une amélioration notable de la précision et de la dynamique des mesures de niveaux de bruit.

Deux communications (réf. C.2 et C.5) et une publication internationale (réf. A.4) sont consacrées à cette méthode.

3.3.2 La méthode multivariance (1991-1993)

Bien que la méthode à variances multiples présente des avantages certains pour mesurer les différents niveaux de bruit perturbant un signal, elle n'est pas complètement satisfaisante du point de vue du traitement du signal. En effet, cette méthode nécessite un premier traitement afin d'obtenir une première mesure des différents niveaux de bruit pour différents temps d'intégration τ, puis une deuxième étape consistant à effectuer la moyenne des résultats obtenus pour chacune de ces valeurs de τ. Or, un traitement global est toujours préférable. La méthode multi- variances, qui a été développée dans les années qui ont suivi ma thèse en collaboration avec Eric Lantz du Laboratoire d'Optique P. M. Duffieux de Besançon, correspond à une généralisation de la méthode à variances multiples, effectuant un traitement global des mesures effectuées par différentes variances et pour différents temps d'intégration τ.

Le principe de la méthode multi-variance consiste à utiliser L variances pour M temps d'intégration τ (soit $L \cdot M$ mesures) afin de mesurer N niveaux de bruits. Dans ces conditions, l'inégalité $L \cdot M \geq N$ doit être vérifiée afin d'avoir au moins autant d'équations que d'inconnues. Évidemment, on a toujours intérêt à avoir $L \cdot M \gg N$ pour augmenter la quantité d'information. Si $L = 1$, on retrouve la méthode à variance unique, et si $M = 1$ et $L = N$, on retrouve la méthode à variances multiples.

Les paramètres pertinents (niveaux de bruit, mais aussi coefficients de dérive) sont déterminés par une méthode des moindres carrés pondérés : connaissant la réponse de chaque variance pour chaque type de bruit (voir table 3.1), et pondérant chaque mesure de variance par l'inverse de son intervalle de confiance, on calcule

Valeurs entrées			Valeurs mesurées					
h_0	h_{-1}	h_{-2}	h_0	$\frac{\Delta h_0}{h_0}$	h_{-1}	$\frac{\Delta h_{-1}}{h_{-1}}$	h_{-2}	$\frac{\Delta h_{-2}}{h_{-2}}$
10^4	10	1	10186	1,9 %	9,1	8,8 %	1,052	5,2 %
10^4	10^3	1	10010	0,1 %	1030	3,0 %	1,021	2,1 %
10^4	10^4	1	8477	15,2 %	10453	4,5 %	0,701	30 %

TAB. 3.3 – Résultats obtenus par la méthode à variances multiples sur des signaux simulés.

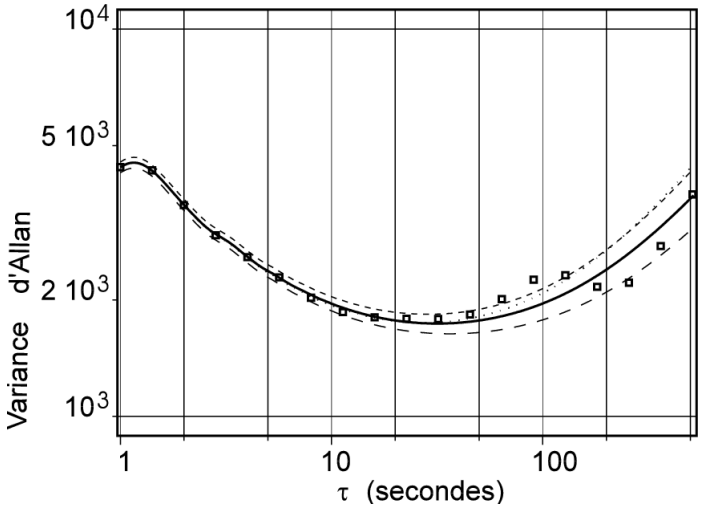

FIG. 3.6 – Mesures par un système à 4 variances. Les carrés représentent les mesures directes de variance de Allan, la courbe en trait plein est la réponse théorique de la variance de Allan calculée pour les niveaux de bruits estimés, la courbe en pointillés correspond aux limites du domaine d'incertitude.

les niveaux de bruit et coefficients de dérive les plus probables au sens des moindres carrés.

Cette méthode est plus sensible qu'une méthode à variance unique car la précision des mesures multivariance est au moins aussi grande que celle de la plus précise des variances utilisées. Le choix des variances détermine ainsi la sensibilité de l'analyse multivariance : le meilleur système de variances serait un ensemble contenant des variances spécialement désignées pour chaque paramètre pertinent. Cependant, ce choix peut être adapté à chaque cas particulier.

La deuxième amélioration de cette méthode concerne la dynamique (voir §3.3.1 page 18). La dynamique dépend du nombre et du type de variances choisies, mais est toujours plus grande que la dynamique de chacune des variances du système.

Mais le principal avantage de l'analyse multivariance est la détermination des domaines d'incertitude liés à la mesure de chaque paramètre. Ces intervalles de confiance sont estimés à partir de la dispersion des résultats de variance en utilisant une décomposition en valeurs singulières (voir figure 3.6). La figure 3.7 présente la comparaison entre les incertitudes calculées et les erreurs commises par rapport aux valeurs entrées pour la simulation, sur 50 réalisations différentes de signaux obtenus à partir des mêmes niveaux de bruit. L'accord semble tout à fait satisfaisant.

De plus, pour estimer les incertitudes de mesures, il est nécessaire d'associer un vecteur propre à chaque paramètre pertinent. Il est donc possible de calculer les angles entre ces différents vecteurs. Un angle petit entre deux vecteurs propres indique que les paramètres correspondant à ces deux vecteurs produisent des effets similaires sur les réponses de variances lorsqu'ils varient. Par contre, un angle proche de 90 entre deux vecteurs indique que les effets des variations des deux paramètres correspondants ne peuvent être confondus. La séparabilité peut ainsi être définie comme l'aptitude d'une variance ou d'un ensemble de variances à distinguer deux bruits. La détermination des angles entre les vecteurs propres correspondant aux paramètres pertinents fournit donc une estimation quantitative de la séparabilité de l'analyse multivariance et, par conséquent, un nouveau critère pour estimer la fiabilité des mesures. Seuls les types de bruits et dérives qui existent réellement dans le signal sont donc mesurés.

Ce travail a donné lieu à une publication dans une revue internationale (réf. A.4), plusieurs communications dans des congrès internationaux (réf. C.7, C.9, C.10, C.12) et une section dans un ouvrage collectif rédigé sous la direction de D. Allan (réf. B.3). Il connaît de plus de nombreux prolongements, tant à l'observatoire (voir 4.3.4 et 4.3.5), que dans les autres laboratoires et sociétés privées intéressés par cette méthode (Université de Stanford, NIST).

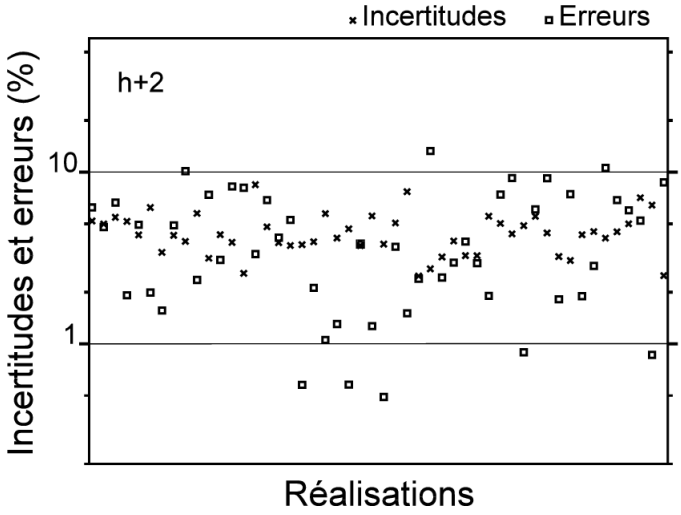

FIG. 3.7 – Erreurs et incertitudes sur le coefficient h_{+2}. Ces mesures ont été obtenues pour 50 réalisations du même signal composé de 5 types de bruit. Le système multivariance était composé de 4 variances.

3.3.3 Étude d'un banc de mesure de stabilité temporelle à références multiples (depuis 1995)

La mesure de la stabilité des oscillateurs est une activité importante pour l'équipe Temps-Fréquence de l'Observatoire de Besançon. On distingue la stabilité à court terme, généralement étudiée grâce à un analyseur de spectre, et la stabilité à long terme, mesurée en comparant l'oscillateur étudié à un oscillateur de référence supposé parfait. Un stage de DEA (Lakhdar Benkoula, DEA AOEMS 1993-94), que j'ai encadré, a montré que les deux approches étaient équivalentes si, effectivement, les performances de l'oscillateur de référence étaient bien meilleures que celles de l'oscillateur étudié. Cependant, deux problèmes se posent lorsqu'il s'agit de mesurer un oscillateur très stable :

- premièrement, comme on compare l'oscillateur étudié à un oscillateur de référence, on considère toujours que les instabilités mesurées sont dues à l'oscillateur que l'on contrôle et jamais à l'oscillateur de référence supposé parfait. Il est clair que cette hypothèse n'est vérifiée que lorsqu'on contrôle un oscillateur de stabilité bien inférieure à l'oscillateur de référence, ce qui n'est pas toujours le cas.
- deuxièmement, les performances d'un oscillateur (en particulier d'un oscillateur de référence) diffèrent notablement lorsqu'il s'agit de stabilité à court terme (durée inférieure à la seconde) ou de stabilité à long terme voire à très long terme (durée supérieure à l'année). La stabilité des oscillateurs à Quartz par exemple est nettement meilleure pour le court terme que pour le long terme alors que c'est l'inverse pour les horloges atomiques à jet de Césium (il n'est pas rare de trouver un Quartz plus stable qu'une horloge à Césium sur une durée de l'ordre de la seconde).

Une solution possible à ces deux problèmes consiste à utiliser deux oscillateurs de référence pour mesurer simultanément la stabilité d'un même oscillateur : on mesurerait les écarts correspondant à chaque couple d'oscillateur : (référence 1, oscillateur à étudier), (réf. 2, osc.), (réf. 1, réf. 2). On peut ainsi distinguer les instabilités propres à chacun des oscillateurs. D'autre part, en associant un oscillateur de référence très stable à court terme (Quartz de très bonne qualité) et un oscillateur de référence très stable à long terme (horloge à Césium), il est possible d'effectuer des mesures très rapprochées (10 millisecondes, voire moins) sur une durée de plusieurs jours, ce qui permet de connaître précisément la stabilité de l'oscillateur aussi bien à court terme qu'à long terme.

Un premier stage a permis de réaliser des essais préliminaires (Sandrine Tisserand, IUT Mesures Physiques $2^{\text{ème}}$ année). Ce stage a montré qu'il était possible de retrouver, grâce à l'analyse multivariance, les niveaux de bruit de chaque oscillateur si les performances des deux oscillateurs de référence étaient du même ordre de grandeur : par exemple, lorsque les références étaient deux horloges à Césium de la même génération, les niveaux de bruit des deux références et de l'oscillateur à étudier étaient bien séparés ; par contre, lorsque les références étaient un Quartz et un Césium, le niveau de bruit haute fréquence du Césium masquait celui du Quartz, de même que le niveau de bruit basse fréquence du Quartz masquait celui du Césium.

Une solution consisterait à utiliser quatre références : deux Quartz de bonne stabilité à court terme et deux Césium pour le long terme. Les mesures à court terme seront comparées aux mesures traditionnellement effectuées à l'aide d'un analyseur de spectre. L'étude préalable, réalisée par deux stagiaires de Maîtrise de Physique (E. Carry et T. Laroche) a conclu sur la nécessité de s'orienter sur la réalisation d'une horloge de référence composite basée sur des oscillateurs multiples (voir ci-après le projet HOROM, dans la partie "Perspectives").

3.3.4 Mesure des niveaux de bruit et des dérives d'un signal mal échantillonné (depuis 1992)

La méthode multivariance, décrite en §3.3.2, a été adaptée au cas des signaux mal échantillonnés. Dans de nombreux cas en effet (dans le cas de l'étude de la stabilité temporelle des pulsars milliseconde notamment, voir §3.3.5 page 24), l'acquisition du signal ne respecte pas les règles du théorème de l'échantillonnage :

- la fréquence de coupure haute du signal peut être plus grande que la fréquence de Shanon (repliement spectral) ;
- la fréquence de coupure basse du signal peut être plus basse que l'inverse de la durée de la séquence (non-stationnarité) ;
- le pas de l'échantillonnage peut être variable, voire complètement irrégulier (cas des pulsars milliseconde).

Fréquence de coupure haute et repliement spectral

Nous avons montré que le repliement spectral était préjudiciable pour la mesure des niveaux de bruit haute fréquence : le bruit blanc de phase (bruit de fréquence en f^{+2}) et le bruit flicker de phase (bruit de fréquence en f^{+1}). Cet effet est d'autant plus fort que la fréquence de coupure haute caractéristique (la plus haute fréquence entre la fréquence de coupure haute du système de mesure et la fréquence de coupure haute intrinsèque du bruit) est plus élevée que la fréquence de Shanon.

Dans le cas du bruit blanc de phase, seul le produit du niveau de bruit par la fréquence de coupure haute caractéristique est mesurable. Si la fréquence de coupure haute caractéristique est connue, on peut en déduire une mesure du niveau de bruit réel. Nous avons aussi présenté une procédure permettant d'estimer dans un certain nombre de cas la fréquence de coupure haute caractéristique (réf. A.9).

Dans le cas du bruit flicker de phase, un faux bruit blanc de phase, dû au repliement spectral, apparaît. Ce niveau de bruit parasite augmente avec la fréquence de coupure haute caractéristique. Il peut même masquer totalement le niveau de bruit flicker de phase si la fréquence de coupure haute est beaucoup plus grande que la fréquence de Shanon.

Les réponses de plusieurs variances pour ces deux types de bruit ont été recalculées en prenant en compte le repliement spectral (réf. A.10).

Ce travail a donné lieu à deux publications dans des revues internationales (réf. A.9 et A.10).

Fréquence de coupure basse et mesure des dérives

Nous avons tout d'abord montré que la méthode multivariance distingue parfaitement les bruits basse fréquence et les dérives déterministes si la fréquence de coupure basse du signal est supérieure ou égale à l'inverse de la durée de la séquence de mesure (réf. C.9).

Malheureusement, lorsque cette condition n'est pas vérifiée, les fluctuations aléatoires à très longue période peuvent être confondues avec des dérives déterministes (voir figure 3.8). Ce cas arrive en particulier dans l'étude des pulsars milliseconde qui sont affectés de bruits très basse fréquence (bruit de fréquence en f^{-3}), dont la fréquence de coupure basse serait de l'ordre de l'inverse du temps de propagation du signal entre le pulsar et nous (typiquement 1/(15000 années) pour PSR 1937+21). Les pulsars milliseconde n'étant observés que depuis 13 ans (PSR 1937+21, le premier pulsar milliseconde détecté, a été découvert en 1982), la durée de la séquence de mesure est très inférieure à l'inverse de cette fréquence de coupure. Dans ces conditions, il est difficile de savoir si les dérives mesurées dans les signaux reçus d'un pulsar sont réellement des dérives déterministes (identifiées théoriquement au ralentissement de la rotation du pulsar) ou des fluctuations aléatoires à très long terme.

Nous avons proposé une première méthode permettant un calcul approché de la plus grande "fausse dérive" observable pour un niveau de bruit basse fréquence, une fréquence de coupure basse et une durée d'observation

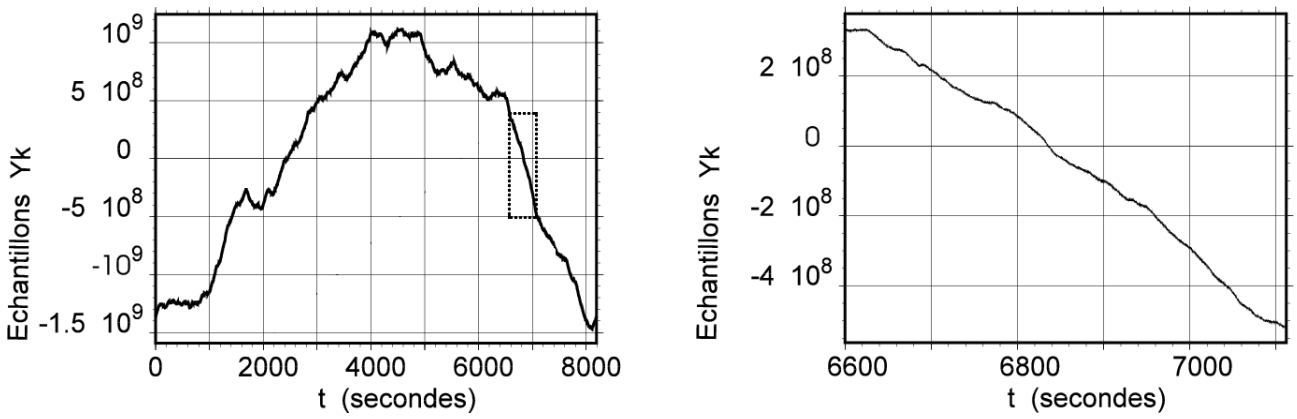

FIG. 3.8 – Séquence de bruit très basse fréquence. À gauche, la fréquence de coupure basse est égale à l'inverse de la durée de la séquence. Sur l'agrandissement à droite, une fausse dérive apparaît car la fréquence de coupure basse est inférieure à la durée de la séquence.

donnés (réf. C.11). Cette méthode montre que, si les dérives mesurées n'étaient pas déterministes, le niveau de bruit basse fréquence du pulsar PSR 1937+21 serait largement supérieur aux limites actuellement admises.

Enfin, nous avons complété cette étude par un calcul rigoureux utilisant la ***condition des moments***. Cette condition est en fait un principe d'équivalence entre la sensibilité (ou l'insensibilité) aux dérives et la convergence pour les bruits basse fréquence. L'application de la condition des moments à la simulation de bruits et à l'analyse de stabilité a donné lieu à la publication A-13.

Données irrégulièrement espacées dans le temps

Dans certains cas (transferts de temps par GPS en vue commune d'un même satellite, observation des pulsars milliseconde, voir figure 3.9) les mesures temporelles ne peuvent être régulièrement espacées. Dans ces conditions, les méthodes classiques d'analyse spectrale ne peuvent être utilisées. Pour étudier la stabilité temporelle des pulsars milliseconde, nous avons été amenés à modifier la méthode multivariance afin qu'elle puisse traiter des données irrégulièrement espacées. Deux solutions ont été étudiées : la première consiste à interpoler les données manquantes afin de se replacer dans le cas de données régulièrement espacées ; la deuxième consiste à définir un ensemble d'estimateurs de la densité spectrale spécialement adaptés et optimisés pour la répartition temporelle des données.

Concernant la méthode par interpolation, quatre techniques ont été utilisées : une interpolation linéaire des écarts temporels (écarts de temps entre l'oscillateur étudié, en l'occurrence le pulsar, et un oscillateur supposé idéal, en l'occurrence le Temps Atomique International), une interpolation des écarts temporels par spline cubique, une interpolation linéaire des écarts de fréquence (la séquence des écarts de fréquence est la dérivée de la séquence des écarts temporels), et une interpolation des écarts de fréquence par spline cubique. La solution idéale consisterait à conserver toute l'information présente dans le signal brut et à ne pas rajouter de nouvelle information. Il est clair que l'interpolation par une fonction "lisse", comme les splines cubiques, d'une fonction aléatoire, dont les échantillons successifs peuvent être totalement décorrélés entre eux (cas du bruit blanc), rajoute une information erronée. En fait, l'expérience a montré que la méthode par interpolation linéaire des écarts temporels était satisfaisante pour tous les bruits excepté le bruit blanc de phase (f^{+2} de fréquence), alors que les autres méthodes ne pouvaient être utilisées que pour l'étude des bruits très basse fréquence (f^{-2} et f^{-1} de fréquence). C'est en effet l'interpolation linéaire des écarts temporels qui rajoute le moins d'information. Cependant, dans tous les cas, on note que le niveau des bruits haute fréquence est toujours déterminé avec une incertitude beaucoup plus grande que dans le cas d'échantillons régulièrement espacés. Ce sont donc surtout les hautes fréquences qui sont altérées par ce type de reconstruction des données manquantes. Ce travail a fait l'objet d'une communication dans un congrès international (réf. C.10).

La deuxième méthode d'analyse spectrale des données irrégulièrement espacées s'appuie sur les estimateurs moindres modes, introduits pour l'étude des pulsars par Deeter et Boynton en 1981. Alors que, dans le cas de la transformée de Fourier, la valeur du spectre d'une séquence pour une fréquence donnée f_0 est calculée en effectuant l'intercorrélation de cette séquence avec une exponentielle complexe de fréquence f_0, on remplace

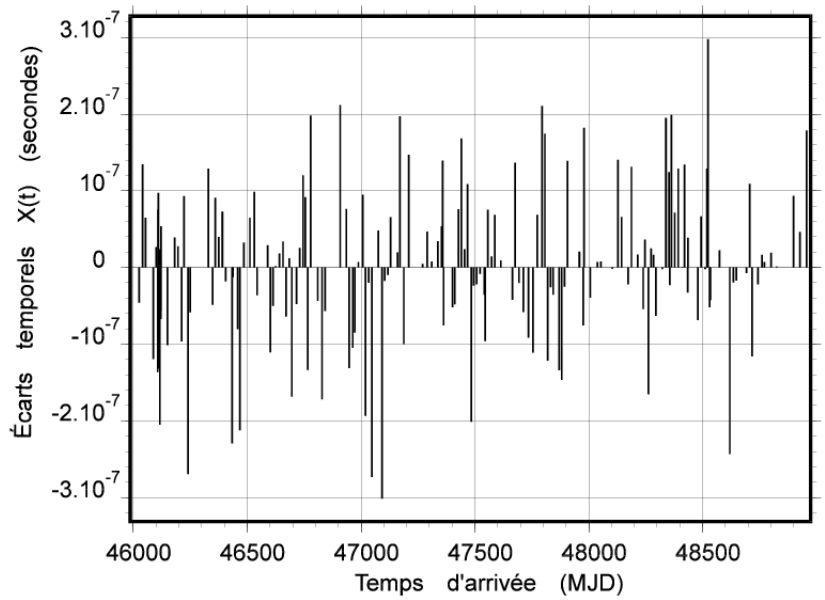

FIG. 3.9 – Séquence de chronométrage du pulsar milliseconde PSR 1937+21 (observé à Arecibo d'Octobre 1984 à Décembre 1992) On peut remarquer des données très rapprochées (2 jours d'intervalle) ainsi que de longues périodes sans observations (jusqu'à 80 jours).

ici cette exponentielle complexe par un polynôme. Le degré de ce polynôme change en fonction de la fréquence étudiée. L'avantage des polynômes réside dans le fait qu'on peut, d'une part, choisir le nombre de leurs minima et maxima relatifs, et d'autre part, adapter leur répartition en fonction de la répartition irrégulière des données. La première étape de cette méthode consiste à chercher une famille comportant autant de polynômes, de degrés croissants et orthonormés entre eux, qu'il existe d'échantillons dans la séquence temporelle. Deux conditions doivent ensuite être vérifiées : la condition des moments et la condition d'orthogonalité.

- La condition des moments est en fait un critère de convergence. On peut montrer qu'en supprimant les p premiers polynômes (de degrés 0 à $p-1$), l'estimation convergera pour les basses fréquences jusqu'au bruit de phase en f^{-2p} (bruit de fréquence en f^{-2p+2}).
- La deuxième condition suppose une connaissance a priori du signal étudié. Les données de chronométrage de pulsars milliseconde devraient être principalement affectées par deux types de bruit : le bruit observationnel (bruit blanc de phase) et du bruit très basse fréquence (f^{-5} de phase, c'est à dire f^{-3} de fréquence) dû à des fluctuations de la métrique de l'espace-temps entre le pulsar et nous (voir §3.3.5). Les polynômes calculés précédemment étant orthonormés, les estimations qu'ils fournissent de la densité spectrale d'un signal composé uniquement de bruit blanc sont donc indépendantes. Cependant, ces estimations ne sont plus indépendantes dans le cas d'un bruit de phase en f^{-5}. On montre que si la matrice des covariances des primitives d'ordre q des polynômes est diagonale, alors les estimateurs seront indépendants pour un bruit de phase en f^{-2q}. On effectue donc une rotation des polynômes de départ de façon à les représenter dans une base où la matrice des covariances de leur primitive d'ordre q est diagonale.

Le nouveau jeu de polynômes obtenu garanti donc la convergence pour des bruits de phase jusqu'à f^{-2p} et une indépendance des estimateurs pour les bruits blanc de phase et en f^{-2q}. Après avoir étudié les résultats de cette méthode pour des signaux simulés en choisissant une condition des moments à l'ordre 3 et une optimisation pour le bruit de phase en f^{-4} (réf. A.6), nous nous proposons maintenant d'utiliser plusieurs estimateurs moindre mode avec des conditions des moments d'ordres différents et une optimisation pour les différents types de bruits. Nous serons alors en mesure d'adapter la méthode multivariance aux estimateurs moindre mode. Cette méthode a fait l'objet d'une publication internationale (réf. A.6) et une communication dans un congrès international (réf. C.14).

Avant d'appliquer ces deux méthodes aux données de chronométrage de pulsars milliseconde, nous avons comparé leurs performances sur des signaux simulés présentant des caractéristiques semblables à celles attendues dans les signaux reçus des pulsars (réf. C.17).

3.3.5 Étude de la stabilité temporelle des pulsars milliseconde (1992-1997)

De 1992 à 1997, les pulsars milliseconde ont constitué un de nos principaux pôles d'intérêt. Les études citées précédemment (notamment §3.3.4), bien que d'un caractère plus général, ont souvent été entreprises dans le but d'étudier la stabilité temporelle des pulsars milliseconde. Ces astres, qui sont des étoiles à neutrons en rotation rapide (période de quelques millisecondes), nous envoient une impulsion électromagnétique à chaque tour (chaque fois que la Terre se trouve dans le faisceau d'ondes radio émis par un pôle magnétique de l'étoile). On peut donc considérer les pulsars comme des horloges dont la stabilité à court terme est relativement médiocre (principalement à cause du très faible rapport signal sur bruit des impulsions reçues), mais dont on a pu constater que la stabilité à très long terme (durées supérieures à un an) est excellente, peut-être même meilleure que la stabilité des horloges atomiques à jet de Césium qui constituent l'actuelle référence de temps. C'est donc initialement pour des raisons métrologiques que nous nous sommes intéressés aux pulsars milliseconde. Cependant, nous avons parallèlement mené une étude théorique des pulsars afin d'avoir une connaissance *a priori* du bruit altérant leur stabilité temporelle.

Approche théorique

D'octobre 1993 à novembre 1996, j'ai coencadré la thèse de Gilles Zalamansky dont le sujet concernait principalement l'étude des mécanismes physiques pouvant être responsables des instabilités temporelles des pulsars milliseconde. On sait déjà que l'écho en ondes gravitationnelles du Big Bang (analogue au bruit de fond électromagnétique à 3 K) devrait induire des fluctuations stochastiques de la métrique de l'espace-temps. Ce phénomène devrait se traduire par une signature spectrale très particulière dans les séquences de chronométrage des pulsars : un bruit de fréquence en f^{-3} que l'on ne rencontre pas dans les oscillateurs classiques.

Le travail que nous avons entrepris, en collaboration avec Monique Signore de l'ENS Paris, consiste à tenter de déterminer, grâce aux diverse théories cosmologiques existantes, une estimation de l'ordre de grandeur du niveau de ce bruit. Cette étude est basée sur une modélisation de l'évolution, depuis un temps très proche du Big Bang jusqu'à nous, d'un volume suffisamment grand pour être considéré comme homogène et représentatif de l'Univers dans sa globalité. Différents phénomènes et paramètres doivent être pris en compte (taille de l'horizon cosmologique, densité des divers types de particules, densité de cordes cosmiques, taux de formation et de disparition des cordes) ainsi que leur évolution au cours des différentes phases de l'histoire de l'Univers (ère quantique, ère hadronique, ère leptonique, ère radiative, ère stellaire). Cette modélisation est basée sur une méthode itérative. Cependant, il est nécessaire de choisir un pas suffisamment fin pour bien rendre compte des phénomènes étudiés, mais aussi suffisamment long pour limiter le temps de calcul (qui doit rester bien inférieur à l'âge de l'Univers !). Nous avons donc opté pour un pas logarithmique, très petit aux premiers instants de l'Univers (de l'ordre de 10^{-43} s) et qui augmente en fonction de l'âge de l'Univers.

Ce programme nous a permis de confirmer que, dans la gamme de fréquence qui nous est accessible (de 1/15 an^{-1} à 1 jour^{-1}), ce bruit de fond gravitationnel induit bien un bruit en f^{-3} sur la mesure de la stabilité temporelle des pulsars milliseconde. En revanche, nous ne sommes pas en mesure d'estimer le niveau de cette perturbation. Une telle estimation nous permettrait de savoir si, compte tenu de la sensibilité de la méthode multivariance au bruit en f^{-3}, de la longueur de la séquence de mesure, et de la distance Terre-Pulsar, ce bruit est d'ores et déjà mesurable sur un pulsar donné.

Exploitation des données de chronométrage de pulsars milliseconde

Ainsi, si le bruit de fond d'ondes gravitationnelles d'origine cosmologique existait et était seul présent, il se traduirait par une densité spectrale des résidus de chronométrage en f^{-5}, avec une amplitude inconnue Ω. Bien entendu, un fort bruit blanc de mesure se superpose à lui en pratique.

En utilisant les résidus obtenus par l'équipe de Princeton sur les pulsars milliseconde PSR1937+21 et PSR1855+09, nous avons fixé, à partir d'une approche Bayesienne originale, une nouvelle limite supérieure au bruit de fond d'ondes gravitationnelles (réf. A.7, C.16). Nous avons pu établir des comparaisons critiques avec les autres méthodes utilisées jusqu'à présent pour estimer cette limite.

Cette mesure présente un double intérêt :

– du point de vue cosmologique, la valeur du niveau de ce bruit de fond est très importante car elle est directement liée à la densité d'énergie d'ondes gravitationnelles (Ω_{h^2}). Notre estimation du niveau du bruit de fond indique que cette densité est, à 95 % de confiance, inférieure à $9,3 \cdot 10^{-8}$ ms^2·yr^6. Or,

les prédictions obtenues par la théorie des cordes se situent autour de 10^{-7} et il est généralement admis qu'une valeur expérimentale inférieure à 10^{-8} est incompatible avec la théorie. Notre mesure semble donc plutôt plus faible que les prédictions théoriques sans pour autant les remettre en cause. Il est à noter qu'une densité d'énergie d'ondes gravitationnelles nulle n'est pas incompatible avec notre mesure ;

– du point de vue métrologique, l'intérêt de cette mesure concerne la prédiction de la stabilité à très long terme des pulsars millisecondes. Les instabilités à court terme des pulsars millisecondes diminuent en fonction du temps d'intégration et deviennent de l'ordre de grandeur de la stabilité du TAI pour des durées comprises entre 1 et 3 ans. Par contre, les instabilités à long terme sont de plus en plus sensibles lorsqu'on augmente le temps d'intégration. Si le niveau de ce bruit était égal à la limite maximale que nous avons obtenue, il en résulterait que les instabilités temporelles des pulsars millisecondes dépasseraient celles du TAI pour des durées supérieures à 5 ans. L'intérêt métrologique des pulsars millisecondes serait ainsi très limité, d'autant plus que les progrès des horloges contribuant au TAI devraient améliorer nettement sa stabilité dans un futur proche. Cependant, le niveau réel du bruit de fond gravitationnel a 95 % de chance d'être inférieur à cette limite et pourrait même être beaucoup plus faible.

Les données utilisées dans l'étude décrite ci-dessus étaient les résidus des chronométrages de pulsars corrigés des différents phénomènes modifiant la date de réception des signaux (variation de la distance, délais de propagation dans le milieu interstellaire, délais relativistes dus aux mouvements respectifs de la Terre et du pulsar, élimination de la dérive due au ralentissement de la rotation du pulsar, etc...). Cependant, un tel traitement en deux étapes (correction des données brutes, puis mesure du bruit dans les résidus) n'est pas satisfaisant du point de vue du traitement du signal (voir §3.3.2). En effet, l'estimation puis l'extraction de paramètres déterministes tels que le délai de propagation dans le milieu interstellaire ou la dérive linéaire de fréquence, peut prendre en compte une partie des effets dus à des fluctuations aléatoires. Les mesures des niveaux de bruit, notamment basse fréquence, effectuées sur les résidus risquent donc d'être altérées par la première phase du traitement, de même que les mesures des paramètres déterministes sont faussés par la présence de fluctuations à très long terme (voir §3.3.4 page 21 et réf. C.9). L'idéal serait donc de mesurer simultanément les paramètres déterministes (délais et dérives) et aléatoires (niveaux de bruit) à partir des données brutes.

De Janvier 1995 à Juin 1996, Martin McHugh, un étudiant post-doctorant que j'ai encadré, a travaillé sur le programme TEMPO, écrit par J. Taylor et son équipe (Princeton, USA). Ce programme, qui est maintenant dans le domaine public, permet de passer des données brutes (mesurées à Arecibo) aux résidus en extrayant les 8 principaux paramètres déterministes. Notre but initial était de modifier ce programme afin de rajouter à ces paramètres déterministes, des paramètres aléatoires correspondants aux niveaux des différents types de bruit. Le programme mesurerait alors, en une seule passe, tous les paramètres pertinents, qu'ils soient déterministes ou aléatoires. En fait, suite aux travaux de G. Zalamansky, il nous est apparu plus judicieux d'élaborer des estimateurs parfaitement optimisés pour l'analyse des données provenant des pulsars millisecondes : les estimateurs orthogonaux. Ces estimateurs nous ont ainsi permis d'obtenir nos propres résidus à partir des données brutes de temps d'arrivée des impulsions observées à Arecibo. Les propriétés de ces estimateurs concernent l'indépendance totale entre les estimations obtenues des différents paramètres du modèle (paramètres déterministes : position, vitesse, période, etc., et paramètres aléatoires : niveau du bruit blanc de mesure et niveau du bruit gravitationnel en f^{-5}). En effet, dans le cas d'un bruit basse fréquence (tel que ce bruit en f^{-5}), la non-stationnarité du processus laisse généralement apparaître une "fausse dérive", correspondant en fait à des fluctuations aléatoires à très long terme. Dans ce cas, il importe que l'estimation du niveau de bruit basse fréquence soit totalement insensible aux dérives afin qu'une "réelle dérive déterministe" ne conduise pas à une surestimation de ce niveau de bruit. Ces estimateurs, calculés à partir de polynômes orthogonaux (Deeter et Boynton), sont parfaitement adaptés au bruit en f^{-5} et au caractère irrégulier de l'échantillonnage (réf. A.6, C.14, C.18). Nous avons développé une méthode d'analyse, basée aussi sur une approche bayésienne, de tous les paramètres inconnus soupçonnés d'agir sur les résidus : le niveau de bruit gravitationnel Ω, plusieurs paramètres déterministes inconnus, et éventuellement d'autres niveaux de bruit. Les résultats que nous avons obtenus montrent que dans le cas du pulsar PSR1937+21, en plus du bruit en f^{-5} et du bruit blanc observationnel, un autre type de bruit basse fréquence semble exister. Il est donc possible que le véritable niveau de bruit gravitationnel Ω soit sensiblement plus faible que la limite donnée ci-dessus (réf. A.8). Il est néanmoins très probable que le niveau de bruit en f^{-5} soit tel que la stabilité de PSR1937+21 devienne moins bonne que celle du TAI pour des durées supérieures à 3 ans.

Compte-tenu de la difficulté technique liée à l'observation des pulsars millisecondes (nécessité d'utiliser un radiotélescope tel que celui de Nançay ou d'Arecibo), de la faible amélioration que pourraient potentiellement

introduire une échelle de temps des pulsars, et surtout des progrès énormes réalisés dans le domaine de la création des horloges à atomes froids, il ne nous a pas semblé judicieux à l'époque (1997) de poursuivre notre étude des pulsars milliseconde. On verra ci-après (voir la partie "Perspectives") que plusieurs évènements nous ont fait reconsidérer cette décision.

Ces travaux ont fait l'objet de 2 publications internationales (réf. A.7, A.8) et une communication dans un congrès international (réf. C.16).

3.3.6 Collaborations internes

Transfert de temps par satellite TV géostationnaire (de 1989 à 1995)

Les techniques de transfert de temps les plus utilisées actuellement sont basées sur le système de positionnement américain GPS (Global Positioning System). Cette méthode, qui garantit une exactitude de quelques nanosecondes sur la mesure de l'écart temporel entre deux horloges distantes, présente l'inconvénient de pouvoir être dégradée volontairement par les militaires américains (en cas de conflit notamment) pour qui ce système a été réalisé initialement.

Nous avons donc été amenés à imaginer un autre système de transfert de temps, indépendant de GPS. Réalisé à l'Observatoire de Besançon avec le Bureau National de la Métrologie (BNM, Paris), le Centre National d'Études Spatiales (CNES, Toulouse), le Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences (LPTF, Paris) et le Centre d'Étude et de Recherche en Géodésie et Astronomie (CERGA, Grasse), ce projet consiste à dater sur un certain nombre d'horloges atomiques de référence, la réception d'un même signal provenant des satellites TDF ou Telecom 2A. Ces mesures permettent de préciser la position du satellite, rendant ainsi possible le rattachement de toutes les horloges situées dans la zone de réception du satellite. Une première étude prévisionnelle des résultats escomptés a été réalisée lors du stage de maîtrise en informatique de François Meyer (1989-1990), que j'ai encadré. Puis, lors de son stage de DEA (DEA IAP, 1991), que j'ai coencadré, il a étudié l'apport de l'intelligence artificielle, notamment les logiques floues, pour affiner et prédire la position du satellite. Enfin, lors de sa thèse (thèse SPI, soutenue en Juillet 1995), que j'ai également coencadrée, il a étudié sur les mesures réelles, effectuées à l'Observatoire de Besançon, au LPTF, au CNES et au CERGA, l'influence du nombre de stations de référence sur la précision des raccordements ainsi que différentes méthodes de modélisation de l'orbite résiduelle des satellites utilisés (réf. C.3 et C.8).

Ma participation à ce thème de recherche a porté essentiellement sur deux points : l'étude des délais de propagation des signaux TV satellite dans l'ionosphère et l'analyse du bruit de mesure dans les chaînes de réception de ces signaux.

Concernant les délais de propagation ionosphériques, j'ai modélisé l'ionosphère comme étant un plasma dont la densité ionique varie en fonction de l'alternance jour-nuit. Le deuxième paramètre est l'élévation du satellite pour un lieu donné, qui modifie la longueur du trajet du signal dans l'ionosphère. J'ai montré que ces délais, pour la fréquence utilisée (bande KU, 12 Ghz) et pour un lieu d'observation situé en France métropolitaine, étaient de l'ordre de quelques nanosecondes. Cependant, les mesures effectuées étant différentielles, les différences de délais pour 2 stations, même situées aux deux extrémités Nord et Sud du territoire français, sont largement inférieures à la nanoseconde, et donc négligeables devant les autres sources d'erreur.

L'analyse du bruit des récepteurs a été réalisée en comparant les dates de réception d'un même signal (issu d'un satellite TV) données par deux chaînes d'acquisition complètes (depuis l'antenne jusqu'au récepteur proprement dit) placées côte à côte. Cette étude a montré que le bruit prépondérant était du bruit blanc de phase, uniquement dû à l'électronique et indépendant du diamètre de l'antenne (au delà d'un seuil d'environ 50 cm de diamètre). Ce type de bruit présente l'avantage de pouvoir être diminué d'un rapport en effectuant la moyenne de N mesures consécutives (ce qui n'est pas le cas des bruits basse fréquence). Les mesures utilisées pour les transferts de temps sont ainsi toujours des moyennes des instants de réception de 16 marqueurs de temps consécutifs (transition noir-blanc de la ligne test 624).

Corrélation de spectres de laboratoire et de spectres de la comète de Halley (de 1990 à 1992)

Le Professeur Moreels m'a proposé d'intervenir dans le dépouillement des données provenant de l'expérience TKS. Cette expérience, menée en collaboration avec l'URSS et la Bulgarie, a été embarquée à bord de la sonde soviétique Vega 2 qui rencontra la comète de Halley en Mars 1986. Elle était composée d'un spectro-imageur tri- canal (UV, visible, IR) dont la plus grande partie (canaux UV et visible) a été réalisée à

l'Observatoire de Besançon. Un grand nombre de raies correspondant à des constituants de la comète de Halley ont déjà été identifiées. Ces résultats contiennent des informations précieuses pour la compréhension de la physique cométaire et, par voie de conséquence, du mécanisme de formation du système solaire. Il restait cependant à identifier dans les spectres de la comète de Halley, notamment ceux obtenus au voisinage immédiat du noyau dans le domaine du proche UV (de 345 à 375 nm), un grand nombre de raies. Elles pourraient correspondre à des émissions en fluorescence de composés organiques (formaldéhyde, phénanthrène). Ces fluorescences en phase gazeuse excitées par un rayonnement de type solaire sont mal connues.

Ma contribution a consisté à fournir une méthode fiable de comparaison des spectres de TKS et de laboratoires. J'ai ainsi réalisé un algorithme de corrélation de séquences de données indiquant pour quel décalage entre les deux séquences la ressemblance est maximum. Si, pour ce décalage, les échelles de longueur d'onde des deux séquences coïncident, et si le coefficient de corrélation est proche de 1, on peut considérer que le composé dont on possède le spectre de laboratoire, a été détecté dans le spectre de la comète de Halley. La présence de composés aromatiques, tel que le phénantrène, a ainsi été mise en évidence dans la chevelure de la comète de Halley (voir réf. B.2 et B.1).

Il semble donc que la matière cométaire présente une grande analogie de composition avec la matière interstellaire, dans laquelle de nombreuses molécules ont été détectées par radioastronomie. Cette information est d'un grand intérêt pour les modèles de genèse du système solaire car les mesures de composition chimique effectuées sur les planètes ne reflètent pas la composition initiale de la nébuleuse primitive. La détection d'hydrocarbures polycycliques pourrait d'ailleurs être un des objectifs de la prochaine mission spatiale Rosetta, dans laquelle l'Observatoire de Besançon est impliqué.

Problème à N corps dans un champ Képlerien (de 1990 à 1994)

L'étude dynamique des systèmes de N corps intervient dans de nombreux cas. Cependant, de tels systèmes ne peuvent être étudiés que par simulation numérique car, au delà de deux corps, il n'existe plus de solutions analytiques à ce problème. Un programme a été développé à l'Observatoire de Besançon pour étudier l'évolution d'un ensemble de particules de faible diamètre gravitant autour d'une forte masse centrale. Si l'on néglige les interactions particule-particule devant les interactions masse centrale-particule (cas képlerien), les orbites sont elliptiques et la détection des chocs est aisée. Dans le cas contraire, les orbites étant imprévisibles, l'évolution du système, et notamment la prise en compte des collisions, ne peut se faire que pas à pas, en faisant évoluer la simulation. Cependant, le suivi de l'évolution du système implique une connaissance très précise de chaque instant de choc, ainsi que des position et vitesse au moment de la collision des particules se choquant. La détection des chocs est réalisée en mesurant toutes les distances particules-particules après chaque pas de calcul (stage de C. Aymonin, Maîtrise Ingénierie Mathématique, 1991). Afin de préciser l'instant du choc et la position des particules entre deux pas successifs, j'ai été amené à implanter un sous- programme basé sur une interpolation à l'ordre 3 des mouvements de ces particules. L'instant du choc est ainsi obtenu en résolvant une équation non-linéaire d'ordre 6 (réf. A.2).

Une autre façon d'aborder ce problème nous est fournie par la méthode de Monte-Carlo. Au lieu de calculer les position et vitesse des N corps à chaque itération, il est possible grâce à cette méthode, de suivre une particule prise au hasard et de modéliser les différentes interactions et les chocs par des lois probabilistes. On peut ainsi réduire notablement le temps de calcul et par conséquent étudier des systèmes comportant un nombre de corps beaucoup plus grand. Un premier stagiaire, que j'ai coencadré, a travaillé sur ce sujet (stage de X. Coucogne, DESS de Calcul Scientifique, 1992). Ensuite, un deuxième stagiaire, que j'ai encadré, a affiné les distributions des différents paramètres de choc en fonction des paramètres d'orbite de la particule test. Ces distributions ont tout d'abord été définies empiriquement, en les mesurant sur le programme traitant les N particules (stage de F. Poulet, maîtrise d'Ingénierie Mathématique, 1993). Puis lors de son stage de DEA (DEA d'Astronomie Fondamentale, Mécanique Céleste, Géodésie de l'Observatoire de Paris, 1994) que j'ai également encadré, F. Poulet est parvenu à expliquer ces distributions par une étude de la physique du système (réf. D.10). Il a ainsi été capable de prévoir leur évolution lorsque, par exemple, le nombre de particules du système change, sans avoir à utiliser le programme traitant les N particules.

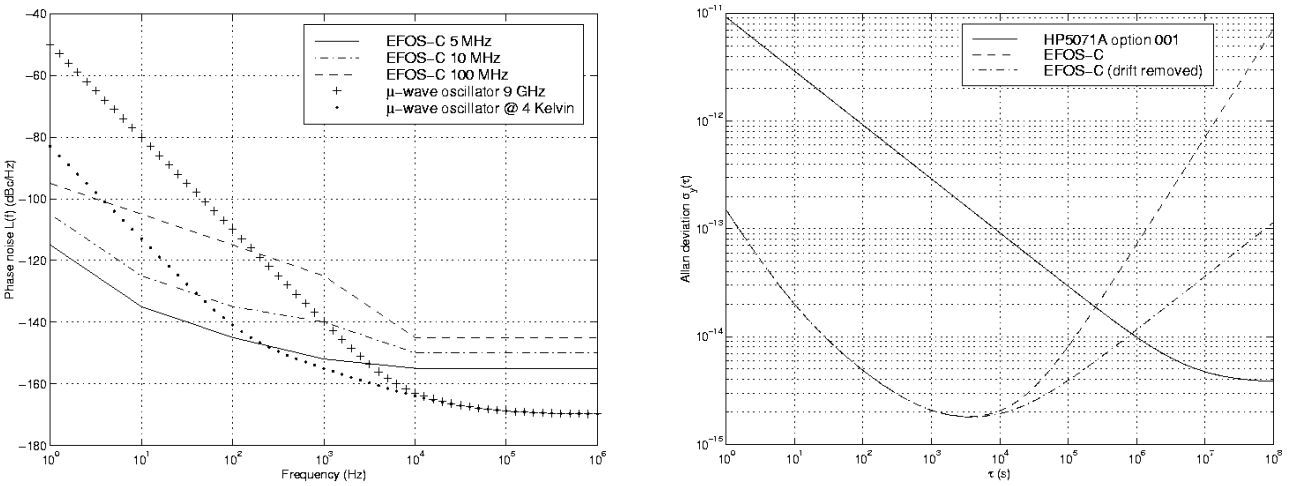

FIG. 3.10 – Comparaison des performances des horloges du LCEP, du LPMO et de l'observatoire. La figure de gauche compare le bruit de phase des oscillateurs micro-ondes du LPMO (à température ambiante et à 4 K) avec celui du maser du LCEP (EFOS-C). La figure de droite compare la stabilité du maser du LCEP à une horloge atomique à jet de Césium de l'observatoire (HP 5071 A).

3.3.7 Collaborations extérieures

Collaboration locale : liaison interlaboratoire (1999-2006)

Les activités des trois laboratoires Temps-Fréquence bisontins sont complémentaires :

- Femto/LCEP (Laboratoire de Chronométrie Électronique et Piézoélectricité) est spécialisé dans les résonateurs à quartz, la mesure de la stabilité à court terme et du bruit de phase ;
- Femto/LPMO (Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs) s'intéresse aux oscillateurs à quartz, aux oscillateurs cryogéniques et à la mesure du bruit de phase ;
- l'Observatoire de Besançon est impliqué dans la mesure de la stabilité temporelle à long terme, le transfert de temps et les échelles de temps.

Ces trois laboratoires disposent de leurs propres horloges de référence :

- un MASER à Hydrogène au LCEP,
- des oscillateurs cryogéniques au LPMO,
- des horloges atomiques à jet de Césium à l'observatoire.

Chacune de ces horloges présente son maximum de stabilité sur des durées croissantes : sur le très court terme (durées inférieures à 1 milliseconde), les oscillateurs cryogéniques du LPMO sont les plus stables ; sur le moyen terme (de quelques ms à 1 jour), la stabilité du MASER-H du LCEP domine ; enfin, sur le long terme (durées supérieures à quelques jours), ce sont les horloges à Césium de l'observatoire qui prennent le relais (voir figure 3.10).

La mise en œuvre d'un lien par fibre optique entre le LCEP, le LPMO et l'observatoire de Besançon a été décidée afin de mettre en commun ces trois types d'horloges de référence. Les fibres ont été installées en fin d'année 2001.

Une collaboration s'est alors engagée sur l'étude et le développement d'un dispositif de correction des instabilités dues aux variations de température avec le BNM-SYRTE (ex BNM-LPTF), qui lui aussi étudie actuellement un lien optique ultra-stable dans le cadre de l'expérience PHARAO (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite).

Ce travail correspondait au sujet de thèse de Jad Sâalaoui, que j'ai coencadré avec Vincent Giordano du LPMO.

La mise en place du lien optique permettant de mettre en commun les références de fréquence du campus bisontin vient de mettre à disposition de notre laboratoire la stabilité à court terme du maser H de Femto/LCEP. Aujourd'hui, les équipements opérationnels sont en phase finale de construction et d'installation.

Outre les développements autour des horloges composites, ce nouvel outil ouvre des perspectives prometteuses quant aux performances accessibles par le laboratoire en terme de transfert de temps et de fréquence. La mise en place opérationnelle de transferts de temps en code P3 avec le SYRTE constitue la première étape de

ces évolutions futures qui pourra être suivie rapidement par la participation du maser à l'élaboration du temps atomique français TA(F).

De par ses liens étroits avec la caractérisation des différents types de bruits des oscillateurs, l'évaluation des incertitudes sur les transferts de temps et de fréquences (liens GPS, liens optiques) est un thème qui a des liens à la fois avec les services (participation au TA(F) et raccordement au TA(F) de laboratoires extérieurs) et les applications du type horloge composite. Là aussi le maser apporte des possibilités de caractérisation de certaines de ces incertitudes qui nous étaient inaccessibles avant le lien optique.

Enfin, l'accès au maser permettra également de relancer l'activité de recherche autour des transferts de temps et de fréquence utilisant la phase de la porteuse des signaux GPS.

Collaboration européenne : Galileo (1998-2006)

Galileo est l'homologue européen du système de localisation américain GPS. Son lancement vient d'être officiellement décidé par la communauté européenne.

La précision de la localisation est directement liée à la stabilité des horloges embarquées dans les satellites de la constellation Galileo. Le temps à bord doit être modélisé et prédit afin de distribuer les paramètres temporels aux utilisateurs. Il est donc nécessaire de caractériser les performances de prédiction temporelle.

Afin d'estimer l'incertitude sur le temps donné par l'oscillateur embarqué, un ajustement parabolique est effectué sur la période pendant laquelle le satellite est observable, puis il est extrapolé lorsque le satellite n'est plus visible. Le TIE (Time Interval Error) est par définition la différence à un instant donné entre le temps généré par l'horloge du satellite et le temps correspondant à l'extrapolation de l'ajustement parabolique (voir figure 3.11). En 1998, le CNES a proposé des spécifications basées sur le TIE maximum tolérable.

Le travail que m'a confié le CNES consistait à établir un lien formel entre les spécifications données en terme de TIE maximal et les caractéristiques utilisées par les fabricants d'oscillateurs et d'horloges (niveaux de bruits, variance d'Allan, etc.). Il s'agissait donc de calculer analytiquement le TIE pour des valeurs données de :

- durée d'interpolation,
- durée d'extrapolation,
- niveaux des 3 types de bruit basses fréquences (blanc, f^{-1} et f^{-2} de fréquence).

Le résultat de ce travail consiste en un système de 6 équations : pour chaque type de bruit considéré, on dispose d'une équation pour un ajustement quadratique et une équation pour un ajustement linéaire.

Ces relations théoriques ont été validées par des tests utilisant la méthode de Monte-Carlo et par le suivi de plusieurs types d'horloges réelles : oscillateurs à quartz (voir figure 3.12), horloges atomiques à rubidium et à césium. Leur utilisation a été adoptée par l'ensemble de la communauté Galileo.

Ce travail a donné lieu à une publication dans une revue à comité de lecture (réf. A.12) et plusieurs communications dans des congrès (réf. C.27, C.31, C.32 et C.37).

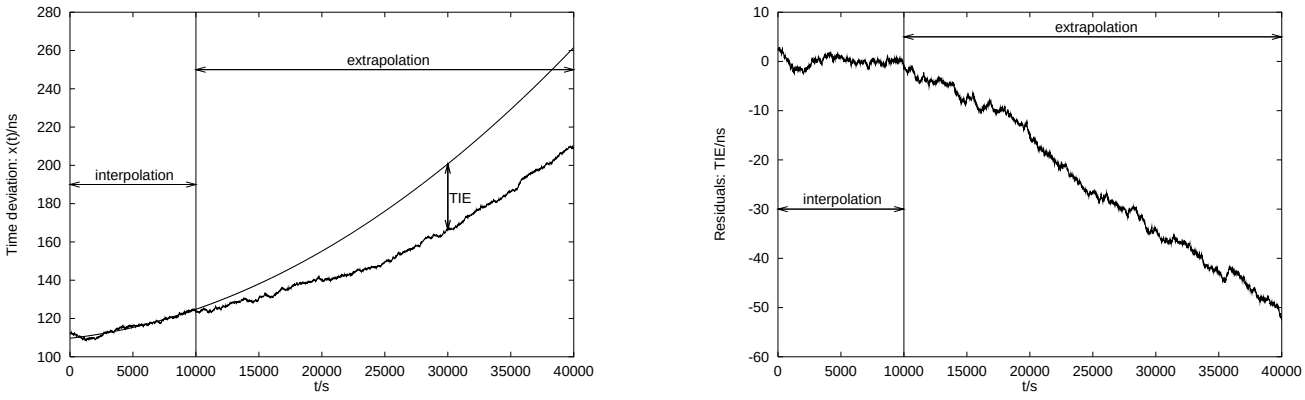

FIG. 3.11 – Ajustement quadratique sur une séquence d'écarts temporels de bruit blanc de fréquence (à gauche). L'ajustement est réalisé sur le premier quart de la séquence puis extrapolé ensuite. Les résidus à la parabole (à droite) pour la partie extrapolée correspondent à notre définition du TIE.

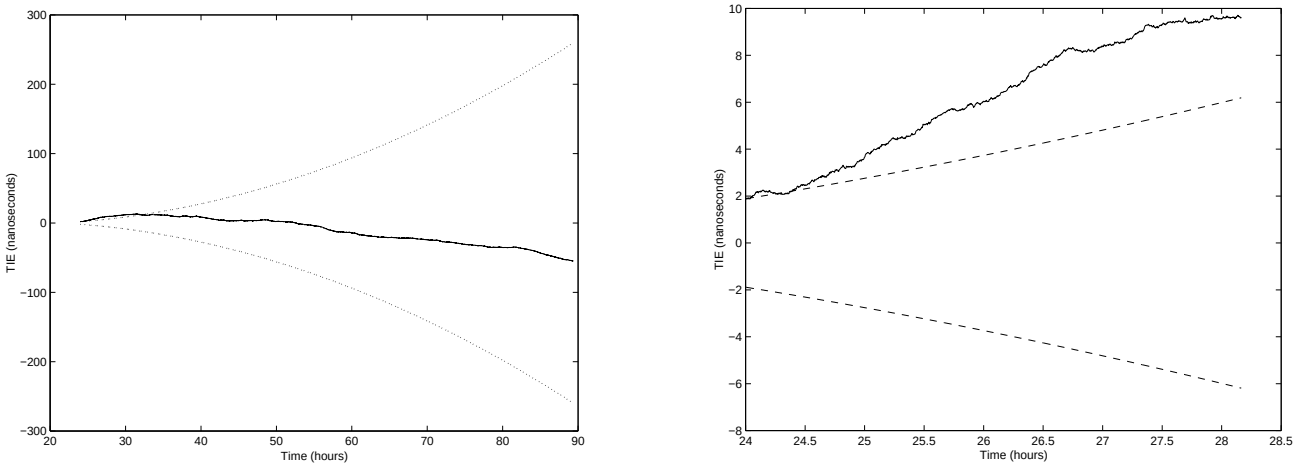

FIG. 3.12 – Évolution du TIE sur l'extrapolation de l'ajustement quadratique d'un oscillateur à quartz ultra-stable. L'ajustement a été effectué sur 24 heures avec une période d'échantillonage de 10 s. L'estimation du TIE (en pointillés) a été réalisée grâce à nos équations. La courbe de droite représente un agrandissement des 4 premières heures de la courbe de gauche.

Collaboration internationale : l'observatoire Auger (1993-2004)

L'observatoire de Besançon possède une grande maîtrise des techniques de transfert de temps utilisant le système américain GPS.

Une des applications en cours de ce travail concerne la participation à l'élaboration de l'Observatoire Auger, qui est un gigantesque détecteur (1600 détecteurs élémentaires répartis sur 3000 km^2) de rayons cosmiques à très haute énergie ($> 10^{19}$ eV). L'équipe Temps-Fréquence a la maîtrise d'oeuvre de la synchronisation des détecteurs élémentaires, dont dépend la précision de la reconstitution de la trajectoire des rayons cosmiques.

Après avoir qualifié notre système de datation des rayons cosmiques (carte de "Time Tagging") et vérifié qu'il satisfaisait aux spécifications (incertitude inférieure à 15 ns), nous avons été amené à nous rendre à Malargüe (Argentine) où se trouve le site de l'hémisphère sud. Nous y avons analysé *in situ* le fonctionnement de notre carte sur les 40 détecteurs de l"'Engineering Array". Le système de Time Tagging est complètement opérationnel depuis 2002.

Le principe de la méthode de datation des rayons cosmiques a été décrit lors du congrès EFTF 2002 (réf. C.36).

Le site Sud a été inauguré en novembre 2005. L'étude préliminaire du site Nord, qui sera construit dans l'Utah (USA) est en cours.

3.4 ENCADREMENT

3.4.1 Stages d'IUT

1993-1994	Sandrine Tisserand	1ère année Mesures Physiques	***Encadrement :*** étude d'un banc de mesure de stabilité temporelle à deux oscillateurs de référence
1994-1995	Sandrine Tisserand	2ème année Mesures Physiques	

3.4.2 Stages de maîtrise/master 1

1989-1990	François Meyer	Informatique	***Encadrement :*** Transfert de temps par satellite de TV géostationnaire
1990-1991	Christelle Aymonin	Ingénierie Math.	***Encadrement :*** Détection de chocs dans une simulation de système à N corps
1992-1993	François Poulet	Ingénierie Math.	***Encadrement :*** Méthode de Monte-Carlo pour simuler un système à N corps
1999-2000	Émile Carry	Physique	***Encadrement :*** étude d'un banc de mesure
1999-2000	Thierry Laroche	Physique	de stabilité temporelle à références multiples
2000-2001	Mickaël Dunand	Physique	***Coencadrement (50 %) :*** Étude des trajectoires des
2000-2001	Hugo Faivre	Physique	rayons cosmiques de très haute énergie (observatoire Auger)
2001-2002	Cédric Laurençot	Ingénierie Mathématique	***Encadrement :*** Asservissement virtuel d'un oscillateur
2002-2003	Hicham Benjelloun	Ingénierie Mathématique	***Encadrement :*** Asservissement virtuel d'un Maser à hydrogène sur une horloge atomique à jet de césium
2004-2005	Ying Zhang	Master maths appli	***Encadrement :*** Modélisation de la stabilité temporelle d'une horloge atomique à jet de césium
2005-2006	Dogo Boukar	ELO	***Encadrement :*** Etude de l'algorithme d'asservissement d'une horloge composite

3.4.3 Stage de DESS/master professionnel

1991-1992	Xavier Coucogne	Calcul Scientifique	***Coencadrement (50 %) :*** Méthode de Monte-Carlo pour simuler un système à N corps
2004-2005	Hicham Benjelloun	Master pro maths appli	***Encadrement :*** Estimation de l'incertitude des niveaux de bruit d'un oscillateur
2005-2006	Thierry Deiller	Patrimoine, Culture, Technologie (ENSAM Cluny)	***Coencadrement :*** Etude de faisabilité du "Jardin des Etoiles et du Temps"

3.4.4 Stage de DEA/master recherche

1990-1991	François Meyer	IAP	***Coencadrement (50 %) :*** Transfert de temps par satellite TV
1993-1994	Lakhdar Benkoula	AOEMS	***Encadrement :*** Comparaison de différentes méthodes de mesure de stabilité temporelle
1993-1994	François Poulet	Astro. Paris VI	***Encadrement :*** Méthode de Monte-Carlo pour simuler un système à N corps
2000-2001	Jad Sâalaoui	OM2S	***Encadrement :*** Liaison interlaboratoire par fibres optiques
2001-2002	Mohamed El Motauakil	OM2S	***Encadrement :*** Étude et réalisation d'un dispositif de correction de phase des signaux transmis par le réseau de fibres optiques inter-laboratoire
2005-2006	Pierre-Etienne Lefevre	ELO	***Encadrement :*** Projet HOROM : étude des circuits de conversion analogique/numérique et numérique/analogique
2006-2007	Dogo Boukar	ELO	***Encadrement :*** Projet HOROM : réalisation du circuit d'asservissement de l'oscillateur à quartz

3.4.5 Thèses

1991-1995	François Meyer	SPI (UFC)	***Coencadrement (33 %) :*** Transfert de temps par satellite TV
1993-1996	Gilles Zalamansky	Astro. Paris XI	***Coencadrement (50 %) :*** Étude théorique des causes d'instabilité temporelle des pulsars milliseconde
2001-2005	Jad Sâalaoui	SPI (UFC)	***Coencadrement (50 %) :*** Liaison interlaboratoire par fibres optiques
2004-	Cécile Aguillaume	CNAM	***Coencadrement (50 %) :*** De l'outil de travail à l'objet de musée : Comment "patrimonialiser" les instruments scientifiques ? Le cas de l'observatoire de Besançon
2006-	Papa M. Mbaye	ED Pasteur (UFC)	***Encadrement :*** Réalisation d'une horloge de référence composite : Application à la génération physique d'une échelle de temps
2007-	Cédric Plantard	ED Pasteur (UFC)	***Encadrement :*** Projet HOROM : réalisation d'horloges de référence à oscillateurs multiples

3.4.6 Séjours post-doctoraux

1995-1996	Martin McHugh	Astrophysique	***Encadrement :*** Intégration d'un algorithme de mesure de bruit dans le programme d'analyse des données de pulsars milliseconde
1996-1997	Philip Tuckey	Astrophysique	***Encadrement :*** Etude du bruit de fond d'ondes gravitationnelles d'origine cosmologique.

3.5 RAYONNEMENT SCIENTIFIQUE

3.5.1 Collaborations scientifiques

- CNES (Michel Brunet, Jérôme Delporte)
- Femto (Serge Galliou, Vincent Giordano, Yann Kersalé, Enrico Rubiola)
- JPL, USA (Chuck Greenhall)
- LPL (Christian Chardonnet)
- NIST, USA (Dave Howe)
- Observatoire National de Rio de Janeiro, Brésil (Selma Junqueira)
- Oscilloquartz (Jean-Pierre Aubry)
- Syrte, Observatoire de Paris (Yves Richard, Giorgio Santarelli, Pierre Uhrich, Peter Wolf)
- Université de Washington, USA (Don Percival)

3.5.2 Comités de lecture de revues internationales

Je suis “referee” occasionnel pour les revues internationales suivantes :

- *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*
- *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*
- *Metrologia*

3.5.3 Conférences invitées et présidence de sessions

J’ai été invité à présenter les travaux suivants :

- “Uncertainties of drift coefficients and extrapolation errors : Application to clock error prediction”, F. Vernotte, J. Delporte, M. Brunet, T. Tournier, IVth Time Scales Algorithms Symposium, BIPM (Sèvres), mars 2002, publié dans Metrologia 38(4)
- “Time and Frequency Metrology : State of the Art”, F. Vernotte, Séminaire invité à l’Observatoire National, Rio de Janeiro, octobre 2005

L’université Chouaib Doukkali (El Jadida, Maroc) m’a invité une semaine (octobre 2006) pour présenter un cycle de conférences de diffusion de la culture scientifique.

J’ai été “chairman” de sessions lors des congrès suivants :

- *18th European Frequency and Time Forum*, session “Algorithms, Tests & Measurements”, Guildford (Royaume Uni), avril 2004.
- *19th European Frequency and Time Forum*, session “Compact clocks”, Besançon, mars 2005.

3.5.4 Jurys de thèses et d’HDR

- Bénédicte Rougeaux, université Paul Sabatier, Toulouse, 1999
- Ala’a Makdissi, université Paris XI Orsay, 1999 (rapporteur)
- Fabrice Stahl, UFC, 2004 (HDR)
- Jad Sâalaoui, UFC, 2005
- Eric Mboungou, UFC, 2006 (président)
- François Begin, UFC, 2006 (président)

3.5.5 Evaluation de structures universitaires

Je viens d’être recruté par l’Université de Lausanne pour une mission d’expertise au cours de l’année 2007 qui repose sur l’analyse du rapport d’auto-évaluation de la Faculté de Géosciences et de l’Environnement de Lausanne *in situ*.

3.5.6 Relations avec le monde industriel - Contrats

- Commission Permanente d'Accréditation Temps-Fréquence du COmité FRançais d'ACcréditation (COFRAC) : expert de 1998 à 2002.
  L'expertise porte sur les demandes ou renouvellements d'accréditation pour la métrologie du Temps et des Fréquences de laboratoires ou entreprises. Elle comprend notamment :
  – *l'analyse des dossiers*, visant à vérifier l'adéquation entre le niveau d'accréditation demandé et les possibilités en terme de matériel et de personnel ;
  – *des audits dans les laboratoires*, afin d'examiner la conformité des installations, la méthodologie suivie et la qualification des opérateurs.
- Contrats avec le Centre National d'Études Spatiales : Étude et définition d'une échelle de temps interne aux satellites du système européen GALILEO.
  – *1997-2000 :* "Évaluation théorique des lois de passage entre les variances des générateurs de fréquence et les outils au sens des moindres carrés utilisés dans les programmes spatiaux", partenaire Michel Brunet (CNES), montant 23962,81 FF TTC.
  – *2000-2002 :* "Vérification expérimentale du *Time Interval Error* d'une horloge et prise en compte des sensibilités environnementales", partenaire Jérôme Delporte (CNES), montant 53987,94 FF TTC.
  – *2002-2004 :* "Étude de la restitution d'horloges par triangulation", partenaire Jérôme Delporte, montant 12627,77 € TTC.
  – *2005-2006 :* "Triangulation d'horloges", partenaire Jérôme Delporte, montant 8735,76 € TTC
- Expertise pour la Commission Européenne : depuis 2004, je suis expert auprès du Galileo Joint Undertaking. Dans ce cadre, je participe à l'évaluation des réponses aux appels d'offres relatives au système de navigation par satellite européen Galileo.
- InterReg : projet HOROM (HORloge à Oscillateurs Multiples). Projet en partenariat avec la société Suisse Oscilloquartz, l'Institut des Microtechniques de Neuchâtel et la société Grenobloise Gorgy Timing. Montant 90 k€ TTC + 67165 CHF (dont 81 k€ pour l'observatoire).

3.5.7 Diffusion de la culture scientifique

C'est une des 4 missions du service public de l'enseignement supérieur mentionnées dans l'article 4 de la loi 84-52 sur l'enseignement supérieur. Elle me semble d'autant plus importante pour un observatoire que, d'une part, la demande du public est très forte, et que, d'autre part, elle peut constituer la "valorisation" de la recherche qui y est menée, trop fondamentale pour conduire à des applications industrielles directes. J'ai toujours été sensible à cette mission en tant qu'enseignant-chercheur, je le suis d'autant plus en tant que directeur d'observatoire. Je participe activement à toutes les actions de diffusion de la culture scientifique dans lesquelles l'observatoire de Besançon est impliqué, qu'il en soit l'organisateur ou non :

- *Conférences grand public :* cycle de conférences de l'observatoire, Université Ouverte.
- *Expositions et salons :* fête de la science, salon "Initial" (orientation des lycéens).
- *Visites de l'observatoire de Besançon :* essentiellement pour les scolaires, parfois pour des associations.
- *Séances d'observation :* nuit des étoiles (2000 personnes lors de l'édition 2003), observation de l'opposition de Mars (300 visiteurs en 2 séances en septembre 2003).
- *Retransmission en direct sur le web d'évènements astronomiques :* transit de Mercure devant le Soleil (7 mai 2003), passage de Vénus devant le Soleil (8 juin 2004).
- *Cours d'astronomie en ligne de l'observatoire de Besançon :* la première partie du cours, le module découverte, est ouverte ; d'autres suivront, à des niveaux croissants (premier puis second cycle universitaire).
- *Valorisation du patrimoine :* entre 2001 et 2003, le patrimoine de l'observatoire de Besançon a fait l'objet d'une étude systématique grâce à l'inventaire général du patrimoine astronomique français mis en place conjointement par le ministère de la culture et le ministère de l'éducation nationale. La DRAC de Franche-Comté, qui avait la charge de cette étude, nous a alors convaincu d'effectuer une demande de protection de l'ensemble de ce patrimoine au titre des monuments historiques. Cette démarche a partiellement abouti puisque l'ensemble des bâtiments est inscrit, et que certains d'entre eux font l'objet d'une procédure de classement. Le dossier concernant les instruments est, quant à lui, en cours d'instruction. Forts de cette reconnaissance, nous avons entamé plusieurs actions visant à valoriser ce patrimoine : res-

tauration du cadran solaire analemmatique (2004), mise aux normes de l'escalier de l'astrographe (2005), restauration d'anciens instruments (en cours), restauration du toit ouvrant de la méridienne (2007 ?). Tous ces travaux ont été effectués grâce à la mairie de Besançon, propriétaire des terrains et des anciens bâtiments, et de la région de Franche-Comté, avec les conseils de la DRAC. Pour promouvoir cette revalorisation, nous participons depuis 2004 aux journées du patrimoine. Grâce à la mobilisation d'une grande partie du personnel de l'observatoire, nous avons pu accueillir plusieurs centaines de visiteurs lors de ces week end. Signalons enfin un projet à long terme nettement plus ambitieux : la création sur le site de l'observatoire du "Jardin des Étoiles et du Temps", espace entièrement dévolu à la diffusion de la culture scientifique et technique, en collaboration étroite avec les associations citées ci-dessus. Une association, l'association "Méridienne", a été créée pour porter ce projet. Enfin, récemment (printemps 2006) ce projet est devenu beaucoup plus ambitieux grâce à l'adjonction de deux nouveaux volets :

– le déménagement du jardin botanique de Besançon sur le parc de l'observatoire
– la création d'un centre de culture scientifique sur ce site en coproduction entre l'Université de Franche-Comté et le Pavillon des Sciences.

Ainsi, autour de deux pôles forts concernant l'astronomie et la bio-diversité, une synergie est en train de naître au sujet des enjeux environnementaux, dont le fil conducteur sera la diffusion de la culture scientifique dans son acception la plus large. C'est en partie pour mener à bien ce projet que j'ai été nommé chargé de mission pour la diffusion de la culture scientifique à l'Université de Franche-Comté

3.6 PERSPECTIVES

3.6.1 HOROM : Réalisation d'horloge de référence à oscillateurs multiples. Application aux échelles de temps physique

La réalisation d'horloges constitutées de plusieurs oscillateurs est un concept extrêment prometteur en terme de gain de stabilité et d'exactitude. Pourtant, bien que décrit il y a plus de 10 ans, peu d'applications utilisent ce principe. Le but de ce projet est de répondre à l'attente qui est manifestée aussi bien par les laboratoires de métrologie du temps et des fréquences que par les besoins industriels en terme d'horloges performantes à faible coût. À la frontière entre ces deux exigences se situent des applications telles que Galileo, qui, en plus d'être riches en retombées grand public, se heurtent à des défis technologiques majeurs en terme de génération et de contrôle d'échelles de temps de très haute stabilité. Ce projet s'oriente autour de deux axes de recherche :

1. les systèmes constitués d'horloges complémentaires, les unes stables à court terme et les autres stables à long terme, afin de constituer une échelle de temps possèdant ces deux caractéristiques ;
2. les systèmes constitués d'oscillateurs du même type, typiquement des oscillateurs à quartz, afin d'obtenir une horloge à la fois plus stable et plus robuste que chaque oscillateur indépendant.

Il faut également insister sur le caractère urgent que présente cette étude compte-tenu de l'imminence du lancement des premiers satellites Galileo (2008) et de la forte concurrence qui s'exerce sur le marché des télécommunications, domaine dans lequel les avancées technologiques sont étroitement reliées à la maîtrise du temps et des fréquences.

Enfin, ce travail est réalisé dans le cadre d'un projet de collaboration Interreg entre l'observatoire de Besançon, la société Suisse Oscilloquartz (Neuchâtel), qui fabrique et commercialise des horloges atomiques, et des partenaires secondaires qui sont l'Institut des Microtechniques de Neuchâtel et la société Gorgy Timing (Grenoble). Bien que fondamental par certains de ses aspects, ce sujet présente donc également une finalité industrielle directe.

Il correspond aux stages de master recherche de P. E. Lefevre et D. Boukar ainsi qu'aux sujets de thèse de P. M. Mbaye et C. Plantard.

3.6.2 Pulsars milliseconde et références spatio-temporelles

L'arrivée à l'observatoire de Besançon d'A. Fienga, spécialiste des éphémérides planétaires à l'IMCCE, coïncide avec la réactivation au niveau international de l'étude du chronométrage des pulsars millisecondes en vue notamment de déceler la signature d'ondes gravitationnelles. De plus, la création de l'institut UTINAM nous a incité a resserer les thématiques dans le domaine de l'astronomie (équipe Astrophysique et Références Temps-Espace). C'est pourquoi il nous a paru extrêmement pertinent de conjuguer la volonté des métrologues du temps-fréquence d'augmenter la stabilité à long terme des échelles de temps avec celle des métrologues de l'espace d'affiner la connaissance des positions planétaires. En effet, le chronométrage des pulsars milliseconde est directement affecté par les imprécisions des modèles d'éphémérides, ce qui se traduit par des signatures facilement identifiables dans les résidus de chronométrage. Le projet qui a donné lieu à une demande de PPF pour le prochain quadriennal, porté par A. Fienga, s'appuie également sur un raccordement des pulsars au système de référence ICRF grâce à des observations VLBI. Mon rôle dans ce projet sera l'analyse spectrale des résidus de chronométrage.

3.6.3 ACES

À plus long terme, ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) est un projet dont le but serait de placer sur la station spatiale internationale (ISS) une horloge atomique à atomes froids (PHARAO : Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite, développée au BNM-SYRTE et au LPMO) et un maser à hydrogène (développé par l'observatoire de Neuchâtel).

Le transfert de temps devrait être assuré par un lien micro-onde entre la station spatiale et les stations au sol. Les caractéristiques orbitales de l'ISS autoriseraient pour un lieu donné, des transferts de temps sur des fenêtres de quelques minutes à chaque révolution (période 90 minutes). Ensuite, au bout d'une dizaine de révolutions, l'ISS devrait être inobservable jusqu'au lendemain. L'observatoire de Paris m'a chargé d'étudier l'effet des temps morts dans les mesures sur l'étude de la stabilité des horloges à bord.

PUBLICATIONS

A - Publications dans des revues internationales à comité de lecture

[A-1] **F. Vernotte**, D. Charraut, E. Lantz, et D. Courjon.
Karhunen-loeve transform in optical microscopy. application to linewidth measurement. Optical Engineering, 29(9) :1151–1156, Septembre 1990.

[A-2] S. Clairemidi et **F. Vernotte**.
Systems of coliding bodies in gravitational fields : evolution and role of the internal rotations. Earth, Moon and Planets, 58 :271–287, 1992.

[A-3] **F. Vernotte**, E. Lantz, J. Groslambert, et J.J. Gagnepain.
Oscillator noise analysis : multivariance measurement. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 42(2) :342–350, Avril 1993.

[A-4] **F. Vernotte**, J. Groslambert, et J.J. Gagnepain.
A new method of measurement of the different types of noise altering the output signal of oscillators. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 42(6) :968–975, Octobre 1993.

[A-5] M. Planat, V. Giordano, G. Marianneau, **F. Vernotte**, M. Mourey, C. Eckert, et J. Miehe.
Is the frequency noise of an oscillator of deterministic origin ? IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 43(2) :326–330, 1996.

[A-6] **F. Vernotte**, G. Zalamansky, M. McHugh, et E. Lantz.
Cut-off frequencies and noise power law model of spectral density : adaptation of the multi-variance method for irregularly spaced timing data using the lowest mode estimator approach. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 43(3) :403–409, 1996.

[A-7] M.P. McHugh, G. Zalamansky, **F. Vernotte**, et E. Lantz.[1]
Pulsar timing and the upper limits on a gravitational wave background : a Bayesian approach. Physical Review D, 54(10) :5993–6000, Novembre 1996.

[A-8] G. Zalamansky, C. Robert, **F. Vernotte**, et F. Taris.[1]
Search of a gravitational wave background in timing residuals of PSR 1937+21 : Minimal model and upper limits on Ω_{gr}. Monthly Notices of The Royal Astronomical Society, 288 :533–537, Juillet 1997.

[A-9] **F. Vernotte**, G. Zalamansky, et E. Lantz.[1]
Time stability characterization and spectral aliasing. Part I : A time domain approach. Metrologia, 35(5) :723–730, Décembre 1998.

[A-10] **F. Vernotte**, G. Zalamansky, et E. Lantz.[1]
Time stability characterization and spectral aliasing. Part II : A frequency domain approach. Metrologia, 35(5) :731–738, Décembre 1998.

[A-11] **F. Vernotte** et G. Zalamansky.[1]
A Bayesian method for oscillator stability analysis. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 46(6) :1545–1550, Novembre 1999.

[A-12] **F. Vernotte**, J. Delporte, M. Brunet, et T. Tournier.[1]
Uncertainties of drift coefficients and extrapolation errors : Application to clock error prediction. Metrologia, 38(4) :325–342, Décembre 2001.

[A-13] **F. Vernotte**.[1]
Application of the moment condition to noise simulation and to stability analysis. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 49(4) :508–513, Avril 2002.

[A-14] Auger Collaboration (dont **F. Vernotte**).
Properties and performance of the prototype instrument for the pierre auger observatory. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 523 :50–95, 2004.

[1] Les publications A-7 à A-13 sont disponibles en ligne (format pdf) à l'adresse :
`http ://www.obs-besancon.fr/www/tf/publi_vernotte.html`.

[A-15] D. A. Howe, R. L. Beard, C. A. Greenhall, **F. Vernotte**, W. J. Riley, and T. K. Peppler.
Enhancements to GPS operations and clock evaluations using a "total" Hadamard deviation. IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 52(8) :1253–1261, Août 2005.

[A-16] **F. Vernotte**.
Stabilité temporelle et fréquentielle des oscillateurs : modèles. Techniques de l'Ingénieur, RE1(R680) :R680/1–R680/10, 2006.

[A-17] **F. Vernotte**.
Stabilité temporelle et fréquentielle des oscillateurs : outils d'analyse. Techniques de l'Ingénieur, RE1(R681) :R681/1–R681/10, 2006.

[A-18] M. Addouche, F. Meyer, and **F. Vernotte**.
The noise-based estimate of the GPS time transfer uncertainty. Metrologia, 2006 (soumis).

[A-19] J.Saalaoui, V.Giordano, and **F.Vernotte**.
Development of a composite clock based on a dual-mixer frequency system. IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2006 (soumis).

[A-20] J.Saalaoui, F.Lardet Vieudrin, **F.Vernotte**, E.Rubiola, and V.Giordano.
Comparaison of different systems for two-way optical fiber frequency transfer system. IEEE transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2006 (soumis).

B - Autres publications, livres et ouvrages collectifs à comité de lecture

[B-1] J. Clairemidi, P. Rousselot, **F. Vernotte**, et G. Moreels.
Dust and gas jets : Evidence for a diffuse source in halley's coma. In Asteroids, Comets, Meteors, pages 129–132, Décembre 1992.

[B-2] P. Rousselot, J. Clairemidi, **F. Vernotte**, et G. Moreels.
Evolution of near uv halley's spectrum in the inner coma. In Asteroids, Comets, Meteors, pages 525–528, Décembre 1992.

[B-3] **F. Vernotte**.
Approche multivariance du bruit de fréquence des oscillateurs. Annales des télécommunications, 51(9-10) :530–540, Septembre-Octobre 1996.

[B-4] **F. Vernotte**.
Selection and Use of Precise Frequency and Time Systems, chapitre The multi-variance analysis. Number 10504 in Handbooks of the Radiocommunication Sector. International Telecommunication Union, 1997. ISBN : 92-61-06511-2.

[B-5] **F. Vernotte** et G. Zalamansky.
Proceedings of the 18th International Workshop on Maximum Entropy and Bayesian Methods of Statistical Analysis, volume 105 of Fundamental theories of physics, chapitre Oscillator stability analysis using a Bayesian approach. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Pays-Bas, Juillet 1999. ISBN : 0-7923-5766-3.

[B-6] **F. Vernotte**.[2]
Intrusions spiritualistes et impostures intellectuelles en sciences, sous la direction de J. Dubessy et G. Lecointre, chapitre Interprétations frauduleuses en astrophysique, pages 367-376. Collection Matériologiques. Éditions Syllepse, Paris, 2001. ISBN : 2-913165-67-2.

C - Articles publiés dans des actes de colloques internationaux

[C-1] J. Groslambert, J. J. Gagnepain, **F. Vernotte**, et F. Walls.
A new filtered allan variance and its application to the identification of phase and frequency noise sources. In 43th Frequency Control Symposium, pages 326–330, Denver (Colorado), USA, Mai 1989.

[2] La publication B-6 est disponible en ligne à l'adresse : `http ://www.obs-besancon.fr/tf/equipes/vernotte.html`.

[C-2] **F. Vernotte**, J. Groslambert, et J. J. Gagnepain.
Identification and measurement of different types of noises present in a frequency source. In 4th European Frequency and Time Forum, pages 215–216, Neuchâtel, Suisse, Mars 1990.

[C-3] F. Meyer, M. Brunet, M. Granveaud, **F. Vernotte**, et M. Vincent.
Time transfer using a geostationary direct TV satellite. In 5th European Frequency and Time Forum, pages 82–88, Besançon, France, Mars 1991.

[C-4] **F. Vernotte**, J. Groslambert, et J. J. Gagnepain.
Practical calculation methods of spectral density of instantaneous normalized frequency deviation from instantaneous time error samples. In 5th European Frequency and Time Forum, pages 449–455, Besançon, France, Mars 1991.

[C-5] **F. Vernotte** et E. Lantz.
Time stability : an improvement of the multivariance method for the oscillator noise analysis. In 6th European Frequency and Time Forum, pages 343–347, Noordwijk, Pays-Bas, Mars 1992.

[C-6] **F. Vernotte**, J. J. Gagnepain, J. Groslambert, et E. Lantz.
A new multi -variance method for the oscillator noise analysis. In 46th Frequency Control Symposium, pages 284–289, Hershey (Pennsylvanie), USA, Mai 1992.

[C-7] **F. Vernotte**, J. J. Gagnepain, J. Groslambert, et E. Lantz.
Oscillator noise analysis : multi-variance measurement. In Conference on Precision Electromagnetic Measurement, pages 177–178, Paris, France, Juin 1992.

[C-8] F. Meyer, M. Granveaud, B. Laporte, **F. Vernotte**, et M. Vincent.
Improved time transfer using a geostationary direct tv satellites. In 7th European Frequency and Time Forum, pages 129–134, Neuchâtel, Suisse, Mars 1993.

[C-9] **F. Vernotte**, E. Lantz, F. Meyer, et F. Naraghi.
Simultaneous estimation of drifts and noise coefficients of oscillators : application of the analysis of the time stability of the millisecond pulsars. In 47th Frequency Control Symposium, pages 326–330, Salt Lake City (Utah), USA, Mai 1993.

[C-10] **F. Vernotte**, G. Zalamansky, et E. Lantz.
Noise and drift analysis of non-equally spaced timing data. In 25th Precise Time and Time Interval, pages 379–388, Marina Del Rey (Californie), USA, Novembre 1993.

[C-11] **F. Vernotte**, G. Zalamansky, et E. Lantz.
Multivariance analysis : last improvements and practical utilization. In Conference on Precision Electromagnetic Measurement, pages 6–7, Boulder (Colorado), USA, Juin 1994.

[C-12] **F. Vernotte**, E. Lantz, M. McHugh, et G. Zalamansky.
Cut-off frequencies and noise power law model of spectral density : adaptation of the multi-variance method using the structure function approach. In 9th European Frequency and Time Forum, pages 373–376, Besançon, France, Mars 1995.

[C-13] M. Planat, V. Giordano, G. Marianneau, **F. Vernotte**, M. Mourey, C. Eckert, et J. Miehe.
Is the frequency noise of an oscillator of deterministic origin ? In 9th European Frequency and Time Forum, pages 377–379, Besançon, France, Mars 1995.

[C-14] **F. Vernotte**, E. Lantz, M. McHugh, et G. Zalamansky.
Cut-off frequencies and noise power law model of spectral density : adaptation of the multi-variance for irregularly spaced timing data using the lowest mode estimator approach. In IEEE International Frequency Control Symposium, pages 330–336, San Fransisco (Californie), USA, Mai 1995.

[C-15] **F. Vernotte**, G. Zalamansky, et M. McHugh.
Long term stability prediction of millisecond pulsar timing by multi-variance analysis. In Symp. UAI 172, Paris, France, Juillet 1995.

[C-16] M. McHugh, G. Zalamansky, **F. Vernotte**, et E. Lantz.
Limits on a stochastic background of gravitational waves. In IAU Colloquium 160 - Pulsars : Problems and Progress, pages 129–130, Sydney, Australie, Janvier 1996.

[C-17] P. Guillemot, J. Folliard, M. Brunet, F. Meyer, **F. Vernotte**, M. Vincent, M. Granveaud, et P. Grudler.
Use of direct broadcasting satellite signals for time transfer and orbitography. In 10th European Frequency and Time Forum, pages 302–307, Brighton, Royaume-Uni, Mars 1996.

[C-18] **F. Vernotte**, G. Zalamansky, M. McHugh, et E. Lantz.
Spectral analysis of irregulary spaced timing data : comparison of several methods. In 10th European Frequency and Time Forum, pages 544–549, Brighton, Royaume-Uni, Mars 1996.

[C-19] **F. Vernotte**, G. Zalamansky, M. McHugh, et E. Lantz.
Estimation of the upper limit on the level of an undetected noise. In IEEE International Frequency Control Symposium, pages 875–879, Honolulu (Hawaï), USA, Juin 1996.

[C-20] **F. Vernotte** et M. Vincent.
Estimation of the uncertainty of a mean frequency measurement. In 11th European Frequency and Time Forum, pages 553–556, Neuchâtel, Suisse, Mars 1997.

[C-21] **F. Vernotte** et M. Vincent.
Estimation des incertitudes de mesure de fréquence moyenne. In 8ème congrès international de Métrologie, pages 299–302, Besançon, Paris, Octobre 1997.

[C-22] **F. Vernotte** et M. Vincent.
Relationships between drift coefficient uncertainties and noise levels : application to time error prediction. In 29th Precise Time and Time Interval, pages 29–36, Long Beach (Californie), USA, Décembre 1997.

[C-23] **F. Vernotte** et M. Vincent.
Estimation of the measurement uncertainty of the drift coefficients versus the noise levels. In 12th European Frequency and Time Forum, pages 222,227, Varsovie, Pologne, Mars 1998.

[C-24] **F. Vernotte** et G. Zalamansky.
A Bayesian method for oscillator characterization. In 30th Precise Time and Time Interval, pages 99–107, Reston (Virginie), USA, Décembre 1998.

[C-25] **F. Vernotte**.
Estimation of the power spectral density of frequency deviation samples : Comparison of three methods. In Joint Meeting of the 13th European Frequency and Time Forum and 1999 IEEE International Frequency Control Symposium, pages 1109–1112, Besançon, Avril 1999.

[C-26] D. Howe et **F. Vernotte**.
Generalization of the total variance approach to the modified allan variance. In 31th Precise Time and Time Interval, pages 267–276, Dana Point (Californie), USA, Décembre 1999.

[C-27] **F. Vernotte**, J. Delporte, M. Brunet, et T. Tournier.
Estimation of uncertainties in time error extrapolation. In 31th Precise Time and Time Interval, pages 305–316, Dana Point (Californie), USA, Décembre 1999.

[C-28] **F. Vernotte** and D. Howe.
Generalization of the total variance approach to the different classes of structure functions. In 14th European Frequency and Time Forum, pages 375–379, Turin, Italie, Mars 2000.

[C-29] P. Uhrich, P. Laurent, P. Lemonde, and **F. Vernotte**.
Atomic clock ensemble in space (aces) : Processing strategies for the frequency comparisons between aces clocks and earth clocks. In 14th European Frequency and Time Forum, pages 505–509, Turin, Italie, Mars 2000.

[C-30] D. Howe, R. Beard, C. Greenhall, and **F. Vernotte**.
A total estimator of the Hadamard function used for GPS operations. In 32th Precise Time and Time Interval, pages 255–267, Reston (Virginie), USA, Novembre 2000.

[C-31] J. Delporte, **F. Vernotte**, M. Brunet, and T. Tournier.
Modelisation and extrapolation of time deviation of USO and atomic clocks in GNSS-2 context. In 32th Precise Time and Time Interval, pages 45–56, Reston (Virginie), USA, Novembre 2000.

[C-32] J. Delporte, **F. Vernotte**, T. Tournier, and M. Brunet.
Modelisation and extrapolation of time deviation : Application to the estimation of the datation stability of a navigation payload. In 15th European Frequency and Time Forum, pages 245–249, Neuchâtel, Suisse, Mars 2001.

[C-33] **F. Vernotte**.
The moment condition : An equivalence principle between drift insensitivity and low frequency convergence. In 15th European Frequency and Time Forum, pages 237–241, Neuchâtel, Suisse, Mars 2001.

[C-34] D. Howe, R. Beard, C. Greenhall, **F. Vernotte**, and B. Riley.
Total hadamard variance : Application to clock steering by kalman filtering. In 15th European Frequency and Time Forum, pages 423–427, Neuchâtel, Suisse, Mars 2001.

[C-35] **F. Vernotte**.
Application of the moment condition to noise simulation and to stability analysis. In International Frequency Control Symposium'01, pages 133–137, Seattle, USA, Juin 2001.

[C-36] F. Meyer, P. Tuckey, and **F. Vernotte**.
Time tagging for the Auger observatory. In 16th European Frequency and Time Forum, page D_006, Saint-Petersbourg, Russie, Mars 2002.

[C-37] **F. Vernotte**, J. Delporte, M. Brunet, and T. Tournier.
Uncertainties of drift coefficients and extrapolation errors : Application to clock error prediction. In IVth Time Scales Algorithms Symposium, BIPM (Sèvres), France, Mars 2002. Publié dans Metrologia 38(4).

[C-38] **F. Vernotte**.
Application of the moment condition to noise simulation and to stability analysis. In IVth Time Scales Algorithms Symposium, BIPM (Sèvres), France, Mars 2002. Déjà publié dans IEEE-UFFC 49(4).

[C-39] J. Saalaoui, E. Rubiola, F. Lardet-Vieudrin, **F. Vernotte**, S. Galliou, and V. Giordano.
Stabilisation d'un lien optique pour le transefrt de fréquence de référence. In XIIIèmes Journées Nationales Microondes, pages 480–481, Lille, France, Mai 2003.

[C-40] J. Saalaoui, P. Salzenstein, F. Lardet-Vieudrin, S. Galliou, **F. Vernotte**, and V. Giordano.
Inter-laboratory time and frequency transfer by optical fiber. In VI International Conference for Young Researchers Wave Electronics and its Applications in Information and telecommunications Systems, Saint-Petersbourg, Russie, Septembre 2003.

[C-41] J. Saalaoui, F. Lardet-Vieudrin, R. Rubiola, S. Galliou, **F. Vernotte**, and V. Giordano.
Système inter-laboratoires de transfert de fréquence de référence par lien optique. In 17ème Colloque International Hertzian Optics and Dielectrics, Calais, France, Septembre 2003.

[C-42] M. Addouche, F. Meyer, and **F. Vernotte**.
Uncertainty estimation on GPS time transfer. In 35th Precise Time and Time Interval, pages 135–152, San Diego (Californie), USA, Décembre 2003.

[C-43] **F. Vernotte**, J. Delporte, and M. Brunet.
A "re-revisited" three cornered hat method for estimating clock instabilities. In 18th European Frequency and Time Forum, Guildford, UK, Avril 2004.

[C-44] J. Saalaoui, F. Lardet-Vieudrin, E. Rubiola, S. Galliou, **F. Vernotte**, and V. Giordano.
Phase correction of reference frequency signals transmission by optical fiber link. In 18th European Frequency and Time Forum, Guildford, UK, Avril 2004.

[C-45] J. Saalaoui, F. Lardet-Vieudrin, E. Rubiola, **F. Vernotte**, S. Galliou, and V. Giordano.
Métrologie temps-fréquence appliquée au transfert de temps (intercomparaison d'horloges) pour l'élaboration de l'echelle locale. In The Metrology Meeting, Rabat, Maroc, Juin 2004.

[C-46] J. Saalaoui, M. Addouche, F. Lardet-Vieudrin, V. Giordano, E. Rubiola, and **F. Vernotte**.
Frequency-locked between a H-Maser and Cs clock. In IEEE International Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control joint conference, Montréal, Canada, Août 2004.

[C-47] **F. Vernotte**, J. Delporte, and M. Brunet.
The three cornered hat method : an attempt to identify some clock correlations. In IEEE International Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control joint conference, Montréal, Canada, Août 2004.

[C-48] P. M. Mbaye, P. E. Lefevre, C. Plantard, **F. Vernotte**, and E. Rubiola.
Composite clock including a Cs clock, a H-Maser and a VCO. In 21st European Frequency and Time Forum, Genève, Suisse, Mai 2007 (soumis).

D - Mémoires universitaires

[D-1] **F. Vernotte**.
Application de la transformation de Karhunen-Loève à la mesure de largeur de traits sur circuits intégrés. Mémoire de DEA, Université de Franche-Comté, Laboratoire d'Optique P. M. Duffieux, Besançon, Juin 1987.

[D-2] **F. Vernotte**.
Stabilité temporelle des oscillateurs : nouvelles variances, leurs propriétés, leurs applications. Mémoire de thèse de doctorat, n° d'ordre 199, Université de Franche-Comté, Observatoire de Besançon, Février 1991.